

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EDUARDO DE SOUZA LIRA

**CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO OTIMIZADO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS PELO
GUIA DA AUSTROADS BASEADO NO MÉTODO PCA DE 1984**

Maceió

2017

EDUARDO DE SOUZA LIRA

**CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO OTIMIZADO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS PELO
GUIA DA AUSTROADS BASEADO NO MÉTODO PCA DE 1984**

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, com área de concentração em estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages
Coorientador: Prof. Dr. João Carlos Cordeiro Barbirato

Maceió

2017

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

L768c Lira, Eduardo de Souza.
Contribuição ao projeto otimizado de pavimentos rígidos pelo guia da
AUSTROADS baseado no método PCA de 1984 / Eduardo de Souza Lira. – 2017.
215 f.: il..

Orientador: Eduardo Nobre Lages.

Coorientador: João Carlos Cordeiro Barbirato.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas.
Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Maceió,
2017.

Bibliografia: f. 163-166.

Apêndice: f. 167-202.

Anexos: f. 203-215.

1. Pavimento de concreto. 2. Pavimento rígido. 3. Pavimento otimizado. I. Título.

CDU: 624.01:691.32



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC



**CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO OTIMIZADO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS
PELO GUIA DA AUSTROADS BASEADO NO MÉTODO PCA DE 1984**

EDUARDO DE SOUZA LIRA

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 11 do mês de julho do ano de 2017.

Banca Examinadora:

Eduardo Nobre Lages

Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages
Orientador – PPGEC/UFAL

João Carlos Cordeiro Barbirato

Prof. Dr. João Carlos Cordeiro Barbirato
(Coorientador - PPGEC/UFAL)

Eduardo Toledo de Lima Junior

Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Junior
(Avaliador Interno - PPGEC/UFAL)

Laura Maria Goretti da Motta

Prof.ª Dr.ª Laura Maria Goretti da Motta
(Avaliadora Externa – UFRJ)

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

Dedico este trabalho aos meus queridos irmãos Henrique e Alexandre (*in memoriam*) e aos meus queridos pais Givaldo Tavares Lira, engenheiro civil e professor aposentado da UFAL, e Diva de Souza Lira, pela dedicação e amor exclusivos à família.

AGRADECIMENTOS

Precipuamente, agradeço a Deus pelo sopro da vida e por ter me concedido vivenciar cada instante dessa nova etapa, os obstáculos, as dificuldades, a fadiga, tudo isso, misturado com momentos de deslumbre e de alegria.

Agradeço a minha querida esposa, Cláudia, por ter estado sempre ao meu lado nessa caminhada, sendo durante todo o tempo uma voz estimulante, invocativa e reconfortante. Agradeço-lhe ainda por seu olhar fidedigno e assistencial durante esta caminhada.

Aos queridos orientadores, Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages e Prof. Dr. João Carlos Cordeiro Barbirato, pela dedicação demonstrada, pelos preciosos conhecimentos transmitidos, pelas críticas construtivas, pela revisão do texto e, sobretudo, pelas palavras amigas e incentivadoras nas horas necessárias e que foram decisivas para elaboração e conclusão desta Dissertação.

Aos Coordenadores do PPGEC/CTEC/UFAL cujas gestões alcancei, Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Júnior e Prof. Dr. Wayne Santos de Assis, pelo acolhimento fraternal a mim dispensado em momentos cruciais do mestrado.

Ao Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques e ao Prof. Dr. Edvaldo Monteiro Lisbôa pela confiança depositada em meu nome, através de Carta de Recomendação à Comissão Julgadora para a Seleção de candidatos ao PPGEC de 2014.1, que ora se concretiza.

A todos os professores pelos relevantes conhecimentos transmitidos com amor, ética e profissionalismo, contribuindo, não apenas para a minha formação profissional, mas, também, para a minha formação como pessoa.

Ao meu querido sobrinho Cristiano Henrique Lira pelo auxílio na implementação computacional do algoritmo de otimização. Aos queridos colegas do DNIT, na pessoa do Eng. Civil Carlos Manoel Melo, pelo incentivo e força quanto ao tema escolhido para a dissertação. A todos os Colegas de Mestrado, pelo companheirismo e amizade.

A minha querida família: pais Givaldo e Diva; irmãos: Cristina, Margareth, Henrique, Alexandre (*in memoriam*), Juliana e, especialmente, à Catarina pelos incentivos e força nas horas de aflição; filhos: Arthur, Mariana e Marcela, razão maior de minha existência; e a todos os parentes e amigos que acreditaram nesse desafio.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Extensão da malha rodoviária brasileira	18
Figura 2 – Extensão de rodovias federais pavimentadas de pista dupla por região (km) – Brasil – 2016.....	19
Figura 3 – Processo de solução por métodos numéricos	27
Figura 4 – Método dos elementos finitos (MEF): Etapas da solução	28
Figura 5 – Elemento finito quadrilátero com 4 nós - localização dos quatro pontos de Gauss no sistema de coordenadas (s_1, s_2).....	29
Figura 6 – Configuração da rodagem de um veículo pesado, impressão do rasto nas possíveis configurações de carregamento e respectiva modelagem	30
Figura 7 – Elementos Finitos tridimensionais e correspondentes elementos de junta.....	31
Figura 8 – Modelo de elementos finitos do pavimento e da fundação (comportamento do semi-espaço)	31
Figura 9 – Curvas S-N ou curvas de Wöhler (exemplo metais não ferrosos em geral).....	33
Figura 10 – Ensaio de fadiga do concreto realizado em máquina de quatro colunas	33
Figura 11 – Comparação de distribuição de carga entre pavimentos equivalentes	34
Figura 12 – Vista em corte dos pavimentos rígido e flexível.....	35
Figura 13 – Aspecto superficial característico ocasionado pela ausência de juntas transversais e longitudinais em pavimentos de concreto simples.....	36
Figura 14 – Pavimento de concreto simples sem barras de transferência	38
Figura 15 – Pavimento de concreto simples com barras de transferência	38
Figura 16 – Pavimento de concreto simples reforçado descontinuamente	39
Figura 17 – Pavimento de concreto simples reforçado continuamente	39
Figura 18 – Pavimento de concreto armado	39
Figura 19 – Ensaio de resistência à tração na flexão – NBR 5738 (moldagem) e NBR 12142 (ensaio)	41
Figura 20 – Execução de pavimento rígido com vibro-acabadora.....	42
Figura 21 – Aspectos das juntas transversais	44
Figura 22 – Tipos de reservatório do selante	45
Figura 23 – Barras de transferência de carga	46
Figura 24 – Quadro com tipos e sub-bases para pavimentos de concreto	47
Figura 25 – Quadro com características usuais de sub-bases estabilizadas com cimento	48

Figura 26 – Prova de carga estática pela ASTM-D 1196/93.....	49
Figura 27 – Teste não destrutível pelo <i>Falling Weight Deflectometer</i> – FWD.....	49
Figura 28 – Relação aproximada entre o tipo de solo do subleito e o Módulo de reação do subleito (Coeficiente de Recalque)	50
Figura 29 – Relação entre Índice de Suporte Califórnia (<i>CBR</i>) e <i>k</i>	51
Figura 30 – Ensaio do <i>CBR</i>	51
Figura 31 – Duas placas adjacentes. ΔV representa o deslocamento tangencial relativo entre a superfície inferior da placa de cima e a superfície superior da placa de baixo	58
Figura 32 – Esquema que representa o Modelo líquido denso, Solo real e Modelo sólido elástico	61
Figura 33 – Tensões de borda, canto e interna à uma placa em função do Módulo de Reação do subleito	64
Figura 34 – Carta de influência nº 6, de Pickett e Ray	66
Figura 35 – Ábaco de Pickett e Ray, para o Caso I, Carta de influência nº 6	67
Figura 36 – Relação de tensões e número admissível de repetições de carga – curva de Fadiga (PCA de 1984).....	70
Figura 37 – Posições críticas de carga por eixo.....	72
Figura 38 – Escalonamento e ineficiência de junta quanto à transferência de carga devido à ausência de barras de transferência de carga.....	75
Figura 39 – Eficiência de junta quanto à transferência de carga devido à presença de barras de transferência de carga.....	75
Figura 40 – Aumento de <i>k</i> devido à presença de sub-base de concreto rolado	77
Figura 41 – Aumento de <i>k</i> devido à presença de sub-base de brita tratada com cimento.....	77
Figura 42 – Sub-base em concreto compactado a rolo – <i>CCR</i>	78
Figura 43 – O fator de tensão equivalente de borda depende da porcentagem de caminhões trafegando na borda	81
Figura 44 – Quadro com fator de segurança para a carga (FSC)	82
Figura 45 – Fluxograma do projeto de pavimentos rígidos simples pelo PCA de 1984	86
Figura 46 – Formulário-tipo (problema 1 – solução 1).....	89
Figura 47 – Formulário-tipo (problema 1 – solução 2).....	90
Figura 48 – Tabela do Limite mínimo para os tipos de sub-base asfáltica ou LMC (<i>CCR</i>) em função do projeto de tráfego.....	93

Figura 49 – Suporte efetivo do subleito usado na determinação da espessura da base de concreto	94
Figura 50 – Tabela trazendo a confiabilidade do projeto – Fator de Segurança de Carga (LSF) em função do tipo de pavimento.....	97
Figura 51 – Tabela com coeficientes para previsão da tensão equivalente.....	101
Figura 52 – Tabela com coeficientes para previsão do fator de erosão para bases sem BTC	101
Figura 53 – Tabela com coeficientes para previsão do fator de erosão para bases com BTC ou CRC	102
Figura 54 – Tabela mostrando a espessura mínima de projeto da placa (mm), em função do tipo de placa do pavimento.....	102
Figura 55 – Tabela mostrando diâmetro mínimo da barra de transferência de cargas do pavimento rígido em função da espessura da placa	103
Figura 56 – Modelo estrutural (corte transversal)	107
Figura 57 – Modelo estrutural discretizado – Q4 (MEF).....	109
Figura 58 – Fragmento do APÊNDICE B.....	110
Figura 59 – Fragmento do APÊNDICE B.....	111
Figura 60 – Fragmento do APÊNDICE B.....	111
Figura 61 – Fragmento do APÊNDICE B.....	112
Figura 62 – Fragmento do APÊNDICE B.....	112
Figura 63 – Fragmento do APÊNDICE C.....	113
Figura 64 – Fragmento do APÊNDICE C.....	113
Figura 65 – Modelo Conceitual – ex1opavrig.m – Exemplo de dimensionamento de pavimento rígido por meio do Modelo Conceitual	114
Figura 66 – Fragmento do APÊNDICE D	117
Figura 67 – Fragmento do APÊNDICE D	118
Figura 68 – Fragmento do APÊNDICE D	118
Figura 69 – Fragmento do APÊNDICE D	119
Figura 70 – Fragmento do APÊNDICE D	120
Figura 71 – Fragmento do APÊNDICE D	120
Figura 72 – Fragmento do APÊNDICE D	121
Figura 73 – Fragmento do APÊNDICE D	121
Figura 74 – Fragmento do APÊNDICE E.....	122
Figura 75 – Fragmento do APÊNDICE E.....	122

Figura 76 – Fragmento do APÊNDICE E.....	123
Figura 77 – Fragmento do APÊNDICE F.....	125
Figura 78 – Fragmento do ANEXO K.....	125
Figura 79 – Análise estrutural via <i>ex2austroads_new</i>	127
Figura 80 – Fragmento do APÊNDICE E.....	131
Figura 81 – Fragmento do APÊNDICE E.....	131
Figura 82 – Fragmento do APÊNDICE G.....	131
Figura 83 – Fragmento do APÊNDICE G.....	132
Figura 84 – Gráfico geral dos resultados da otimização pelo algoritmo <i>austroads</i> dos Cenários 1, 2 e 3 - 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa versus 2ª versão: $f_{cf} = 4,5$ MPa.....	136
Figura 85 – Gráficos específicos dos resultados da otimização via <i>austroads</i> dos Cenários 1, 2 e 3 - 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa versus 2ª versão: $f_{cf} = 4,5$ MPa.....	136
Figura 86 – Gráficos da variação do custo dos Cenários 1, 2 e 3 otimizados via <i>austroads</i> - 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa versus 1ª versão $f_{cf} = 4,5$ MPa.....	137
Figura 87 – Gráficos da otimização via <i>austroads</i> dos Cenários 1, 2 e 3 - 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa versus 2ª versão $f_{cf} = 4,5$ MPa.....	138
Figura 88 – Primeiro Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 2 (E_f).....	146
Figura 89 – Primeiro Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 3 (E_f).....	147
Figura 90 – Segundo Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 2, $E_f = 55\%$ (AC/BT).....	151
Figura 91 – Segundo Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 2, $E_f = 5\%$ (AC/BT).....	152
Figura 92 – Segundo Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 3, $E_f = 55\%$ (AC/BT).....	153
Figura 93 – Segundo Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 3, $E_f = 5\%$ (AC/BT).....	154
Figura 94 – Terceiro Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 2 (LSF).....	156
Figura 95 – Terceiro Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 3 (LSF).....	157
Figura 96 – Quarto Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado (D).....	159

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Procedimento para o projeto de pavimento rígido simples pelo PCA de 1984	85
Quadro 2 – Tópicos divergentes entre o método PCA de 1984 e AUSTROADS de 2010 ...	105
Quadro 3 – Dados iniciais dos Cenários 1, 2 e 3	130
Quadro 4 – Resultados da otimização pelo algoritmo <i>austroads</i> dos Cenários 1, 2 e 3 (iniciais) – 1ª versão: f_{cf} mínimo de 3,4 MPa	132
Quadro 5 – Resultados da otimização pelo algoritmo <i>austroads</i> dos Cenários 1, 2 e 3 (iniciais) - 2ª versão: f_{cf} mínimo de 4,5 MPa.....	134
Quadro 6 – Cenários 1, 2 e 3 otimizados pelo algoritmo <i>austroads</i> – 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa <i>versus</i> 2ª versão: $f_{cf} = 4,5$ MPa.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AG	Algoritmo Genético
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BGTC	Brita graduada tratada com cimento
BL	Barras de ligação
BTC	Barras de Transferência de Carga
CA-nº	Nomenclatura em função da tensão de escoamento do aço
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	CBR: Sigla americana que significa <i>California Bearing Ratio</i>
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CDE	Consumo de Danos por Erosão
cm	Centímetro
CRCP	Pavimento de Concreto Reforçado Continuamente
CRF	Consumo de Resistência à Fadiga
DNIT	Departamento de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
FSC	Fator de Segurança de Carga
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
HRB	<i>Highway Research Board</i>
HVAG	<i>Heavy Vehicle Axle Groups</i>
ISC	Índice de Suporte Califórnia
JRCP	Pavimento de concreto reforçado com juntas
kgf/cm ²	Quilograma-força por centímetro quadrado
kgf/cm ² /cm	Quilograma-força por centímetro quadrado por centímetro
lb/in ³	Libras por polegadas cúbicas
LMC	<i>Lean-mix concrete</i>
LSF	Fator de Segurança de Carga
m	Metro

m ²	Metro quadrado
MC	Modelo Conceitual
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEC	Método dos Elementos de Contorno
MEF	Método dos Elementos Finitos
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
MPa/m	Mega Pascal por metro
MPR	Manual de Pavimentos Rígidos
MVF	Método dos Volumes Finitos
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
PCA	<i>Portland Cement Association</i>
PCP	Pavimento de concreto simples (não reforçado) com juntas
QADT	Quad-eixo com pneus duplos
RT	Razão entre a tensão de tração no concreto e sua resistência à tração na flexão
s	Segundo
SADT	Eixo simples com pneus duplos
SAST	Eixo simples com pneus simples
SFCP	Pavimento de concreto reforçado com fibras de aço
SI	Sistema Internacional de Unidades
S-N	Curva S (<i>stress</i> = tensão) e N (<i>Number of cycles</i> = número de ciclos)
TADT	Eixo duplo com pneus duplos
TAST	Eixo em tandem com pneus simples
tf	Tonelada força
TRDT	Tri-eixo com pneus duplos

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	Função objetivo associado ao custo do pavimento
D	Módulo de Rigidez à flexão da placa
E	Módulo de Young
ϵ	Deformação de engenharia ou lagrangiana
f_c	Resistência do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{ct}	Resistência do concreto à tração direta
f_{ctk}	Resistência característica do concreto à tração direta
$f_{ct,sp}$	Resistência do concreto à tração por compressão diametral
$f_{ct,f}$	Resistência do concreto à tração na flexão
$f_{ctk,f}$	Resistência característica do concreto à tração na flexão
f_{cf}	Resistência característica do concreto à tração na flexão
h	Espessura da placa de concreto
N_{DT}	Número total de Grupos de Eixo de Veículos Pesados durante o Período de Projeto
ω	Deflexão causada por uma carga distribuída
μ	Coefficiente de Poisson do concreto

RESUMO

O projeto de pavimento rígido simples proposto pela *Portland Cement Association* (PCA), em 1984, definidos os parâmetros de dimensionamento, envolve assumir uma espessura inicial da placa e em seguida usar uma série de tabelas e ábacos para verificar os dois critérios que governam o projeto: a fadiga à flexão da placa de concreto e a erosão do subleito/sub-base. Faz-se necessário que cada um desses critérios seja inferior e próximo a 100%, de forma a obter projetos seguros e econômicos, respectivamente. Caso um desses critérios ultrapasse os 100% prescritos, deve-se repetir o cálculo para uma espessura maior ou, alternativamente, manipular determinados parâmetros de projeto. Nesta perspectiva, o foco deste trabalho surgiu da hipótese de que o ajuste combinado da espessura da placa com a resistência à tração na flexão do concreto (f_{cf}) pode ser a solução mais econômica para o projeto, sem desconsiderar a segurança estrutural. Nasce, então, a concepção de um algoritmo computacional capaz de otimizar o projeto da placa de pavimentos rígidos simples, buscando combinar espessura e f_{cf} capazes de minimizar o custo do projeto. Em um primeiro momento isto culminou no surgimento de um Modelo Conceitual, por meio de elementos finitos, definindo-se a função objetivo custo do metro quadrado de placa de pavimentos rígidos simples (C_p), em função da espessura e do f_{cf} otimizados, mas sem considerar fenômenos de ruptura (fadiga e erosão). Em seguida, os estudos e as pesquisas que nortearam este trabalho demonstraram, finalmente, a possibilidade de se elaborar um algoritmo computacional, contemplando tais fenômenos, à luz da ideia original. É proposto um algoritmo para a otimização do projeto da placa de pavimentos rígido simples, adotando-se a função objetivo do Modelo Conceitual. Para este propósito, optou-se por usar o guia da AUSTROADS (2010), que é baseado no método PCA de 1984, e que reúne todas as equações necessárias à implementação computacional. Uma análise, com parecer conclusivo, dos efeitos no projeto otimizado quanto ao comportamento dos parâmetros envolvidos no dimensionamento, é realizada. Confirma-se a tese proposta de que o ajuste combinado da espessura da placa com a resistência possibilita a definição de projetos mais otimizados frente àqueles em que se permite o ajuste apenas na espessura da placa.

Palavras-Chave: Pavimento de concreto. Pavimento rígido. Projeto otimizado.

ABSTRACT

The plain rigid pavement design proposed by the Portland Cement Association (PCA) in 1984, defined the model parameters, involves assuming an initial thickness of the slab and then using a series of tables and abacuses to verify the two criteria that govern the design: the flexural fatigue of the concrete slab and the erosion of the subgrade/subbase. It is necessary that each of these criteria be lower and close to 100%, to obtain safe and economical designs, respectively. If one of these criteria exceeds the prescribed 100%, the calculation must be repeated for a greater thickness or manipulate certain model parameters. In this perspective, the focus of this work was the hypothesis that the combined adjustment of the plate thickness with the tensile strength in the concrete bending (f_{cf}) may be the most economical solution for the design, as opposed to increasing the thickness, without disregarding structural safety. The design of a computational algorithm was developed to optimize the design of the rigid single deck board, seeking to combine thickness and f_{cf} capable of minimizing the cost of the design. At first, this culminated in the emergence of a conceptual model, by finite elements, defining the objective function cost of the square meter of plain rigid pavement plate (C_p), as a function of thickness and f_{cf} optimized, but without consider phenomena of rupture (fatigue and erosion). Then, the studies and research that guided this work finally demonstrated the possibility of elaborating a computational algorithm, contemplating such phenomena, in the light of the original idea. It is proposed an algorithm for the optimization of the design of the plain rigid pavement, adopting the objective function of the conceptual model. For this purpose, we chose to use the AUSTROADS (2010) guide, which is based on the 1984 PCA method, and which brings together all the equations necessary for computational implementation. An analysis, with a conclusive opinion of the effects on the optimized design regarding the behavior of the parameters involved in the design, is performed. It is confirmed the thesis proposal that the combined adjustment of the thickness of the plate with the resistance allows the definition of designs more optimized against those in which the adjustment is allowed only in the thickness of the plate.

Keywords: Concrete pavement. Rigid pavement. Optimized design.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Considerações iniciais	17
1.2	Objeto do estudo	19
1.3	Justificativa	22
1.4	Objetivos	23
1.4.1	Objetivo geral	23
1.4.2	Objetivos específicos	24
1.5	Estrutura do trabalho	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	Otimização	26
2.2	Método dos elementos finitos.....	27
2.3	Fadiga.....	32
2.4	Pavimento rodoviário	33
2.4.1	Pavimentos rígidos.....	35
2.5	Métodos computacionais e modelos de otimização em projeto de pavimentos	52
3	PROJETO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RÍGIDOS SIMPLES	59
3.1	Método PCA de 1984	59
3.1.1	Metodologia.....	60
3.1.2	Projeto de espessura do pavimento rígido simples	83
3.2	AUSTROADS de 2010	91
3.2.1	Considerações iniciais.....	92
3.2.2	Pavimentos rígidos.....	92
3.2.3	Fatores utilizados na determinação da espessura	93
4	DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS SIMPLES	106
4.1	Modelo Conceitual (MC)	106
4.1.1	Concepção do modelo estrutural	107
4.1.2	Função objetivo	108
4.1.3	Restrições	108
4.1.4	Algoritmo Modelo Conceitual (MC)	110
4.2	Otimização do AUSTROADS de 2010 – <i>austroads</i>	118

5	EXEMPLOS DE OTIMIZAÇÃO DE PROJETO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS SIMPLES VIA <i>AUSTROADS</i>.....	124
5.1	Primeiro Exemplo	124
5.2	Segundo Exemplo.....	127
5.2.1	Cenários.....	128
5.3	Terceiro Exemplo.....	141
5.3.1	Testes	142
6	CONCLUSÕES.....	160
	REFERÊNCIAS.....	164
	APÊNDICES	168
	ANEXOS	204

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Informações obtidas pela Pesquisa CNT de Rodovias (CNT, 2016) culminaram no mais completo acervo sobre as condições das rodovias brasileiras, ultrapassando 100 mil quilômetros avaliados.

Nas duas últimas décadas, pesquisas da aludida Confederação vêm oferecendo um criterioso levantamento da qualidade do estado geral daquelas rodovias, cuja avaliação considera as condições do pavimento, da sinalização e da geometria da via de toda a malha federal e dos principais trechos estaduais pavimentados (CNT, 2016).

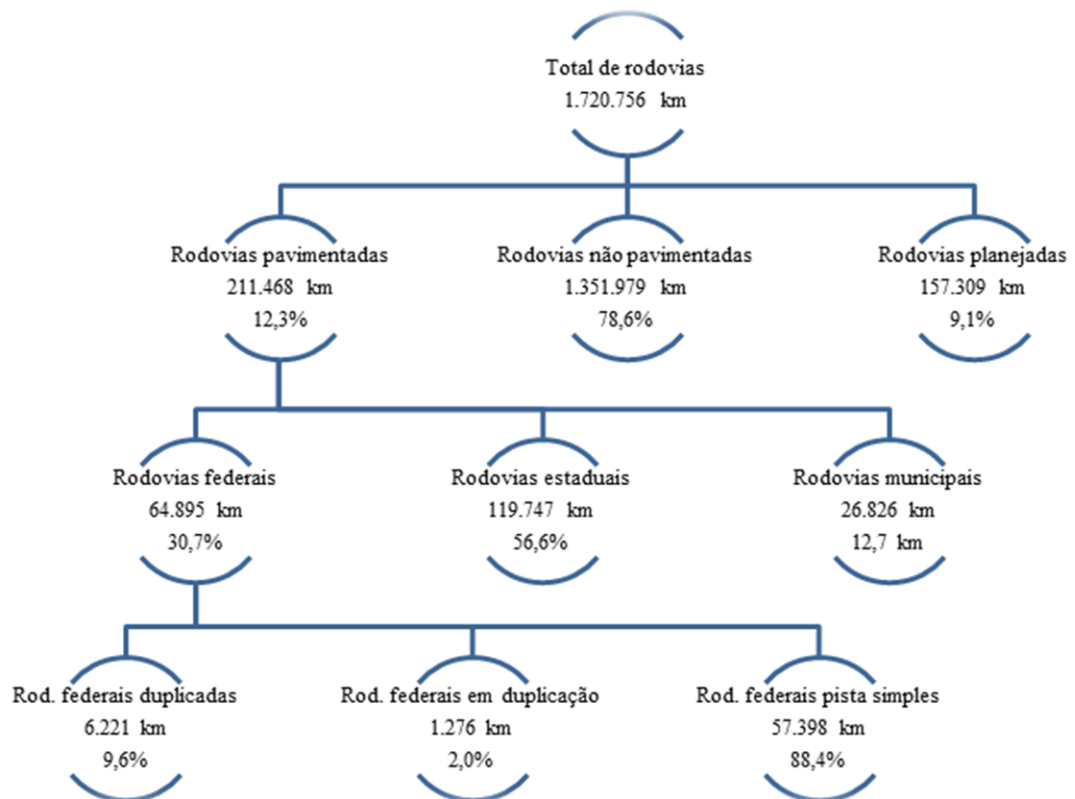
Tais pesquisas revelam a necessidade de se priorizar o setor. Nos últimos vinte anos os investimentos destinados à área mostraram-se insuficientes para assegurar qualidade em larga escala. Constatou-se a expressiva diferença entre rodovias concessionadas, que dispõem de estrutura satisfatória, e as públicas, com desconformidades estruturais que impactam diretamente no custo operacional dos veículos e oferecem mais riscos aos usuários.

A densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil é demasiadamente pequena, considerando a de outros países de dimensão territorial semelhante. São cerca de 25 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km² de área, correspondendo a apenas 12,3% da extensão rodoviária nacional (vide Figura 1). Os Estados Unidos apresentam 438,1 km por 1.000 km² de área; China, 359,9 km e Rússia, 54,3 km (CNT, 2016).

No que toca as regiões geográficas brasileiras, o Nordeste concentra o maior percentual de infraestrutura rodoviária com pavimento (30,8%), seguido do Sudeste (19,3%), do Sul (18,5%), do Centro-Oeste (17,6%) e do Norte (13,7%). Não obstante, a expansão da malha rodoviária pavimentada não cresceu no mesmo ritmo da frota de veículos. Na última década (de julho de 2006 a junho de 2016) a frota cresceu 110,4%, ao passo em que a extensão das rodovias federais, somente 11,7%.

Além desses problemas, dos 103.259 km analisados, 58,2% apresentam algum tipo de problema no estado geral. Em relação ao pavimento, 48,3% dos trechos avaliados receberam classificação regular, ruim ou péssimo; na sinalização, 51,7% das rodovias apresentaram algum tipo de deficiência e na variável geometria da via foram constadas falhas em 77,9% da extensão pesquisada. Com isso, o Brasil ocupa a 111^a posição no *ranking* de competitividade global do Fórum Econômico Mundial, no quesito qualidade da infraestrutura rodoviária.

Figura 1 – Extensão da malha rodoviária brasileira

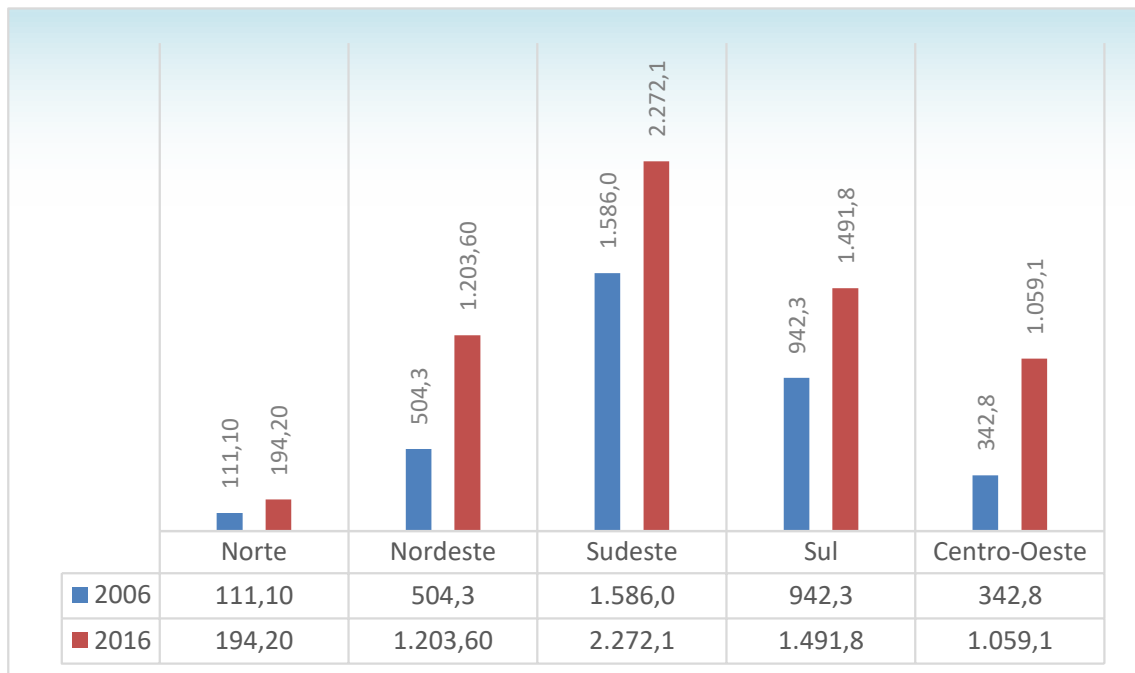


Fonte: adaptado de CNT (2016).

Apenas 9,6% das rodovias federais pavimentadas são duplicadas. E isto graças ao acréscimo de aproximadamente 78,4%, passando de 3.487 km, em 2006, para 6.221 km, 2016 (vide Figura 2). Pode-se observar, no gráfico, que a maior concentração desse tipo de rodovia encontra-se nas Regiões Sudeste e Sul do País. Há, portanto, uma considerável demanda de rodovias a serem duplicadas no Brasil.

Um dos registros mais antigos da utilização do concreto em pavimentação no Brasil são as Ruas de Pelotas/RS, de 1912. Uma década depois, a Rodovia Caminhos do Mar, inaugurada em 1925, em São Paulo, é a primeira da América do Sul e uma das primeiras do mundo (MASCHIO, 2012).

Figura 2 – Extensão de rodovias federais pavimentadas de pista dupla por região (km) - Brasil – 2016



Fonte: adaptado de CNT (2016).

Até início da década de 50, foi grande o uso de pavimentos de concreto no Brasil (vias urbanas, rodovias e aeroportos); porém, a partir desse período, houve um hiato na utilização desse tipo de pavimento, em função da carência de recursos humano e tecnológico, agravado pelo franco crescimento da indústria do asfalto em todo mundo. Mas, esse quadro começa a mudar com o ressurgimento dos pavimentos de concreto em diversos países desenvolvidos e com economia estável, culminando, no Brasil, com a retomada do pavimento rígido nas duplicações de rodovias federais (MASCHIO, 2012).

1.2 Objeto do estudo

O considerável acervo de conhecimento científico em estruturas granulares (solo) e o célere avanço tecnológico de maquinários pesados a partir de meados do século vinte (segunda Grande Guerra) culminaram em que hoje definimos rodovias confortáveis, seguras e econômicas, a respeito de estradas asfaltadas ou de concreto.

Pavimentos rígidos são aqueles constituídos de uma placa de concreto de cimento Portland, denominada base, simples ou armada, geralmente apoiada sobre uma camada que representa a sub-base, granular ou tratada, e que está diretamente assentada sobre o subleito.

O custo inicial da construção de pavimentos rígidos é relativamente maior do que o envolvido na construção de pavimentos flexíveis, mas o custo global, construção e manutenção de pavimentos flexíveis, supera os de pavimentos rígidos (HADI; ARFIADI, 2001). Segundo esses autores, uma pesquisa econômica sobre pavimento de concreto continuamente reforçado encomendada pela *Steel Reinforcement Institute of Australia*, SRIA, em 1996, comparou a viabilidade econômica de cinco tipos de pavimentos equivalentes construídos numa rodovia de 38 km com oito faixas, para uma vida útil de 40 anos e sobre subleito de 3% de CBR. O estudo constatou que, dentre os empreendimentos escolhidos, pavimento de concreto simples (PCP), pavimento de concreto continuamente reforçado (CRCP), pavimento asfáltico de profundidade total com uma sobreposição de asfalto (*full depth asphalt with an asphalt overlay*), pavimento asfáltico sobre base tratada com cimento, e pavimento asfáltico sobre base granular, o CRCP foi o que apresentou o menor custo total, incluindo a construção inicial e o custo de manutenção contínua.

Apesar das características muito diferentes dessas estradas do estudo citado por Hadi e Arfiadi (2001), estes afirmam serem elas equivalentes, o que significa dizer que todas foram projetadas sob as mesmas condições de suporte, tráfego, em função da vida útil, além das condições climáticas. Não detalharam, os autores, o custo por ano na manutenção de cada pavimento, mas isto não prejudica uma conclusão a esse respeito:

O relatório da DEICORP conclui que é mais barato construir pavimentos rígidos, que exigem menos manutenção e proporcionam períodos de vida mais longos. Esses pavimentos revelam-se mais econômicos a longo prazo. Esta vantagem econômica, juntamente com o fato de que os pavimentos rígidos são mais robustos, podem suportar cargas de tráfego mais elevadas.

Pavimentos rígidos simples, não armados, têm sido utilizados em todo o mundo, por várias décadas, e diferentes organizações de estradas desenvolveram métodos de projeto que se adequam à sua localização. Dentre os métodos documentados em vários livros didáticos, destacam-se: *Portland Cement Association (PCA)*, *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)* e *U.S. Army Corps of Engineers*.

Em meados da década do ano de 1980 a *Portland Cement Association (PCA)* lançou uma nova versão de método para o dimensionamento de pavimentos rígidos simples. Foram introduzidos os progressos e conhecimentos adquiridos nos últimos decênios no âmbito da engenharia estrutural (métodos numéricos), projeto geométrico, construção e gerência, acrescentando novos enfoques ao então consagrado método PCA de 1966, culminando no PCA de 1984 — adotado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura Rodoviária (DNIT), no Brasil — (DNIT, 2005).

O projeto de pavimentos rígidos simples baseado nos métodos da PCA, em especial a versão de 1984, consiste, basicamente, em se adotar uma espessura inicial da placa e, manuseando-se várias tabelas e ábacos trabalhosos, verificar se as restrições quanto aos danos por fadiga e erosão foram satisfeitas. Cada um desses critérios necessita ser inferior a 100% e, preferencialmente, próximo a este limite de forma a obter projetos seguros e econômicos, respectivamente. Caso um desses critérios ultrapasse os 100% prescritos deve-se repetir o cálculo para uma espessura maior ou, alternativamente, manipular determinados parâmetros de projeto.

O supracitado procedimento tem coerência porque, ao atingir a fase específica do cômputo da espessura da placa, pressupõe-se que os demais parâmetros essenciais ao projeto já estejam bem definidos e estudados pelo projetista. Por esta razão, apenas quando a espessura encontrada inviabiliza economicamente o projeto é que se deve proceder à análise estrutural mais detalhada.

No ano seguinte ao da criação da nova versão do PCA, os autores do PCA de 1984, Packard e Tayabji (1985), apresentaram suas equações que deram origem aos famosos ábacos das repetições admissíveis de carga, baseadas nos fenômenos de fadiga e de erosão. Em consequência das pesquisas realizadas para a construção deste trabalho, revelaram-se o estudo de Rufino (1997) que apresentou as equações fundamentais do PCA de 1984 e a técnica desenvolvida por Hadi e Arfiadi (2001) para problemas de otimização estrutural do projeto de pavimento rígido, por meio de Algoritmo Genético (AG), tendo como base o *Pavement Design, a Guide to the Structural Design of Road Pavements*, da AUSTROADS de 1992 — organização máxima das agências australasianas de transporte rodoviário e de trânsito — que, segundo eles, é baseada nas recomendações do método PCA de 1984 para pavimentos rígidos simples.

Também baseada no PCA de 1984, em 2010, a AUSTROADS reúne a tecnologia do pavimento numa só publicação eletrônica intitulada: *Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design*, fruto do grande conhecimento acumulado sobre tecnologias, técnicas e considerações de autoridades rodoviárias estaduais, governo local e indústrias. O Capítulo 9 (*Design of Rigid Pavements*) dessa versão se dedica ao projeto de pavimentos rígidos simples, cuja sequência de análise é a adotada neste trabalho e doravante denominada de AUSTROADS de 2010.

1.3 Justificativa

A retomada do pavimento rígido nas rodovias federais, em especial nas duplicações, em 2003, fomentada pelo investimento da indústria brasileira de cimento em tecnologia, maquinários e capacitação de pessoal, dá sinais de um futuro promissor para o pavimento de concreto.

Não obstante, a experiência tem mostrado que empreendimentos da magnitude dos pavimentos rígidos são bastante onerosos ao erário de uma nação devido ao grande volume de concreto envolvido. Nota-se que, por um cálculo expedito (Preço Base de 2010), a redução de apenas 1,0 cm na altura da laje de concreto de uma rodovia com 45 km de extensão e 11,20 m de largura, pode corresponder ao custo para construção de cerca de cinquenta casas populares.

Reitera-se que o projeto de pavimentos rígidos simples, de acordo com o método PCA de 1984, é um processo iterativo no qual a análise estrutural inicia-se a partir de uma estimativa da espessura. Essa espessura deve ser majorada caso não satisfaça às supracitadas restrições prescritas para os fenômenos de fadiga e de erosão, ou, alternativamente, manipular valores de parâmetros específicos, como: a resistência característica do concreto à tração na flexão (f_{cf}), o módulo de reação do subleito e as condições de contorno (a existência ou não de acostamento ou de barras de transferência de cargas).

Em outras palavras, os métodos de projeto iterativos convidam o usuário a efetuar várias iterações para obter uma solução que satisfaça os requisitos de projeto. De acordo com Hadi e Arfiadi (2001):

Devido ao longo processo de projeto, a maioria dos projetistas pararia após duas ou três iterações, produzindo projetos que são seguros, mas não necessariamente econômicos. Este dimensionamento, que vem com um custo mais elevado como uma penalidade, compromete a viabilidade de se usar pavimentos rígidos e reduz a sua eficácia como uma alternativa viável para a construção de pavimentos rodoviários.

Ora, com a popularização do computador, o uso de ábacos e tabelas para cálculos iterativos como os requeridos por tais métodos tornou-se obsoleto ou mesmo ineficaz diante da conjuntura tecnológica na qual as engenharias estão inseridas. Para acompanhar as demandas de um mercado cada vez mais competitivo, os métodos de projeto devem ser céleres e precisos, capazes de atender aos anseios da sociedade.

Mas, pelo fato de ser uma tarefa usualmente manual — o programa computacional da própria PCA, PCAPAV, para este método (RUFINO, 1997) não é uma ferramenta acessível aos projetistas e até o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT de 2005 faz uso de ábacos e tabelas não citando tal programa (esse assunto será abordado na Seção 2.5) —, tal procedimento, torna-se enfadonho o projeto de pavimentos rígidos simples. Isto inviabiliza uma análise estrutural

mais criteriosa, na qual se averigüe a influência, no projeto, das possíveis combinações de valores dos parâmetros de entrada e das condições de contorno da placa.

Eis que a principal questão que motivou este trabalho foi exatamente o procedimento recomendado pelos métodos da PCA (1966 e 1984), de se aumentar, prioritariamente, a espessura da placa, caso as restrições para a fadiga e erosão não tenham sido satisfeitas, ressalvadas as demais alternativas já citadas. Tal procedimento, em que pese estar correto fisicamente, pode induzir o projetista a manipular apenas a espessura da placa de concreto, restringindo, assim, a análise estrutural.

Nesta perspectiva, há uma gama de combinações admissíveis entre os parâmetros de entrada e que devem ser consideradas em uma análise estrutural eficiente. Porém, assume-se neste trabalho a hipótese de que o aumento da resistência à tração na flexão do concreto (f_{cf}), em oposição à prioridade preconizada pelos supracitados métodos da PCA, pode ser a solução mais econômica para o projeto, observando-se a segurança e sem negligenciar a influência dos demais parâmetros de entrada no projeto e que serão analisadas neste trabalho.

Todo estudo que resultou na presente dissertação coincidiu com tópicos relacionados à otimização, já que a análise estrutural do pavimento passou a sofrer influências não apenas da espessura, mas também do custo do f_{cf} do concreto, além de sua magnitude. Conceberam-se, portanto, algoritmos computacionais para a implementação de problemas de otimização, sem auxílio de ábacos ou tabelas, com fórmulas matemáticas específicas. Desta feita, tal método, antes trabalhoso, doravante proverá uma análise estrutural ampla e precisa, na qual se busque averiguar os parâmetros prescritos otimizados da placa que atendam, simultaneamente, aos quesitos técnico e econômico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Este trabalho objetiva confirmar que é possível projetar pavimentos rígidos simples com um máximo em segurança e um mínimo em custo, simultaneamente, em função de parâmetros específicos como a espessura da placa e o f_{cf} do concreto em função de seu custo, cujas magnitudes conduzem o problema à solução otimizada, respeitadas as restrições de projeto quanto aos fenômenos de fadiga e de erosão. Em outras palavras, comprovar a relevância da automação e a eficácia da otimização do AUSTROADS de 2010, baseado nas recomendações

do PCA de 1984, para projeto de pavimentos rígidos simples, através de algoritmos computacionais propostos e desenvolvidos na plataforma MATLAB.

1.4.2 Objetivos específicos

Conforme dito anteriormente, o objeto deste trabalho originou-se da tese de que o aumento da resistência à tração na flexão do concreto (f_{cf}), em oposição ao preconizado pelos supracitados métodos, que recomendam majorar a espessura em caso de não satisfeitas as restrições de projeto quanto à fadiga e à erosão, pode ser a solução mais econômica para o projeto, observando-se a segurança.

A partir daí, nasce a ideia de conceber um algoritmo computacional capaz de otimizar o projeto da placa de pavimentos rígidos simples, buscando sua menor altura, sem detrimento dos fatores segurança e economia. Mas, na primeira fase dos estudos, isto culminou no surgimento de um Modelo Conceitual (MC), por meio de elementos finitos, regido por um problema de otimização de minimização da função objetivo custo do metro quadrado de placa de pavimentos rígidos simples (C_p), sem considerar fenômenos de ruína do pavimento (fadiga e erosão). Finalmente, conforme as pesquisas foram avançando, implementa-se um algoritmo computacional, contemplando tais fenômenos, facilitando, sobremaneira, o trabalho de projetistas. Diante de todo exposto, este trabalho possui dois objetivos específicos, a saber:

- Desenvolver a rotina de um Modelo Conceitual (MC) para problema de otimização de minimização, para análises de pavimentos rígidos simples, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), na plataforma MATLAB, sem contemplar fenômenos de ruína (fadiga e erosão);
 - Definir uma função objetivo custo do metro quadrado de placa de pavimentos rígidos simples (C_p);
 - Determinar as variáveis otimizadas de projeto: altura da placa (h) e a resistência característica (f_{cf}) do concreto à tração na flexão aos 28 dias;
- Desenvolver a rotina de um algoritmo computacional desenvolvido na plataforma MATLAB, para a otimização do AUSTROADS de 2010, que é baseado no PCA de 1984, corroborando o Modelo Conceitual (MC) de otimização estrutural.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em 6 (seis) capítulos:

1º Capítulo (Introdução): expõem-se as considerações iniciais, o objeto de estudo, a justificativa e os objetivos geral e específicos;

2º Capítulo (Revisão Bibliográfica): embasa o leitor acerca de temas que serão abordados no transcorrer desta dissertação e o estado da arte no âmbito da otimização de gerência e de projeto;

3º Capítulo: aborda, resumidamente, os métodos PCA de 1984, no qual todo presente estudo está fundamentado, e AUSTROADS de 2010;

4º Capítulo: dedica-se ao dimensionamento otimizado de pavimento rígido, e está dividido em duas seções: a primeira apresenta o Modelo Conceitual de otimização estrutural que inspira o objeto deste trabalho; a segunda, foca-se na otimização e automatização do AUSTROADS de 2010;

5º Capítulo: está reservado a três exemplos de otimização de projetos de pavimentos rígidos simples via algoritmo *austroads*: o primeiro exemplo destina-se à verificação da acurácia do algoritmo em projeto corrente de pavimentos rígidos simples, exceto otimização, o segundo, à verificação do processo de otimização via *austroads*, e o terceiro dedica-se à análise paramétrica dos parâmetros do projeto otimizado;

6º Capítulo destina-se às considerações finais;

Referências bibliográficas: conteúdo didático que estruturam este trabalho;

APÊNDICES: tabela e figuras produzidas pelo autor; e

ANEXOS: reúnem os quadros e ábacos inerentes aos métodos aqui referidos, bem como as informações originais dos exemplos utilizados como modelo para a otimização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Reuniu-se neste capítulo o teor essencial ao arcabouço teórico do tema abordado neste estudo.

2.1 Otimização

De acordo com Hadi e Arfiadi (2001), a otimização é um ramo da pesquisa operacional (PO) desenvolvido e progredido durante a segunda guerra mundial para várias aplicações militares. Segundo eles, depois da guerra métodos de pesquisa operacional e, em particular, de otimização estão sendo cada vez mais aplicados para resolver problemas de engenharia.

O avanço tecnológico na ciência computacional favoreceu o aperfeiçoamento de métodos de projeto geométrico e de análise estrutural, e a otimização lhes confere aumento de desempenho e diminuição de custos, garantindo, portanto, os requisitos de segurança imprescindíveis.

Nesta perspectiva, Vanderplaats (1984 *apud* MAIA, 2009) proferiu que a “otimização é a busca da melhor solução para uma operação, enquanto certas restrições são satisfeitas [...]”, sendo que essa teoria é a bússola do presente estudo.

Em matemática, o termo otimização, ou programação matemática, refere-se ao estudo de problemas em que se busca minimizar ou maximizar uma função através da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto viável.

Em problemas de engenharia, ou de outras ciências, quando se concebe modelos matemáticos significativos do sistema em estudo, é possível aplicar as técnicas matemáticas de otimização para maximizar ou minimizar uma função objetivo, visando encontrar uma solução ótima do problema, que resulte no melhor desempenho possível do sistema, segundo critério de desempenho previamente definido.

O presente estudo abordará a implementação do algoritmo *austroads* (Capítulo 4) desenvolvido na plataforma MATLAB para problema de otimização de minimização de uma função objetivo *Custo* do metro quadrado de placa de pavimentos rígidos simples.

O programa MATLAB possui uma função denominada *fmincon* que encontra um mínimo restritivo de uma função de várias variáveis a partir de uma estimativa inicial. Isso geralmente é referido como otimização não linear restrita ou programação não linear. *fmincon* encontra um mínimo restritivo de uma função de várias variáveis, a saber:

$X = FMINCON (FUN, X0, A, B, Aeq, Beq, LB, UB, NONLCON, OPTIONS)$ minimiza, com os parâmetros de otimização padrão substituídos por valores em *OPTIONS*, um argumento criado com a função *OPTIMOPTIONS*.

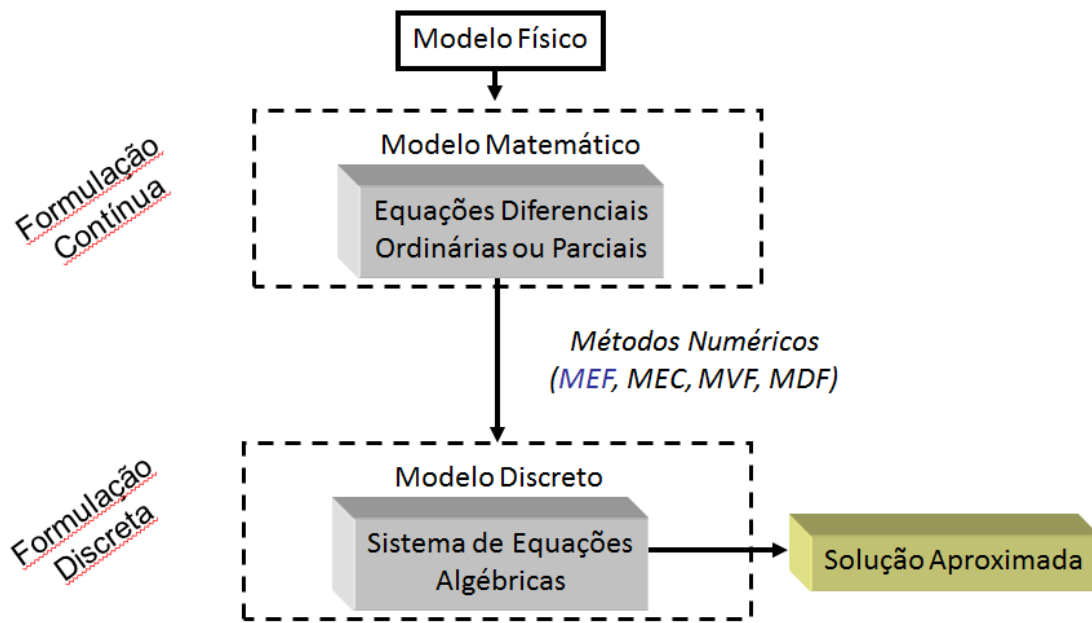
A título de exemplo, note-se na linha 44 do APÊNDICE E o uso da *FMINCON* no algoritmo *austroads*. Dada a importância do assunto, este será abordado com maiores detalhes na Capítulo 4, quando da explicação do funcionamento do algoritmo *austroads*.

2.2 Método dos elementos finitos

Ao se deparar com problemas de engenharia cuja solução analítica é desconhecida ou de difícil obtenção, o projetista é encorajado a fazer uso de métodos numéricos como, por exemplo, elementos finitos (MEF), elementos de contorno, volumes finitos, etc., cujo processo de solução consiste na transformação do modelo matemático que rege um fenômeno físico qualquer em modelo discreto, originando, assim, uma solução aproximada do problema (vide Figura 3).

Através desses métodos, o modelo matemático, caracterizado pela peculiar formulação contínua e pelas equações diferenciais ordinárias ou parciais, transforma-se numa formulação discreta.

Figura 3 – Processo de solução por métodos numéricos



Fonte: Lira (2016).

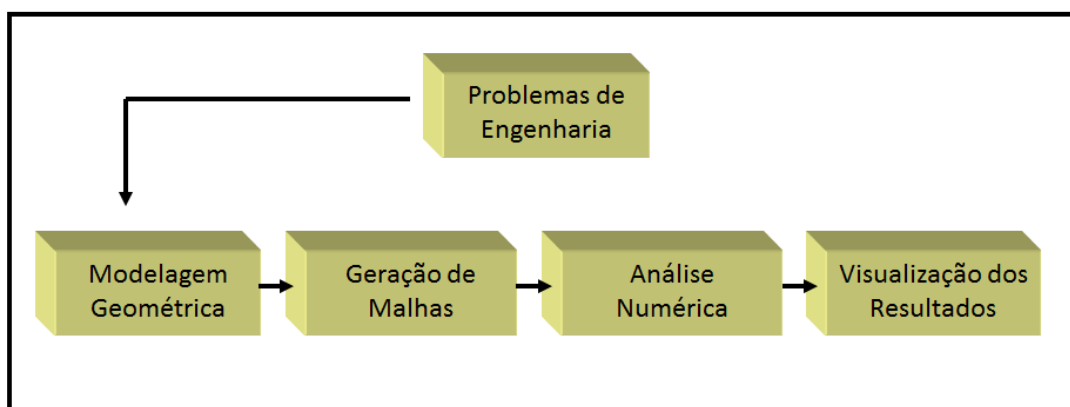
“Do ponto de vista da engenharia, o MEF é um método para resolver problemas de engenharia tais como, análise de tensões, transferência de calor, escoamento de fluidos e eletromagnetismo, por simulações de computador” (FISH; BELYTSCHKO, 2009).

Simulando quaisquer configurações geométricas e propriedades dos componentes estruturais, o MEF teve um franco crescimento com os avanços tecnológicos no campo da computação, envolvendo uma gama de problemas de engenharia e de outras áreas do conhecimento. O método tem a característica de aproximar a solução da equação diferencial que rege o problema físico, utilizando valores das variáveis básicas do problema associados a pontos internos e de contorno do domínio em análise.

No âmbito da Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações externas (AZEVEDO, 2003).

Utilizando-se o MEF, uma vez definido o domínio real do modelo físico, inicia-se a etapa de pré-processamento que consiste na subdivisão do domínio do problema em elementos finitos (malha), observando-se as condições de contorno e condições iniciais do problema. O processamento da solução então se dará: pela formulação dos elementos por meio do desenvolvimento de suas equações, pela montagem do sistema global de equações a partir das equações individuais dos elementos, e pela resolução das equações. O pós-processamento, por sua vez, caracteriza-se pela determinação de valores de interesse, como, por exemplo, tensões e deformações e a obtenção da visualização das respostas (vide Figura 4) (FISH; BELYTSCHKO, 2009).

Figura 4 – Método dos elementos finitos (MEF): Etapas da solução



Fonte: Lira (2016).

Fundamentos do MEF

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir a integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais estendidas a subdomínios de geometria simples (de volume V_i). Seja a integral de volume de uma função f (AZEVEDO, 2003, p. 4-5):

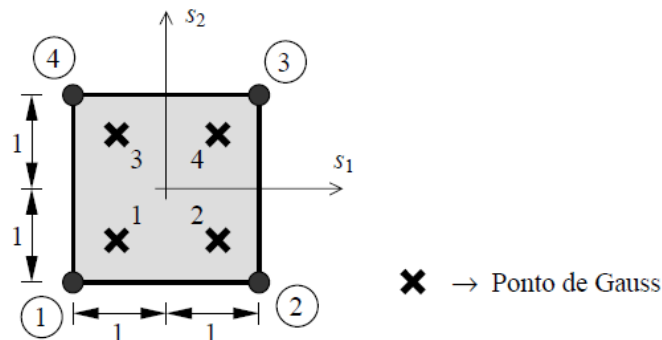
$$\int_V f dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f dV \quad (1)$$

Em (1), pressupõe-se que

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

Se for possível calcular todas as integrais estendidas aos subdomínios V_i , basta efetuar o somatório correspondente ao segundo membro de (1) para se obter a integral estendida a todo o domínio. Cada subdomínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples, isto é, segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo (exemplo, vide Figura 5).

Figura 5 – Elemento finito quadrilátero com 4 nós - localização dos quatro pontos de Gauss no sistema de coordenadas (s1, s2)



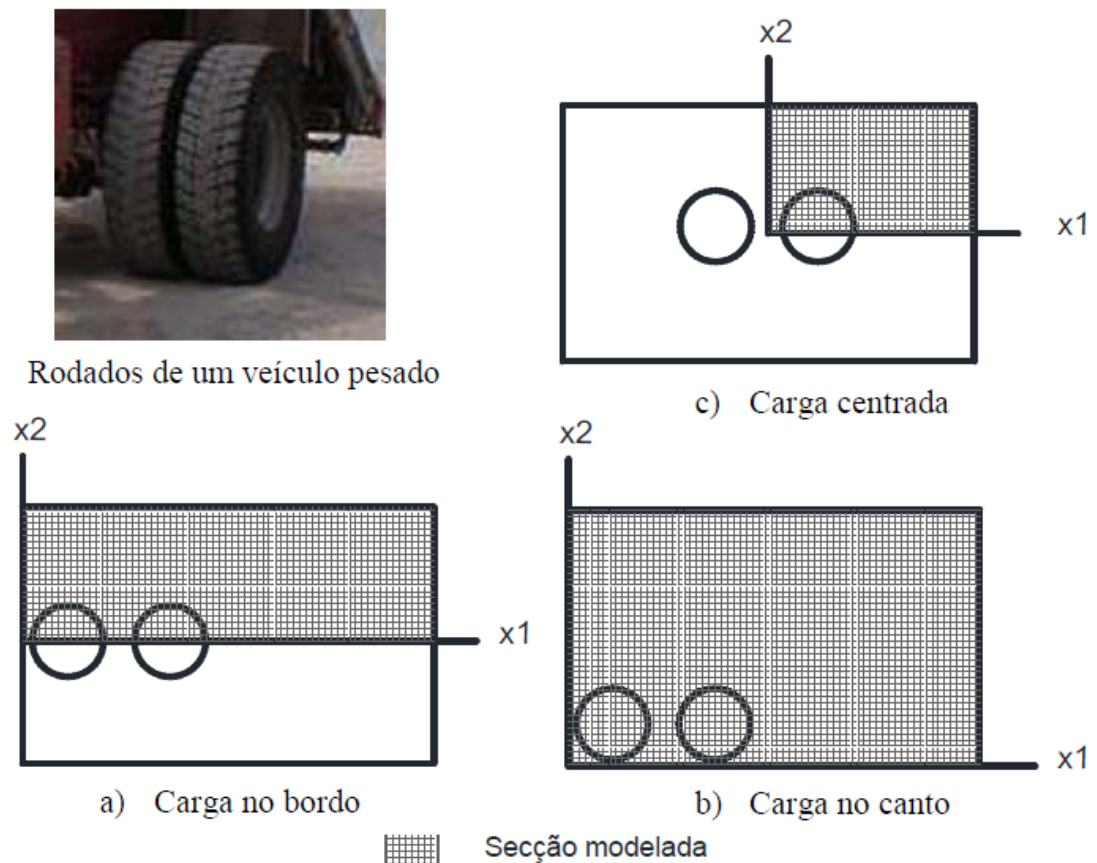
Fonte: Azevedo (2003).

Exemplo de aplicação do MEF

A análise estrutural por meio do MEF em pavimento rígido simples pode ser explicada pelo trabalho de Raposo et al. (2012). Eles propuseram estabelecer uma analogia entre o Método dos Elementos Finitos (MEF) e a teoria da elasticidade, normalmente utilizada na análise das tipologias de pavimentos flexíveis e semirrígidos, objetivando validar os resultados originários da aplicação do MEF ao estudo das variáveis determinantes no dimensionamento de pavimentos rígidos.

A versatilidade do MEF permite, portanto, reproduzir todas as diferentes condições de utilização de pavimentos para as quais a teoria da elasticidade clássica não é exequível, em particular para as configurações de carga (b) e (c) representadas na Figura 6 (RAPOSO et al., 2012).

Figura 6 – Configuração da rodagem de um veículo pesado, impressão do rasto nas possíveis configurações de carregamento e respectiva modelagem

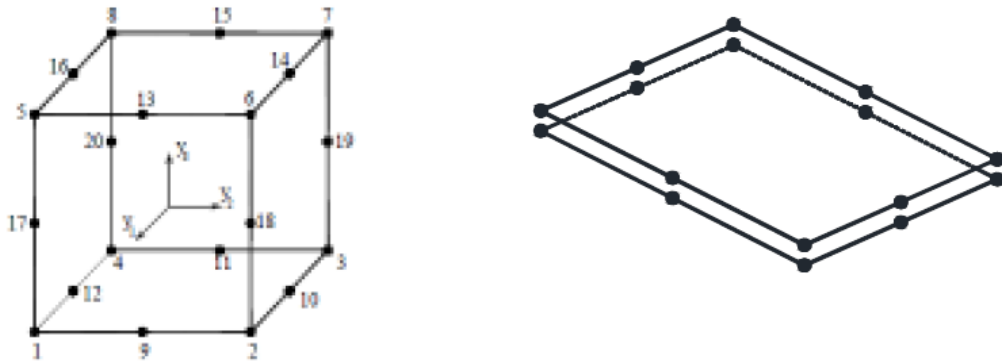


Fonte: Raposo et al. (2012).

Raposo et al. (2012), levando em consideração a diversidade de classes de veículos pesados da região (Portugal), para simplificar, selecionam o eixo padrão de 130 kN para representar a solicitação do pavimento por parte dos veículos circulantes.

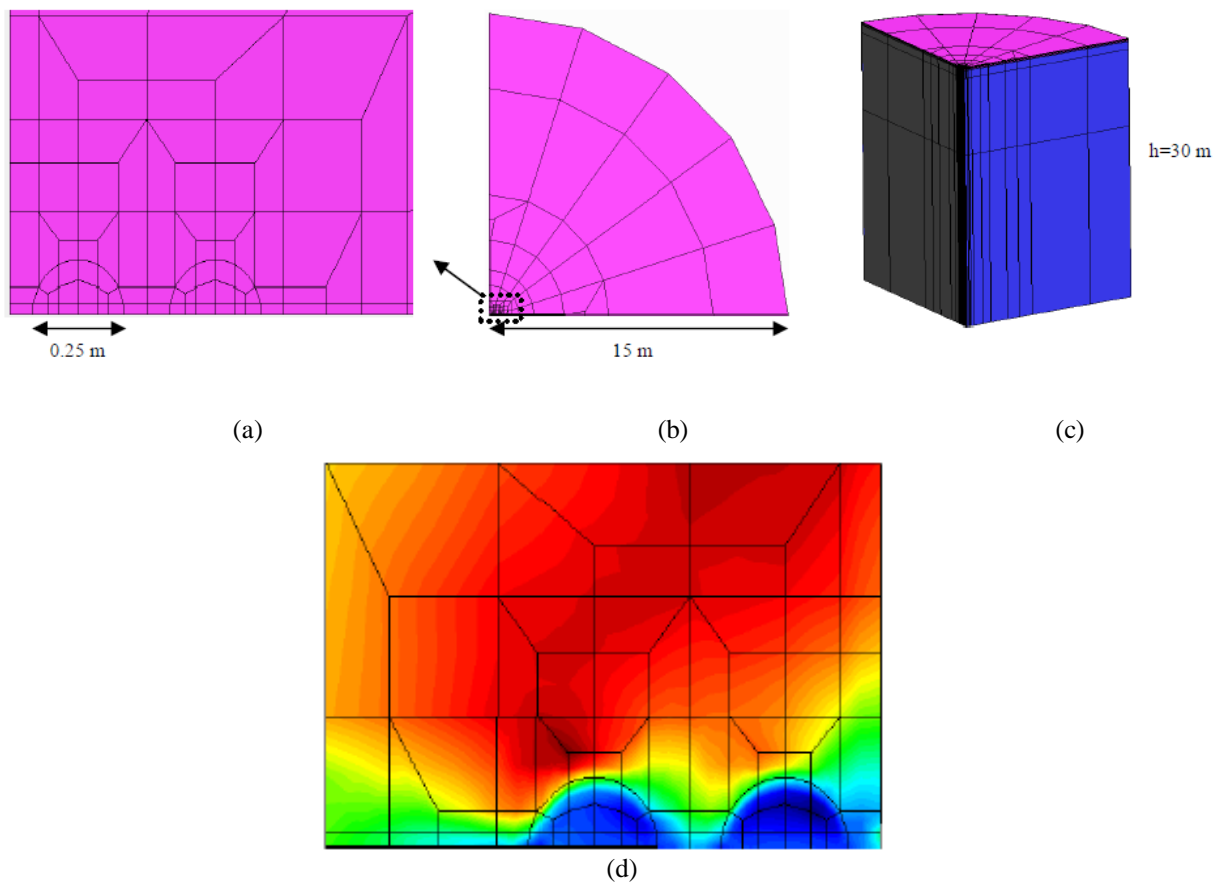
O modelo foi concebido com a utilização de elementos finitos isoparamétricos do segundo grau com 20 pontos nodais (Figura 7); a discretização é de malha fina na área carregada, e com progressão crescente do afastamento entre elementos do centro para a periferia. Para obter com rigor as condições de fronteira do semi-espaco, o modelo conta com uma distância às faces dos elementos finitos com pontos nodais de graus de liberdade restringidos igual a 15 metros em planta e a 30 metros em profundidade (vide Figura 8).

Figura 7 – Elementos finitos tridimensionais e correspondentes elementos de junta



Fonte: Raposo et al. (2012).

Figura 8 – Modelo de elementos finitos do pavimento e da fundação (comportamento do semi-espço). Em (a) planta da discretização de malha fina na área carregada; em (b) planta da progressão crescente do afastamento entre elementos do centro para a periferia; em (c) corte do modelo e em (d) tensão principal à superfície do pavimento



Fonte: Raposo et al. (2012).

2.3 Fadiga

Grande parte das falhas que ocorrem em estruturais ou em máquinas é devida a cargas que variam no tempo. Tais falhas caracterizam-se por ocorrer a níveis de tensão expressivamente inferiores aos valores da resistência de ruptura do material (ABRAHÃO et al., 2008).

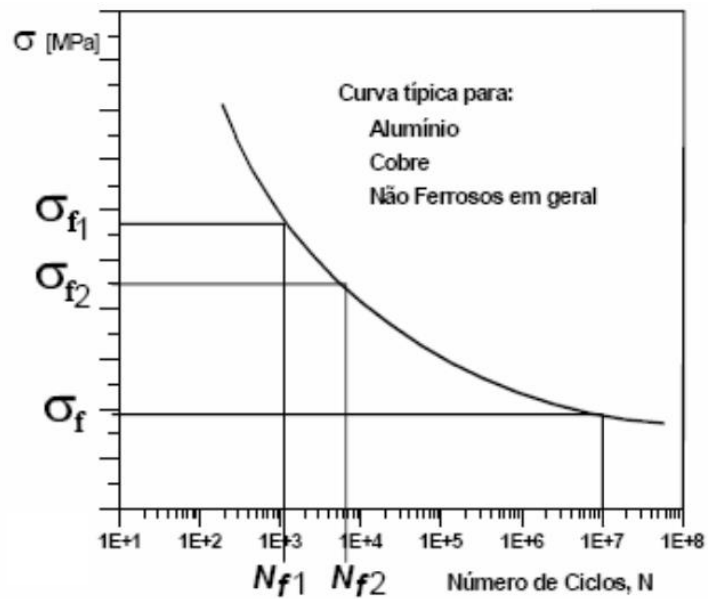
De acordo com Branco, Fernandes e Castro (1999 *apud* ABRAHÃO et al., 2008), fadiga é “o fenômeno da rotura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação”. O DNIT (2005) corrobora tal definição ao afirmar que:

Ciclos de tensão com muita frequência podem romper determinada estrutura após certo número de repetição de cargas, ainda que a tensão máxima produzida por elas seja inferior à resistência do material a este esforço, caracterizando o fenômeno da fadiga. Este conceito é aplicável a pavimentos rodoviários devido à natureza dinâmica dos carregamentos.

Os resultados do ensaio de fadiga geralmente são apresentados em uma curva tensão-número de ciclos, ou simplesmente curva S-N) (vide Figura 9). Tal curva também é conhecida como Curva de Wöhler, em homenagem ao engenheiro alemão August Wöhler (1819-1914), pioneiro na investigação científica sobre falha por fadiga em eixos de vagão ferroviário (ABRAHÃO et al., 2008). O ensaio de fadiga do concreto é realizado em máquinas similares a da ilustrada na Figura 10.

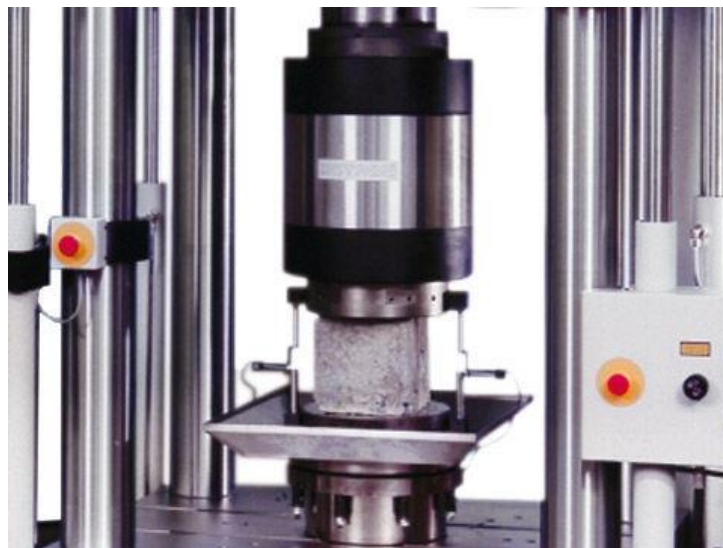
De acordo com esta ilustração, para uma solicitação de tensão σ_{f1} o corpo de prova se rompe em N_{f1} número de ciclos e para uma solicitação σ_{f2} , em N_{f2} , de modo que é possível traçar o diagrama S-N do ensaio de fadiga de um determinado material, utilizando-se uma gama significativa de exemplares. Note-se que, à medida em que se diminui a tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos, e a curva S-N tende a uma assíntota de um eixo paralelo ao eixo das abscissas. A partir deste ponto, o número de ciclos para o rompimento do corpo de prova torna-se praticamente infinito. Chama-se limite de fadiga ou resistência à fadiga a tensão mínima abaixo da qual não há fratura por fadiga.

Figura 9 – Curvas S-N ou curvas de Wöhler (exemplo metais não ferrosos em geral)



Fonte: modificado de Abrahão et al. (2008).

Figura 10 – Ensaio de fadiga do concreto realizado em máquina de quatro colunas



Fonte: Direct Industry (2017).

2.4 Pavimento rodoviário

A história do pavimento de concreto é contemporânea a do pavimento asfáltico (século XIX), próximo da invenção do automóvel. As tecnologias de construção, em todo mundo, foram fortemente influenciadas pela escola europeia. Do ponto de vista da tecnologia de projeto

e análise estrutural, com o fechamento e o isolamento do Leste Europeu, a escola americana foi quem ditou as regras sobre a matéria (BALBO, 2009).

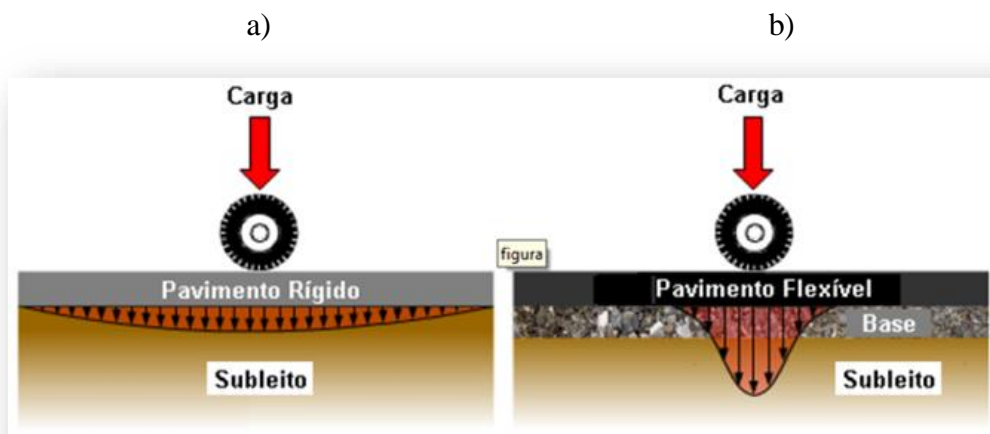
Pavimento rodoviário é uma estrutura em camadas construída sobre a terraplenagem e destinada, técnica e economicamente, a resistir aos esforços oriundos do tráfego e a melhorar as condições de rolamento.

Existem 3 (três) tipos de pavimento:

- Rígido: placas de concreto e sub-base granular ou quimicamente estabilizada;
- Semirrígido: camada asfáltica e base quimicamente estabilizada; e
- Flexível: camada asfáltica e base granulometricamente estabilizada.

Enquanto uma dada carga atuante sobre um pavimento flexível imprime um campo de tensões muito concentrado, em um pavimento rígido verifica-se um campo de tensões bem mais disperso, com os efeitos da carga distribuídos de maneira mais uniforme em toda a dimensão da placa (vide Figura 11).

**Figura 11 – Comparação de distribuição de carga entre pavimentos equivalentes:
a) Rígido: grande área de distribuição de carga e pequena pressão na fundação do pavimento;
b) Flexível: pequena área de distribuição de carga e grande pressão na fundação do pavimento**



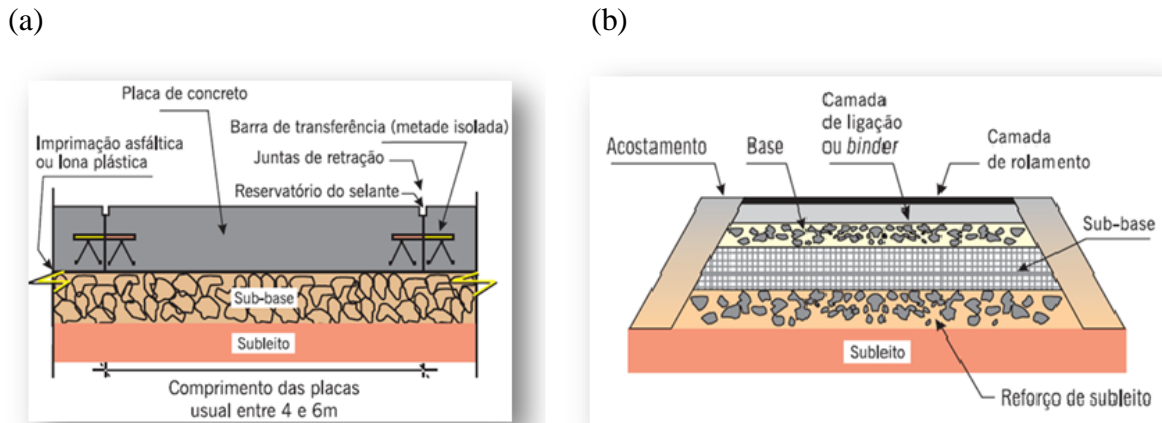
Fonte: FATEC-SP (2016).

Isto se deve à alta rigidez do sistema responsável por transmitir os esforços do tráfego ao subleito. Este sistema é constituído pela base (placa de concreto) e, geralmente, pela sub-base (granular ou quimicamente estabilizada), podendo ser apoiada diretamente no subleito, modelo originalmente concebido por Westergaard, segundo a literatura.

Hadi e Arfiadi (2001) têm nessa perspectiva a ideia de que a razão de uma camada intermediária, dotadas de propriedades materiais melhores do que as do subleito, é fornecer

uma plataforma de trabalho forte e que ajude na distribuição da carga veicular no subleito, quando aplicado na superfície da base (vide Figura 12).

Figura 12 – Vista em corte dos pavimentos rígido e flexível: a) Pavimento rígido em corte longitudinal e b) Pavimento flexível (ou semirrígido) em corte transversal



Fonte: Andrade (2017).

2.4.1 Pavimentos rígidos

Pavimentos rígidos são aqueles constituídos de uma placa (laje) de concreto de cimento Portland, denominada base, simples ou armada, geralmente apoiada sobre uma camada que representa a sub-base, granular ou tratada, e que está diretamente assentada sobre o subleito.

Por definição, as placas são elementos estruturais com superfície média plana, apresentando comprimento e largura grandes em relação à sua espessura e solicitadas predominantemente por cargas transversais (MARQUES, 2014).

A placa de concreto dos pavimentos rígidos simples moldados *in loco* são originariamente construídos de forma contínua, mas perdem essa propriedade em virtude das serragens das juntas transversais e longitudinais efetuadas assim que o concreto fica endurecido. Uma vez serrada, a placa se transforma em uma sequência de placas delimitadas por juntas, o que as tornam mais suscetíveis a danos por erosão e fadiga (BALBO, 2009).

O projeto geométrico de distribuição de placas visa eliminar a restrição à retração volumétrica do concreto (fissuras transversais), bem como o empenamento restringido devido ao gradiente térmico (fissuras longitudinais e transversais) (vide Figura 13).

Por essa razão, alguns tipos de pavimentos rígidos simples são dotados de um sistema artificial de transmissão de carga (barras de transferência de carga, BTC), formado por barras curtas de aço liso postadas na meia-seção das juntas transversais, cuja metade do comprimento

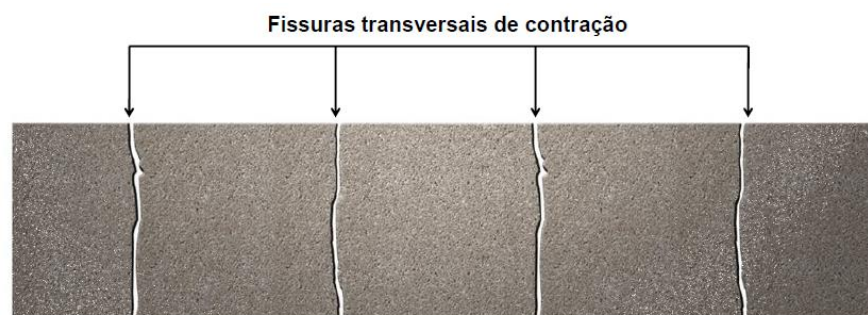
não é aderida ao concreto da placa subsequente. De acordo com Balbo (2009) a função das barras de transferência “[...] é a de transferir parte das cargas aplicadas sobre a placa, próximo à junta transversal, à placa subsequente, fazendo com que placas sucessivas trabalhem solidárias naquela região”.

Nas juntas longitudinais do pavimento rígido simples são dispostas as chamadas barras de ligação (BL), cuja função é evitar o deslocamento horizontal relativo entre placas lateralmente dispostas. Também é comum o uso de armadura de retração na forma de tela, posicionada acima da linha neutra, o que permite a execução de placas de maior comprimento. Tal armadura destina-se tão somente ao combate de esforços oriundos da tração, não tendo, portanto, função estrutural. Esse é denominado “pavimento de concreto simples continuamente reforçado”, que no Brasil é utilizado somente em pisos industriais.

Este estudo está centrado em pavimentos rígidos simples, ou seja, aqueles não estruturalmente armados; entretanto, por oportuno que é, nesta seção serão apresentados outros tipos de pavimentos rígidos, muito empregados no ramo rodoviário e industrial. É importante esclarecer, porém, a diferença entre pavimentos rígidos simples dotados de armadura distribuída, descontínua ou contínua, sem função estrutural, os chamados “reforçados”, e pavimento rígido estruturalmente armado.

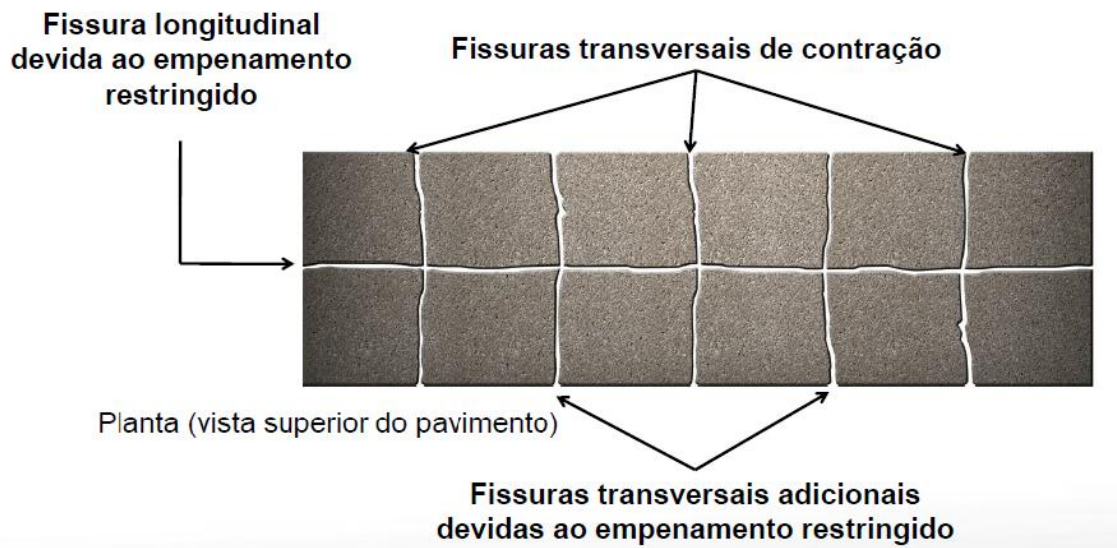
Figura 13 – Aspecto superficial característico ocasionado pela ausência de juntas transversais e longitudinais em pavimentos de concreto simples. Em (a) fissuras transversais de retração; em (b) fissuras transversais adicionais e longitudinais devidas ao empenamento térmico restringido

a)



Planta (vista superior do pavimento).

(b)



Fonte: ABCP (2017).

No Brasil, ao longo de muitos anos, as construções de pavimento rígido empregaram manta ou lona plástica (de polietileno) sobre a sub-base cimentada (brita graduada tratada com cimento – BGTC ou concreto compactado a rolo – CCR), como meio de evitar possíveis propagações de fissuras à placa. Nos EUA, prefere-se a aderência entre o concreto e a sub-base cimentada ou em CCR, sem o uso dessas mantas separadoras. Em algumas obras de pavimentação em concreto, em importantes rodovias, passou-se a aplicar emulsão asfáltica sobre a sub-base cimentada, para auxiliar na cura da sub-base, com conseqüente redução do preço pelo não uso da lona plástica. Essa prática, no entanto, não deixa claro se o sistema seria aderido ou não (BALBO, 2009).

2.4.1.1 Tipos de pavimento rígido

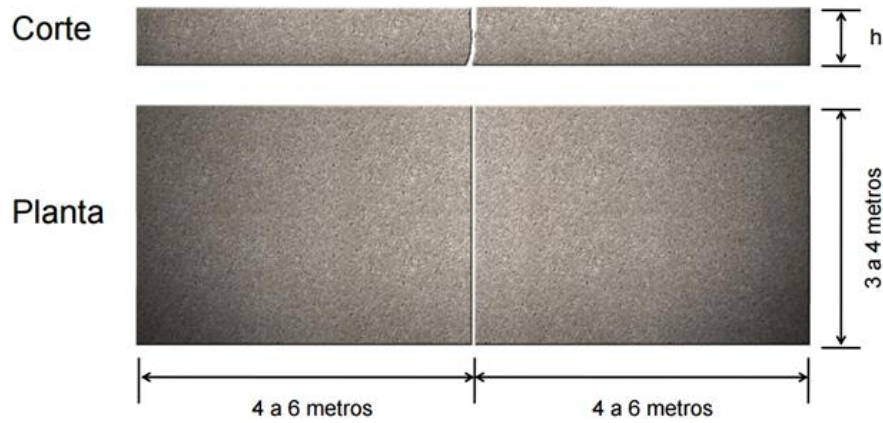
Diante do exposto, os principais tipos de pavimentos rígidos são:

- Pavimento de concreto simples sem barras de transferência;
- Pavimento de concreto simples com barras de transferência;
- Pavimento de concreto simples reforçado descontinuamente;
- Pavimento de concreto simples reforçado continuamente;
- Pavimento de concreto armado;
- Pavimento de concreto sobre-laje em tabuleiros de obras d'arte especiais;
- Pavimento de concreto pré-moldados;

- Pavimento tipo *whitetopping*¹;
- Pavimento de concreto protendido;
- Pavimento de concreto com fibras de aço ou de polipropileno.

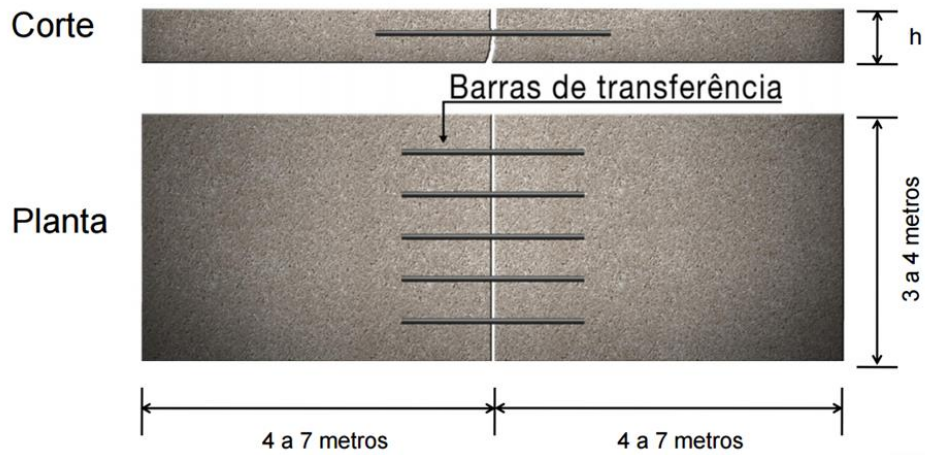
As Figuras 14 a 18 ilustram em corte e em planta os tipos de pavimento rígido simples.

Figura 14 – Pavimento de concreto simples sem barras de transferência



Fonte: ABCP (2017).

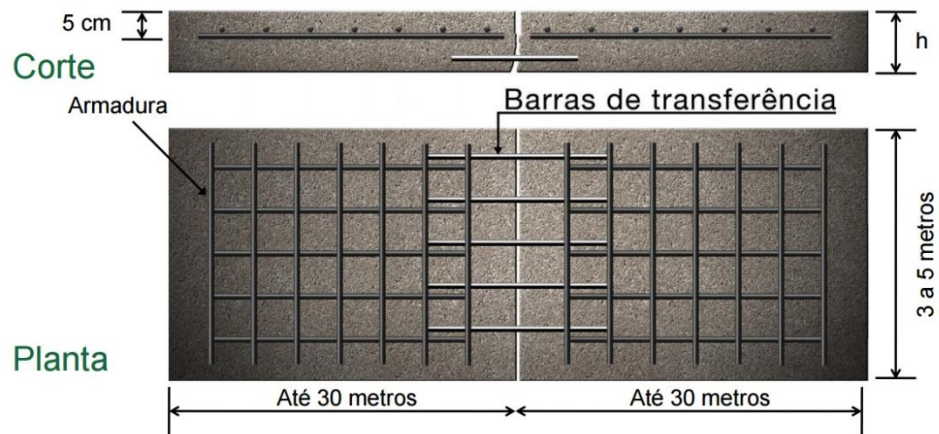
Figura 15 – Pavimento de concreto simples com barras de transferência



Fonte: ABCP (2017).

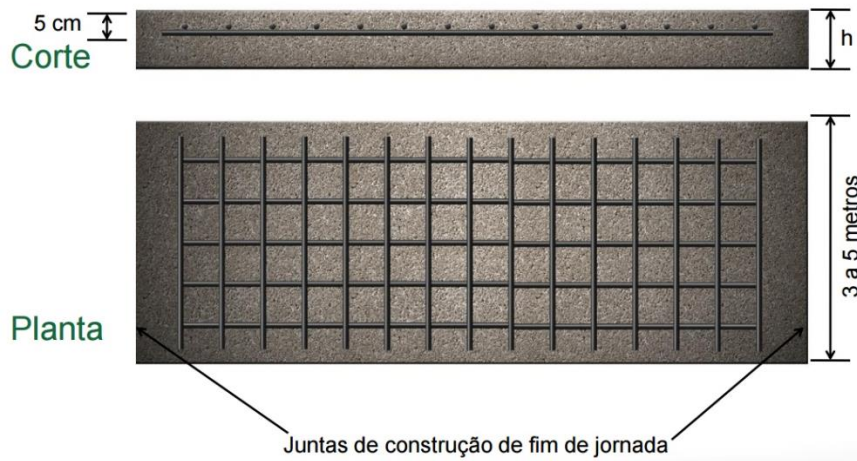
¹ Consiste em uma camada rígida de reforço para reabilitação de pavimentos asfálticos, executada com concreto de cimento Portland

Figura 16 – Pavimento de concreto simples reforçado descontinuamente



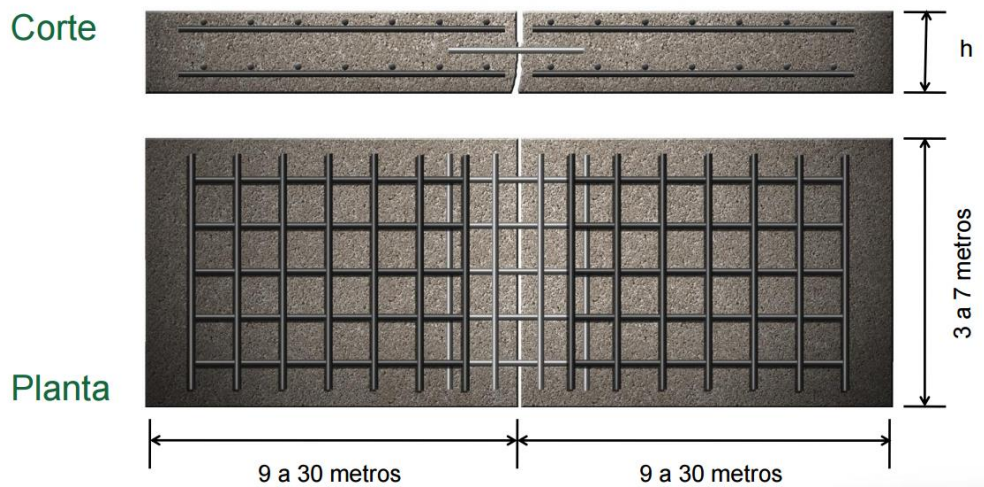
Fonte: ABCP (2017).

Figura 17 – Pavimento de concreto simples reforçado continuamente



Fonte: ABCP (2017).

Figura 18 – Pavimento de concreto armado



Fonte: ABCP (2017).

2.4.1.2 Estudo do concreto para pavimentos rígidos

Concreto é um sólido misto resultante de uma dosagem proporcionada de cimento, água, areia (natural ou artificial), brita (natural ou artificial), e às vezes, ar e aditivos. É, indubitavelmente, um material cujas características físicas, mecânicas e químicas têm lhe atribuído prioridade no campo da engenharia. Não somente convém à natureza da obra, sua importância, bem como às condições de racionalidade (forma, dimensões), estabilidade, resistência e durabilidade (JALBAS, 2016).

A matéria prima dos pavimentos rígidos é o concreto de cimento Portland, que, segundo a literatura, é o material estrutural mais utilizado no mundo. Estima-se que o consumo mundial total de concreto no ano de 2014 foi cerca de três bilhões de toneladas, superado apenas pelo consumo de água.

Dentre algumas vantagens do concreto estão: a viabilidade econômica, resistência, rigidez, capacidade de adequar-se a diferentes formas e funções estruturais, e disponibilidade de materiais.

Não obstante, o concreto convencional tem comportamento frágil, isto é, baixa capacidade de deformação antes da ruptura, além de uma baixa resistência à tração (cerca de 7 a 10% da sua resistência à compressão). Por conseguinte, com a crescente demanda, profissionais da área sentiram a necessidade de minimizar tais deficiências, incorporando novas fases ao concreto, como, por exemplo, fibras de aço ou de polipropileno. Segundo a literatura, essa prática já é utilizada em pavimentos rígidos simples no Brasil, e está prevista no guia AUSTROADS.

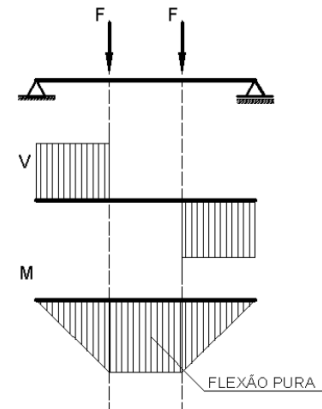
Conforme o pavimento rígido simples não é estruturalmente armado, os principais parâmetros a serem considerados no projeto são: a espessura da placa de concreto e sua resistência ($f_{ct,f}$) à tração na flexão, já que toda a responsabilidade de suportar os esforços de tração na flexão, sem que ocorra sua ruptura, é atribuída ao concreto.

Nessa perspectiva, Balbo (2009) sustenta que os esforços internos decorrentes das ações sobre o pavimento de concreto criam um estado de deflexão na placa que deve ser analisado com base em teorias de estado plano de tensões, para o cálculo de momentos fletores ou de tensões de tração na flexão. Em outras palavras, a hipótese de cálculo da espessura da placa considera o concreto trabalhando no regime elástico, e o processo de dano do pavimento por fadiga perdurando ao longo da vida útil de projeto.

A determinação da $f_{ct,f}$ é feita em corpos de prova prismáticos, moldados e curados de acordo com a ABNT NBR 5738 e ensaiados conforme a normas ABNT NBR 12142 (vide Figura 19). O ensaio é feito pelo método dos dois cutelos, que conduz a valores de resistência menos dependentes das dimensões dos corpos de prova.

A resistência característica ($f_{ctk,f}$) à tração na flexão a ser empregada no dimensionamento de pavimentos rodoviários, deve corresponder à idade de 28 dias, no mínimo, ou de 90 dias, no máximo (no caso de projetos cujo controle tecnológico seja de alto nível de qualidade e rigor) (DNIT, 2005).

Figura 19 – Ensaio de resistência à tração na flexão – NBR 5738 (moldagem) e NBR 12142 (ensaio)



Fonte: <https://www.semengo.furg.br> (2016).

O concreto empregado em pavimentos rígidos deve apresentar, aos 28 dias, resistência característica à tração na flexão ($f_{ctk,f}$) na ordem de 4,5 MPa (DNIT, 2005) — o AUSTROADS adota $f_{ctk,f}$ entre 4 e 5 MPa, para concreto simples, e entre 5 e 5,5 MPa para concreto reforçado com fibras de aço. Além disso, o concreto ideal para pavimentos rígidos deve apresentar baixa variação volumétrica e trabalhabilidade compatível com o lançamento, adensamento e acabamento por meio de vibro-acabadoras (vide Figura 20) (DNIT, 2005).

Valores muito baixos de resistência característica do concreto à tração na flexão, como, por exemplo, 4,0 MPa (cerca de 40 kgf/cm²) ou menos, correspondem a concretos de baixa impermeabilidade, durabilidade inadequada e uma espessura necessária de placa bastante elevada, enquanto os muito altos, por exemplo 5,0 MPa (cerca de 50 kgf/cm²) ou mais, correspondem a concretos de maior impermeabilidade, durabilidade adequada e menor espessura necessária de placa, mas que, em contrapartida, exigem controle tecnológico rigoroso, e quase sempre têm custo inicial mais elevado. Em suma, para garantir durabilidade adequada o consumo de cimento deve ser igual ou maior que 320 kg/m³ de concreto (DNIT, 2005).

Figura 20 – Execução de pavimento rígido com vibro-acabadora



Fonte: capturada pelo próprio autor (2013).

De acordo com a Figura 20, a execução da placa de pavimento rígido exige um concreto dosado para atender a vários requisitos de acordo com o tipo de equipamento utilizado no espalhamento do concreto: consistência (*Slump Test*), bom recobrimento (agregado miúdo e nata de cimento Portland).

2.4.1.3 Estudo dos materiais para o concreto de pavimento rígido

Os principais materiais empregados em pavimentos rígidos são: cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo, água, aditivos e materiais selantes de junta (DNIT, 2005).

a) Estudo de jazidas e pedreiras. Na fase de investigação das ocorrências de areias, cascalheiras e pedreiras, deverão ser procuradas aquelas que apresentem menores custos de escavação, transporte, beneficiamento, e materiais adequados como agregados para concreto de pavimentação, possibilitando a produção de concretos econômicos e mais duráveis.

b) Estudo geológico. Deve-se considerar, nas ocorrências de jazidas para exploração, os aspectos geológicos e petrográficos dos materiais rochosos e granulares naturais (areias e pó de pedra) destinados à produção de agregados para o concreto, visando a compatibilidade do cimento Portland com os agregados, e a influência da sua forma e textura na trabalhabilidade do concreto.

c) Estudo dos agregados. Os agregados destinados à produção do concreto para pavimento rígido devem apresentar condições especiais que os diferenciam daquelas adotadas para concreto de edificações, pontes e outros tipos de estruturas. Isto se deve à necessidade de

o concreto de pavimentação ter: maior resistência à tração na flexão, menor variação volumétrica, menor suscetibilidade à fissuração, maior resistência à fadiga, e elevada durabilidade às ações de intempéries e abrasiva do tráfego. O diâmetro máximo do agregado graúdo não deve ser superior a 38 mm.

d) Estudo do cimento Portland. O cimento Portland é composto de clínquer e de adições durante a fase de moagem e que podem variar de um tipo de cimento para outro. Estas adições são um dos fatores determinantes na classificação do cimento quanto à resistência. Para a execução de pavimentos de concreto, os tipos de cimento recomendados são:

- a) Cimento Portland Comum (NBR 5732);
- b) Cimento Portland Composto (NBR 11578);
- c) Cimento Portland de Alto Forno (NBR 5735);
- d) Cimento Portland Pozolânico (NBR 5736).

e) Estudo da água de amassamento. A água destinada ao amassamento e cura deve ser isenta de substâncias prejudiciais ao processo de pega e endurecimento do concreto, presumindo-se como satisfatórias a água potável.

f) Estudo dos aditivos. Segundo o Comitê 212 do *American Concrete Institute* (ACI), aditivo é “uma substância distinta da água, dos agregados e do cimento, que se usa como ingrediente em concretos e argamassas, adicionado durante a mistura”.

Os aditivos são incorporados ao concreto para que se obtenham efeitos diversos, tais como (DNIT, 2005):

- a) Melhorar a trabalhabilidade;
- b) Acelerar ou retardar o tempo de pega;
- c) Reduzir a permeabilidade;
- d) Acelerar o desenvolvimento da resistência nas idades iniciais;
- e) Torná-lo mais resistente aos agentes agressivos;
- f) Retardar ou diminuir o calor de hidratação e
- g) Desenvolver propriedades fungicidas, germicidas ou inseticidas, etc.

Os aditivos são classificados de acordo com o efeito produzido no concreto, a saber (os aditivos grifados são os mais utilizados em pavimentos de concreto (DNIT, 2005):

- a) **Redutores de água** (plastificantes e superplastificantes);
- b) **Incorporadores de ar**;
- c) **Aceleradores de pega e de resistência**;
- d) **Retardadores de pega**;
- e) Aceleradores de endurecimento;

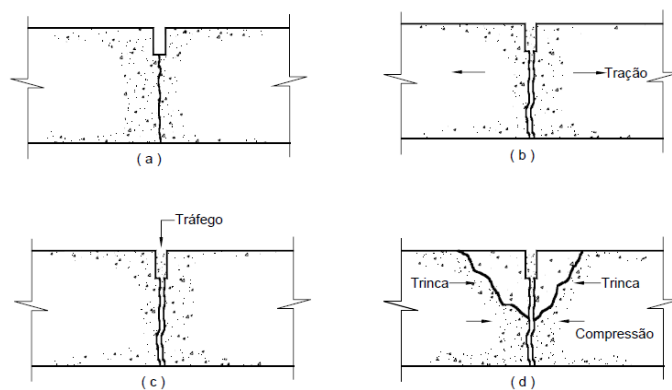
- f) Impermeabilizantes;
- g) Expansores; e
- h) Anticorrosivos, fungicidas, germicidas e inseticidas.

g) Estudo do traço do concreto. Para que as condições acima descritas sejam satisfeitas, faz-se necessário o estudo do traço ideal do concreto, considerando-se o tipo e a eficiência do cimento, o teor de água, a temperatura do concreto e dos materiais, os tipos de aditivos e métodos de cura, verificando-se as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. A norma brasileira dedicada ao tema é a Norma DNIT-054/2004-PRO (DNIT, 2005).

2.4.1.4 Estudo dos selantes de juntas

A selagem das juntas de um pavimento de concreto – transversais ou longitudinais, serradas ou moldadas – é uma prática que visa impedir a infiltração de água e de materiais sólidos (como areia, pequenos pedregulhos e outros corpos estranhos) através delas (vide Figuras 21 e 22) (DNIT, 2005):

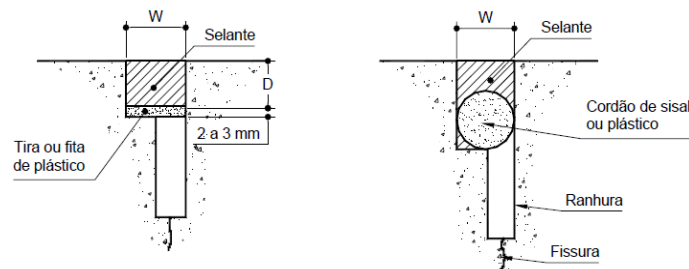
Figura 21 – Aspectos das juntas transversais



- (a) Aspecto de uma junta transversal de retração, não selada, imediatamente após o aparecimento da trinca de retração
- (b) Vê-se a trinca de retração aberta (em tempo frio) e a ranhura preenchida com partículas sólidas
- (c) A ação do tráfego empurra as partículas sólidas para o interior da trinca de retração
- (d) Em temperaturas mais elevadas, a trinca tende a "fechar" dando origem a tensões de compressão que, a depender dos fatores citados no texto, podem provocar o aparecimento de trincas na região da junta e o seu progressivo esborcinamento

Fonte: DNIT (2005).

Figura 22 – Tipos de reservatório do selante: em (a) utilização de tira ou fita de plástico sob o selante; em (b) utilização de cordão de sisal ou plástico sob o selante



Fonte: DNIT (2005).

Acerca da selagem das juntas em pavimentos rígidos, Odum Ewuakye e Attoh-Okine (2005) corroboram a importância deste material no tocante à estabilidade e vida útil do pavimento. De acordo com eles, “juntas de pavimento de concreto são ‘rachaduras’ formadas intencionalmente no pavimento para acomodar a expansão e contração devidas a mudanças de temperatura”. Ainda segundo eles:

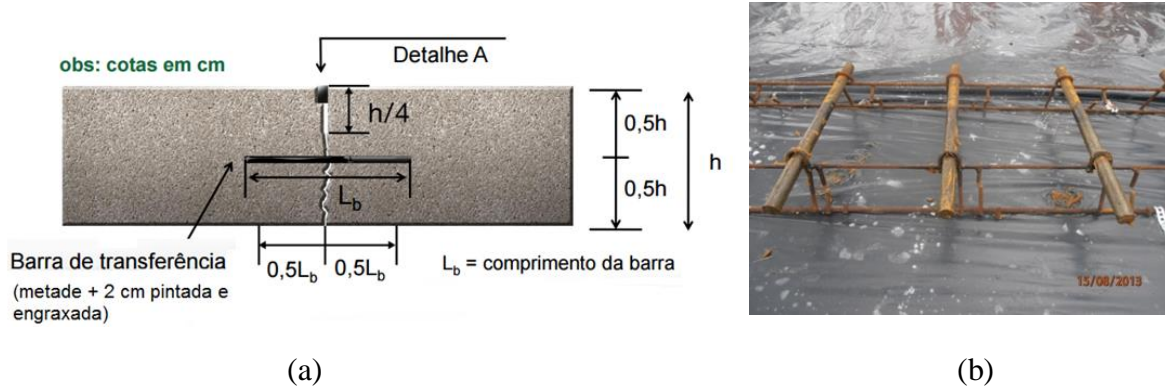
Hoje, 98% das agências de construção e manutenção de estradas de concreto, e 100% das agências de edificação e manutenção de pavimentos de concreto de aeroportos nos Estados Unidos exigem a vedação das juntas para pavimentos novos. Há duas principais razões para a selagem de juntas de pavimentos rígidos. A primeira é a de reduzir a quantidade de água que se infiltra na estrutura do pavimento, que resulta na erosão de placas e perda de apoio. A segunda razão é a de minimizar a entrada de materiais incompressíveis no reservatório da junta, resultando em ponto de carregamento quando as lajes expandirem em temperaturas elevadas, e subsequentes danos por esborcinamento. Outra razão para vedação de juntas de pavimento rígido é reduzir o potencial de corrosão de armaduras de ligação através da redução de entrada de produtos químicos de degelo [...] (ODUM-EWUAKYE; ATTOH-OKINE, 2005).

Conhecer os fatores que afetam a vida útil dos selantes, seu desempenho, e como mitigá-los, é estender razoavelmente sua durabilidade e do pavimento rígido.

2.4.1.5 Estudo das barras de transferência de cargas

O uso de barras de transferência de cargas (BT) contribui com a redução da espessura da placa de concreto. Comparando-se pavimentos com e sem barras de transferência, verifica-se que a contribuição destas barras pode ser tão grande a ponto de trazer uma economia de até 5 cm na espessura na placa, no caso de cotejo com pavimentos sem acostamento de concreto e sem sub-base, para tráfego pesado. Isto se deve ao fato de as barras de transferência atuarem no combate aos "degraus" nas juntas transversais (vide Figura 23) (DNIT, 2005).

Figura 23 – Barras de transferência de carga. Note-se que metade mais 2 cm do comprimento das barras é lubrificada com graxa para não adesão ao concreto. Em (a) croqui técnico; em (b) fotografia de BT *in situ*



Na duplicação da BR 101 da Região Nordeste brasileira, tem-se registro da utilização de BT com 46 cm de comprimento (23 cm para cada lado) em aço cilíndrico CA-25 com diâmetro de 25 mm.

2.4.1.6 Estudo das barras de ligação

Apesar de não estarem envolvidas no cálculo da espessura da laje a prática de projeto recomenda o uso de barras de ligação (BL) para impedir a separação da placa nas juntas longitudinais, sem restringir excessivamente a ocorrência de deformação ou curvatura. Estas barras são usualmente de aço CA-50 e com 12 mm de diâmetro e com cerca de 1 m de comprimento, colocadas no plano médio da placa.

Também na duplicação da BR 101 da Região Nordeste brasileira há registros do uso dessas barras pelo DNIT com cerca 85 cm de comprimento para (42,5 cm cada lado).

2.4.1.7 Estudo da sub-base

É recomendável pelos métodos de projeto de pavimento rígido o emprego de sub-base estabilizada quimicamente entre a placa de concreto e o subleito. Esta sub-base deve ser uma camada tipicamente delgada, 10 a 20 cm, com as seguintes funções:

- Uniformizar o subleito ao longo da faixa do pavimento, proporcionando suporte razoável e constante;
- Aumentar o Módulo de reação, k , do sistema de fundação, proporcionando economia através da redução da espessura da placa de concreto;
- Suprimir os efeitos dos solos expansivos do subleito;

- Eliminar a ocorrência do bombeamento do subleito, sendo esta a principal causa da ruína de grande parte dos antigos pavimentos de concreto que não dispõem desse dispositivo.

A literatura denomina bombeamento o fenômeno de erosão que ocorre na interface da sub-base com o subleito pela compressão das cargas dinâmicas do tráfego quando o subleito se encontra embebido em água devido à infiltração ocasionando a expulsão do material fino do solo (DNIT, 2005).

2.4.1.7.1 Tipos de sub-base

Os tipos de sub-bases para pavimentos de concreto podem ser classificados conforme a Figura 24 (DNIT, 2005). O emprego, por exemplo, de sub-bases estabilizadas com cimento é indicado para projetos de estradas para tráfego pesado. Na Figura 25 são apresentadas as sub-bases tratadas com cimento, muito utilizadas pela maioria dos métodos de projeto de pavimentos rígidos.

Figura 24 – Quadro com tipos de sub-bases para pavimentos de concreto

Sub-base para pavimentos de concreto	Sub-bases granulares	Granulometria fechada	
		Granulometria aberta	
	Sub-bases tratadas	Com cimento	Solo-cimento Solo melhorado com cimento Brita graduada tratada com cimento Concreto rolado
		Com outros aditivos	Asfalto Cal Pozolana

Fonte: DNIT (2005).

Figura 25 – Quadro com características usuais de sub-bases estabilizadas com cimento

Tipos de Estabilização	Requisitos de Dosagem	Espessuras Usuais
Solo-cimento	1) Resistência mínima à compressão simples, aos 7 dias, entre 1,4 e 2,1 MPa 2) Consumo mínimo de cimento igual a 5% em massa	10cm a 20cm
Brita tratada com cimento	1) Resistência à compressão simples, aos 7 dias, entre 3,5 e 5,0 MPa 2) Consumo mínimo de cimento igual a 3% em massa	10cm a 20cm
Concreto pobre (ou rolado)	1) Resistência característica à compressão simples, aos 7 dias, entre 3,0 e 7,0 MPa. 2) Relação cimento:agregado entre 1:15 e 1:22	7,5cm a 15cm
Solo melhorado com cimento	1) Índice de suporte Califórnia igual ou maior que 30% (conforme DNER-ES-P 09-71) 2) Consumo mínimo de cimento igual a 3% em massa	10cm a 20cm

Fonte: DNIT (2005).

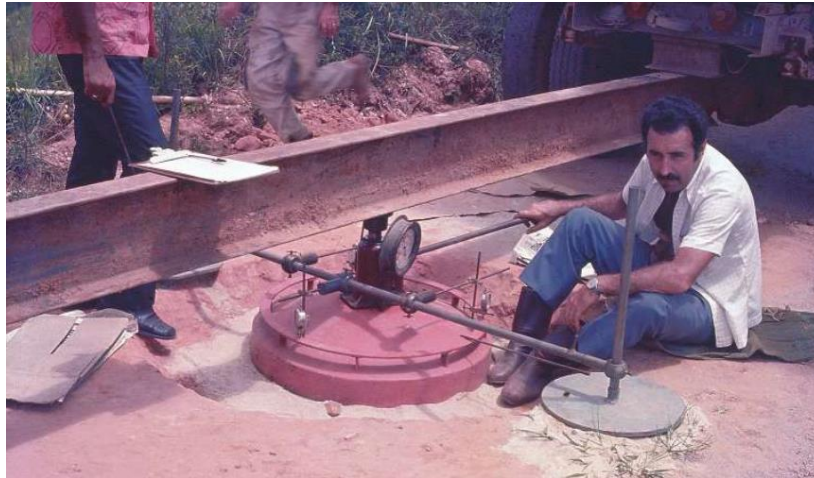
2.4.1.8 Estudo das características do subleito

Nos projetos de pavimento rígido o subleito deve ser estudado com muita precaução, posto que a presença de solos expansivos e de camadas espessas de argila mole (“massapê” da Bahia) compromete o suporte do subleito (DNIT, 2005).

As informações necessárias acerca da qualidade do subleito podem ser obtidas durante a fase dos estudos geológicos e pormenorizadas durante os estudos geotécnicos, integrantes das diretrizes básicas para elaboração de estudos e projetos rodoviários. Para o dimensionamento da espessura da placa do pavimento rígido, faz-se necessário conhecer o parâmetro relativo ao suporte do subleito, Coeficiente de Recalque, também denominado de Módulo de Reação do subleito, k , ou Módulo de Westergaard (DNIT, 2005).

Este parâmetro é determinado em uma prova de carga estática, consoante norma DNIT 055/2004-ME, baseada na ASTM-D 1196/93 e em diretrizes específicas do *U.S. Army Corps of Engineers* (vide Figura 26). Segundo essa norma, uma placa circular com pelo menos 76 cm de diâmetro e área mínima de 0,5 m² é carregada em estágios sucessivos de 0,15 a 0,20 kgf/cm² até atingir a pressão máxima de cerca de 1,80 kgf/cm². As pressões verticais transmitidas ao subleito, por meio da placa rígida, são correlacionadas com os deslocamentos verticais correspondentes. Como resultado do ensaio, obtém-se a curva carga *versus* recalque e, conseqüentemente, o Módulo de reação, k , do material ensaiado (DNIT, 2005).

Figura 26 – Prova de carga estática pela ASTM-D 1196/939



Fonte: Carvalho (2017).

Alternativamente a esse método, a determinação das deflexões pode ser realizada utilizando-se o deflectômetro de impacto (ensaio dinâmico) do tipo *Falling Weight Deflectometer* (FWD), cujo teste é regido pela norma ASTM-D 4694 (vide Figura 27). As medidas das bacias de deflexões recuperáveis são realizadas com espaçamento de 20 m em faixas alternadas.

Esses ensaios são realizados *in situ*, existindo, por natureza operacionais, um grande grau de dificuldade. O FWD, por exemplo, não é adequado para o cálculo de k na fase de projeto, devido à falta de acesso e condições inapropriadas para o uso do equipamento, prestando-se, entretanto, para a investigação do k do sistema da fundação, por meio do retrocálculo sobre a placa de concreto.

Figura 27 – Teste não destrutivo pelo *Falling Weight Deflectometer* – FWD



Fonte: CAHPI (2017).

Por essa razão, e para fins de cálculo preliminar de custo, pode-se avaliar o k fazendo uso dos dados da Figura 28, que relaciona os diversos tipos de solos do subleito com a respectiva faixa de variação dos valores do módulo de reação do subleito ou coeficiente de recalque (classificação AASHTO-BPR), com a ressalva de não servir para solos tropicais

Também, para a determinação expedita do coeficiente de recalque, admite-se o uso de uma correlação entre os valores do Módulo de reação do solo do subleito e os respectivos valores obtidos para o *CBR* ou Índice de Suporte Califórnia (ISC) (vide Figuras 29 e 30) (DNIT, 2005). Segundo a literatura, no Brasil o *CBR* praticado para o subleito de pavimentos rígidos é de 10%.

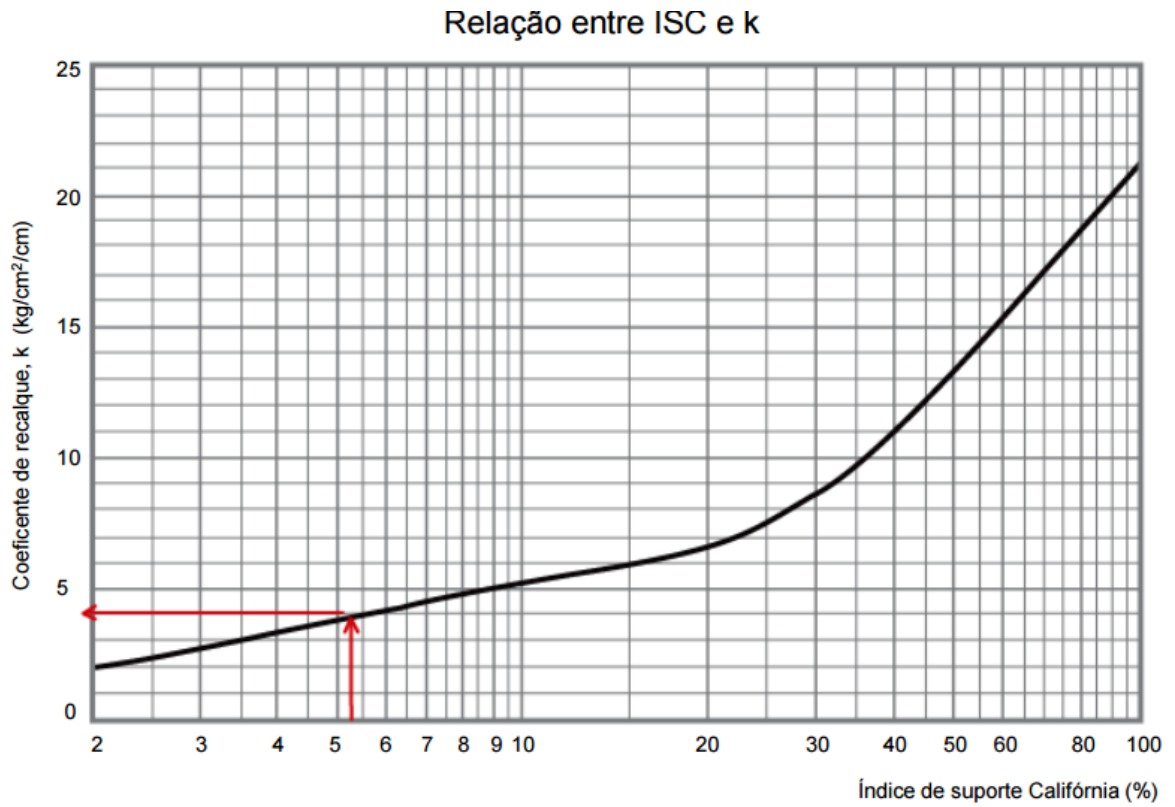
Figura 28 – Relação aproximada entre o tipo de solo do subleito pelo sistema de classificação do HRB (adotado pela AASHTO) e o Módulo de reação do subleito (Coeficiente de Recalque)²

Tipo de Solo (AASHTMO M 145)	Coeficiente de Recalque (k)	
	MPa/m	kgf/cm ² /cm
A1-a	>110	>11,0
A1-b	70 – 165	7,0 – 16,5
A2-4, A2-5	>80	>8,0
A2-6, A2-7	50 – 90	5,0 – 9,0
A3	55 – 90	5,0 – 9,0
A4	25 – 80	2,5 – 8,0
A5	<50	<5,0
A6	<60	<6,0
A7-5, A7-6	<60	<6,0

Fonte: DNIT (2005).

² Sigla referente ao registro de patente da AASHTO.

Figura 29 – Relação entre Índice de Suporte Califórnia (*CBR*) e *k*



Fonte: ABCP (2017).

Figura 30 – Ensaio do *CBR*



Fonte: SOLOCAP (2017).

2.5 Métodos computacionais e modelos de otimização em projeto de pavimentos

Há uma série de trabalhos de pesquisa na literatura que abordam temas acerca de métodos e programas computacionais, bem como modelos de otimização, para pavimento rodoviário, quer sejam para fins de projeto, quer sejam para sua gestão.

Rufino (1997) realizou um estudo em que apresenta uma análise crítica dos métodos de dimensionamento adotados no Brasil e os diversos programas de análise de tensões e deslocamentos em pavimentos de concreto. Também apresentou um estudo teórico das possíveis temperaturas diferenciais em placas de concreto para diversas cidades brasileiras. Uma proposta de dimensionamento para o método PCA de 1984, com o uso das equações desenvolvidas pela PCA por meio de um algoritmo computacional, é apresentada. Dentre os programas apresentados destacam-se o RISC e o PCAPAV, para o dimensionamento de pavimento rígido. Este último é uma versão computadorizada do método PCA de 1984. O estudo aborda temas como: modelagem da fundação do pavimento (líquido denso, sólido elástico, etc.), modelagem da estrutura do pavimento (Teoria das placas, Métodos dos elementos discretos, Teoria de Burmister, etc.), análise das tensões e deflexões em pavimentos (Tensões devidas ao tráfego, tensões causadas por variações térmicas, Reconsiderações das fórmulas de Westergaard), projeto de pavimentos rodoviários de concreto, programas disponíveis para o projeto de pavimento de concreto, métodos de dimensionamento da espessura de pavimentos rodoviários de concreto (PCA de 1966, PCA de 1984, método da AASHTO, método de dimensionamento de Balado), programas disponíveis para análise estrutural de pavimento de concreto (SAP, FINITE, GEOSYS, FEACONS, SLAB, J-SLAB, ILLI-PAVE, WESTER, RISC, etc.). O estudo apresenta as equações que deram origem ao PCA de 1984.

Gondim (2009) apresentou estudos de comparação do dimensionamento de pavimentos de concreto utilizando o programa computacional denominado KENSLABS e o método PCA de 1984. Este trabalho apresenta um levantamento dos principais aspectos referentes ao projeto mecanicista de um pavimento de concreto, levando em consideração o efeito do clima, do tráfego e das características dos materiais utilizados na configuração do pavimento. Aborda, sucintamente, os métodos e programas existentes, e, com detalhes, o método de dimensionamento da PCA 1984 e o programa computacional KENSLABS 2004, que utiliza o método de elementos finitos para análise das tensões e deformações em pavimentos de concreto. Segundo a autora, o programa KENSLABS apresenta grandes vantagens sobre o método da PCA 1984, podendo-se destacar a modelagem mais realista da sub-base e a possibilidade de se

considerar o efeito dos gradientes térmicos nas tensões e deformações causadas pelo empenamento da placa, que podem atingir magnitudes duas vezes maiores que aquelas encontradas quando da ação isolada de cargas rodoviárias.

Vale comentar que a PCA americana dispõe de um programa de computador que permite dimensionar um pavimento de concreto baseado nos mesmos princípios, mas sem as imprecisões de tabelas e nomogramas. Pode-se especular porque o DNIT manteve o uso do método manual mesmo na versão de 2005. [...] Rufino (1997) desenvolveu um procedimento e propôs uma nova maneira de se dimensionar pelo Método da PCA/84 utilizando-se apenas o computador sem ser necessário se recorrer a tabelas ou nomogramas. Entretanto tal procedimento não chegou a ser amplamente usado lamentavelmente. A autora já chamava a atenção para a necessidade de mais verificações principalmente com relação ao critério de ruína por erosão cujos modelos são baseados em observações de campo em país de clima muito diferentes do Brasil (GONDIM, 2009).

No âmbito do gerenciamento, Golabi, Kulkarni e Way (1982) desenvolveram um sistema de manutenção de pavimento para o Estado do Arizona (EUA) para produzir políticas ideais para cada milha da rede de 7.400 milhas de rodovias. O coração do sistema é um modelo matemático que capta os aspectos dinâmicos e probabilísticos de manutenção do pavimento. O modelo integra o gerenciamento da política de decisões, política orçamentária, fatores ambientais e as decisões de engenharia. Durante o primeiro ano de implementação, ano fiscal 1980-1981, o sistema permite poupar 14 milhões de dólares (quase 1/3 do orçamento de preservação do Arizona) e economizar 101 milhões de dólares nos quatro anos seguintes.

Um modelo de gestão da vida útil do pavimento flexível foi proposto por Mbwana e Turnquist (1996) para proporcionar um plano de manutenção e reabilitação ótimas. O modelo incorpora no processo de otimização não só o desempenho, mas o custo associado a um período de análise da vida útil de determinada estrutura de pavimento (projeto). Um único indicador de vida útil chamada "inutilidade de vida útil" foi introduzido e definido como a relação de custo para o desempenho. O plano ideal é aquele associado ao valor mínimo de inutilidade da vida útil.

Ferreira, Antunes e Picado-Santos (2002) apresentaram um novo modelo de otimização em rede de sistema de gestão de pavimento (SGP), juntamente com um heurístico algoritmo genético para solução. O objetivo do modelo é minimizar os custos totais esperados de manutenção do pavimento e as ações de recuperação ao longo de um determinado intervalo de tempo, mantendo-se a rede dentro de determinados padrões de qualidade.

Santos e Ferreira (2012) discorrem que em Portugal, assim como em outros países, devido à crise econômica, a tendência de pressões orçamentárias sobre as agências rodoviárias é uma crescente. Soma-se ao fato de estarem os usuários cada vez mais exigentes no tocante à qualidade das estradas, conforto e segurança. Projetos de várias rodovias foram adiados devido a restrições orçamentárias. Para enfrentar esses desafios, agências rodoviárias estão à procura

de uma melhor relação custo-benefício, e metodologias de gerência de pavimentos no âmbito de projeto. Apresentaram os autores um novo modelo de otimização do projeto de pavimento, OPTIPAV, que considera: o desempenho do pavimento; os custos de construção, de manutenção e reabilitação; custos para o usuário; o valor residual do pavimento ao final do período de análise de projetos e intervenções de manutenção e reabilitação preventivas. Assim, tal modelo foi desenvolvido e programado para amparar os projetistas de pavimento a escolher melhor a estrutura do pavimento de uma rodovia. Os resultados obtidos com a aplicação do novo modelo de otimização de projeto de pavimento mostraram uma valiosa ferramenta ao engenheiro projetista.

No que tange a projetos de pavimento rígido, Larralde e Chen (1987) desenvolveram um método para estimar a deterioração mecânica de pavimentos rígidos de estradas causadas pela carga repetitiva de tráfego. No método apresentado, a ruína (fadiga e erosão) é reconhecida como mecanismo de falha em pavimentos rígidos de rodovia. A análise não linear com elementos finitos (MEF) é usada para calcular tensões repetitivas como as causadas pelo tráfego. A diminuição de rigidez da laje, a eficiência de transferência de carga, bem como de bombeamento e da quantidade de danos, são obtidas através de uma função do volume de tráfego e das propriedades do pavimento.

Por sua vez, Fogg et al. (1991) realizaram um estudo sobre a revisão da equação de projeto introduzida pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). A equação revisada contém novos parâmetros de entrada, tais como: confiabilidade, para introduzir a análise de risco no processo de projeto; erro padrão, para representar a variabilidade nos valores de entrada do projeto, e coeficiente de drenagem, para representar a variabilidade na drenagem de água a partir da estrutura do pavimento. O parâmetro de entrada final é o coeficiente de transferência de carga nas juntas, para representar o tipo de junta utilizada no processo de construção. Os resultados demonstram a importância relativa dos parâmetros de entrada da equação de projeto e fornece *insights* sobre a mudança relativa na espessura do pavimento em função de variações ou erros nos valores dos parâmetros de entrada. Os resultados do estudo mostram que a variação do módulo de ruptura do concreto e o módulo de elasticidade longitudinal do concreto, E , têm o efeito mais acentuado sobre a espessura do pavimento do que a variação no módulo de reação do subleito, k , que tem efeito menos pronunciado sobre a espessura do pavimento.

Hadi e Arfiadi (2001) desenvolveram uma técnica para problemas de otimização estrutural do projeto de pavimento rígido, na plataforma Algoritmo Genético³ (AG), tendo como base a *Australian Pavement Design Guide*, AUSTRROADS, que, por sua vez, adota as recomendações do PCA de 1984, para pavimento rígido, definindo-se a função objetivo associada ao custo total de materiais de pavimentação, e todas as restrições que influenciam o projeto.

Timm (2006) pesquisou a performance de um novo guia de projeto em desenvolvimento, NCHRP Projeto 1-37A⁴, que introduz o novo método de projeto de pavimento mecanicista-empírico (M-E). O método de projeto M-E baseia-se na mecânica dos pavimentos, bem como em observações de desempenho para criar funções que preveem com maior acurácia danos de uma estrutura de pavimento durante a sua vida útil.

Tradicionalmente, o projeto de pavimento fora baseado em observações empíricas e extrapolações a partir da AASHO *Road Test* da década de 1950. No entanto, devido à mudança de materiais, cargas e necessidades de rodovias, estas observações e extrapolações tornaram-se cada vez mais obsoletas nos correntes métodos de projeto [...] Quando qualquer novo método de criação se desenvolve, há uma necessidade de se comparar a nova abordagem *versus* a metodologia empírica clássica, AASHTO *Design Guide* de 1993, para determinar o impacto que a nova abordagem tem em projeto de pavimento rígido, em termos de espessura final da placa (TIMM, 2006, p. 236-247).

De fato, Timm (2006) comparou a nova abordagem M-E com o método AASHTO existente. Executaram-se 125 conjuntos diferentes de condições e verificou-se que as espessuras de laje da nova abordagem de projeto eram tipicamente 9 (nove) por cento mais delgadas.

Kohler, Kannekanti e Harvey (2006) apresentaram o *California Efforts Towards Mechanistic-Empirical Pavement Design*, em fase de desenvolvimento, baseado na implementação da abordagem mecanicista-empírica. Ainda em fase de calibração, em 2006, o trabalho dos aludidos pesquisadores apresenta resultados de um estudo de sensibilidade que foi realizado no software 1-37a NCHRP. A avaliação da sensibilidade foi realizada para pavimento rígido novo articulado e (em desenvolvimento à época) para pavimentos contínuos reforçados e pavimentos flexíveis novos.

Kang e Zhang (2007) desenvolveram um método, que considera a forma de contato entre o pneu e o pavimento simplificada como um retângulo, o pavimento rígido é tratado como placa na fundação elástica, e as cargas de veículos são consideradas como cargas de impacto que são descritas por uma função específica. A tensão causada pela carga de impacto se espalha como onda no pavimento rígido. A resposta dinâmica do pavimento rígido às cargas de impacto

³ Algoritmo baseado na teoria natural da evolução, sobrevivência do mais forte.

⁴ Guia de projeto de pavimento desenvolvido pelo método mecanicista-empírico (M-E), com procedimentos para a análise e projeto de pavimentos: novo, flexível reabilitado, rígido, e semirrígido, incluindo um software.

foi analisada pelo método matemático e método mecânico de acordo com a condição inicial e condição de contorno, e a tensão de qualquer ponto no pavimento rígido bem como o seu deslocamento pode ser obtido considerando a natureza do material. Concomitantemente, pode-se obter o tempo em que a tensão atinge valor de pico e os processos de dissipação da tensão no pavimento rígido. Além disso, pode-se obter também o efeito da velocidade do veículo sobre a tensão de qualquer ponto no pavimento rígido.

No Brasil, o aumento nos investimentos em infraestrutura de transportes contempla tanto a manutenção quanto a implantação de novas rodovias. Contudo, o aumento do tráfego, em volume e peso, associado às condições de intempéries, tem resultado na degradação precoce do pavimento. Nesse contexto, Teodozio (2012) realizou um estudo numérico das tensões e deformações em estruturas de pavimentos flexíveis submetidos a cargas de tráfego, através do Método dos Elementos Finitos, e avaliou seus efeitos sobre a vida útil da camada de revestimento.

Raposo et al. (2012) propuseram estabelecer uma analogia entre o Método dos Elementos Finitos (MEF) e a teoria da elasticidade, normalmente utilizada na análise das tipologias de pavimentos flexíveis e semirrígidos, objetivando validar os resultados originários da aplicação do MEF ao estudo das variáveis determinantes no dimensionamento de pavimentos rígidos. Eles afirmaram que para a análise e dimensionamento de pavimentos rodoviários é aplicável a teoria da elasticidade, sendo comum o recurso ao modelo multiestratificado de Burmister através da solução analítica materializada pelo ELSYM5⁵. Esta abordagem, se bem que simplificada, é aceitável para as tipologias flexível e semirrígida, no entanto apresenta limitações quando aplicada a pavimentos rígidos, uma vez que não permite modelar o carregamento e a perda de apoio nas extremidades das placas de concreto, fatores comprometedores para o equilíbrio estrutural do pavimento, sendo a causa da diminuição do tempo de vida útil da estrutura ou da necessidade de intervenções de manutenção não programadas.

Os pavimentos rodoviários rígidos não armados estruturalmente são dimensionados por metodologias que combinam a resistência de materiais com o conhecimento empírico obtido em ensaios de carga à escala real, pelo que são classificados como mecanicistas/empíricos. A necessidade de utilização destes métodos deriva da influência que a erosão da superfície de apoio da laje de concreto possui na integridade estrutural do pavimento, e da impossibilidade de correlacionar de forma exata todas as variáveis com preponderância na erosão resultante do fenômeno de bombeamento de finos (RAPOSO et al., 2012).

⁵ Programa computacional desenvolvido no âmbito da determinação dos estados de tensão e de deformação no semi-espaço sob ação de carregamento axissimétrico uniformemente distribuído.

Mack e Zollinger (2013) apresentaram um método para otimizar projetos de pavimento de concreto para equilibrar o custo inicial do pavimento, que é afetado principalmente pela espessura e características específicas de projeto bem como pelos custos de reabilitação, com base no desempenho previsto do pavimento, usando o então recente *AASHTO/Mechanistic Empirical Pavement Design Guide and Cost Analysis (MEPDG)*, acompanhado de *software*, o *DARWin-ME*.

Devido à natureza conflitante dos aspectos estruturais ideais como desempenho, custo e segurança a formulação de um problema de otimização estrutural requer função multiobjetivo, embora pouco usual, uma vez que tem a vantagem de apresentar um conjunto diversificado de soluções (VARGAS et al., 2016).

A literatura mostra que os algoritmos evolucionários (AE) são eficazes na obtenção de soluções em problemas de otimização multiobjetivo e que aqueles baseados em evolução diferencial (ED) são eficientes na resolução de problemas de otimização estrutural mono-objetivo [...] (VARGAS et al., 2016).

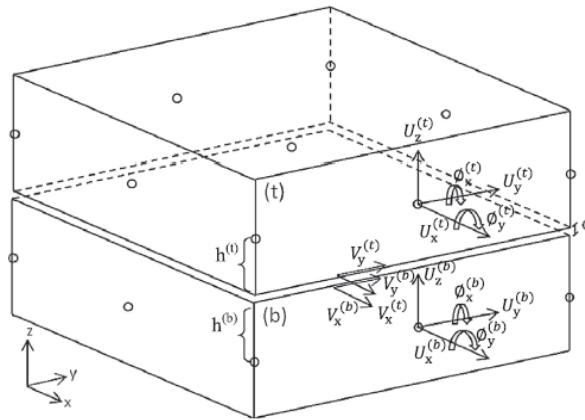
Salienta-se que outro passo à frente, no sentido de assegurar o adequado nível de segurança aos projetos, tem sido a introdução no dimensionamento do conceito de confiabilidade estrutural, entendida como a probabilidade de que um certo pavimento desempenhará satisfatoriamente as funções previstas no projeto (DNIT, 2005).

Segundo Lima Júnior (2016), “Os sistemas estruturais são projetados, construídos e mantidos, de modo a cumprir sua função estrutural durante sua vida útil, com um nível aceitável de segurança, e de maneira economicamente viável”.

Nessa conjuntura, novos e relevantes aspectos puderam ser considerados em projeto de pavimento rígido como, por exemplo, os efeitos do empenamento térmico e higroscópico do concreto no nível de tensões.

Sobre este último aspecto, estudos de Zokaei-Ashtiani, Carrasco e Nazarian (2014) comprovaram que as tensões por flexão produzidas em placas de concreto do pavimento são influenciadas pela condição do contato de atrito/aderência entre na interface entre a laje e a sub-base. No estudo, elemento de placa 2D é proposto para a idealização de lajes mistas; elementos de interface são usados para ligar as camadas não ligadas no interior da composição e para modelar a interface entre a camada de laje de fundo e a camada de fundação. Os elementos da interface têm a capacidade para capturar a separação e de deslizamento entre as camadas do pavimento, devido a cargas térmicas, e para calcular a força de atrito na sua interface (vide esquema na Figura 31).

Figura 31 – Duas placas adjacentes. ΔV representa o deslocamento tangencial relativo entre a superfície inferior da placa de cima e a superfície superior da placa de baixo



Fonte: Zokaei-Ashtiani, Carrasco e Nazarian (2014).

Diante do exposto nesta seção, pode-se perceber a importância da tecnologia da informação em gestão de pavimentos, em especial ao que diz respeito aos pavimentos rígidos, quer seja em manutenção e reabilitação, quer em estudos estatísticos para acervos de projeto e previsão de vida útil. A eficiência da informação, a qual se deseja obter, vai depender da acurácia do algoritmo, da qualidade dos dados a serem processados e da interpretação dos resultados.

3 PROJETO ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS RÍGIDOS SIMPLES

O dimensionamento de pavimentos de concreto está fundamentado nas três premissas:

- Fundação (*CBR* ou módulo de reação do subleito, k);
- Tráfego (volume e classificação por eixo de carga);
- Concreto (resistência característica à tração na flexão e condições de contorno da placa).

Alguns métodos históricos e alguns mais atuais projeto de pavimento rígido são:

- Modelos Teóricos Pioneiros de Westergaard;
- Cartas de Influência de Pickett e Ray;
- Métodos da *Portland Cement Association*;
 - ❖ PCA de 1966
 - ❖ PCA de 1984
- Método da *American Association of State Highway and Transportation Officials*;
 - ❖ AASHTO versão de 1993;
 - ❖ AASHTO versão de 1998 (critério suplementar);
 - ❖ AASHTO versão de 2002;
- *U.S. Army Corps of Engineers*.

Nessa seção, serão apresentados o método PCA de 1984 e, na sequência, o guia australasiano AUSTROADS de 2010, que, conforme dito anteriormente, foi desenvolvido com base no PCA de 1984. O objetivo principal deste capítulo é explicar os fundamentos e procedimentos de projeto do método PCA de 1984 e do guia AUSTROADS de 2010. Durante a apresentação do método PCA de 1984 será apresentado um exemplo de dimensionamento por meio de ábacos; já para o guia AUSTROADS de 2010 os exemplos serão abordados quando da apresentação do seu algoritmo de otimização.

3.1 Método PCA de 1984

Conforme já citado, o método PCA de 1966 é o alicerce da nova versão publicada pela PCA em 1984, fomentada pelo franco desenvolvimento de novas práticas de construção para as quais os procedimentos à época não se aplicavam (PACKARD; TAYABJI, 1985), tais quais:

- Modelo de comportamento: fadiga e erosão;
- Contribuição estrutural das sub-bases de concreto magro (CCR);

- Transferência de carga nas juntas transversais;
- Efeito da existência de acostamentos e
- Ação dos eixos tandem triplos.

3.1.1 Metodologia

Com efeito, o método PCA de 1984 originou-se e se desenvolveu fundamentado na seguinte metodologia:

- Modelos teóricos pioneiros de Westergaard sobre o comportamento de placas de concreto;
- Cartas de Influência de Pickett e Ray;
- Método da PCA de 1966 (Ábacos de Pickett e Ray)
- Modernas análises computacionais empregando elementos finitos feitas por Packard e Tayabji, que publicaram em 1985;
- Ensaio de laboratório:
 - Análise mecânica extensa e abrangente de tensões e deflexões em juntas, cantos e bordas;
 - Desempenho do pavimento de concreto sob influência de juntas, sub-bases e acostamentos;
 - Modelagem da transmissão de carga por barras de transferência e entrosagem entre agregados.
- Pistas experimentais da AASHO *Road Test*, além de estudos levados a efeito por diversos órgãos rodoviários e aeroportuários em pavimentos em serviço.

3.1.1.1 Princípios fundamentais

Importa ressaltar a influência que métodos clássicos exerceram na concepção do PCA de 1984, sua configuração face ao avanço tecnológico e a trajetória percorrida pelos fundamentos que inauguraram a ciência de pavimentos rígidos.

❖ Modelos teóricos pioneiros de Westergaard

Em 1926 Westergaard propôs equações para o cálculo de tensões de tração na flexão em placas de concreto simples submetidas a esforços oriundos de carga isolada. Tais soluções tinham como base a teoria elástica de placas (medianamente espessas) formalizada século atrás por Poisson e Kirchhoff (BALBO, 2002, p. 2).

Baseado na Teoria do líquido denso (meio isotrópico, homogêneo e elástico), clássico modelo de Boussinesq⁶, concebe o subleito como um líquido muito denso que pudesse reagir a esforços aplicados sobre sua superfície, comportando-se como um conjunto de molas idênticas sem transmissão de esforços de cisalhamento entre elas, seguindo, assim, a hipótese de Winkler e Zimmermann, definindo tal parâmetro como “Módulo de Reação do subleito” (BALBO, 2002, p. 2). Este modelo físico considera que a deflexão em qualquer ponto da placa é proporcional à pressão de reação no ponto considerado, sendo expressa pela seguinte equação (vide Figura 32) (RUFINO, 1997):

$$k = \frac{P}{w} \quad (3)$$

na qual

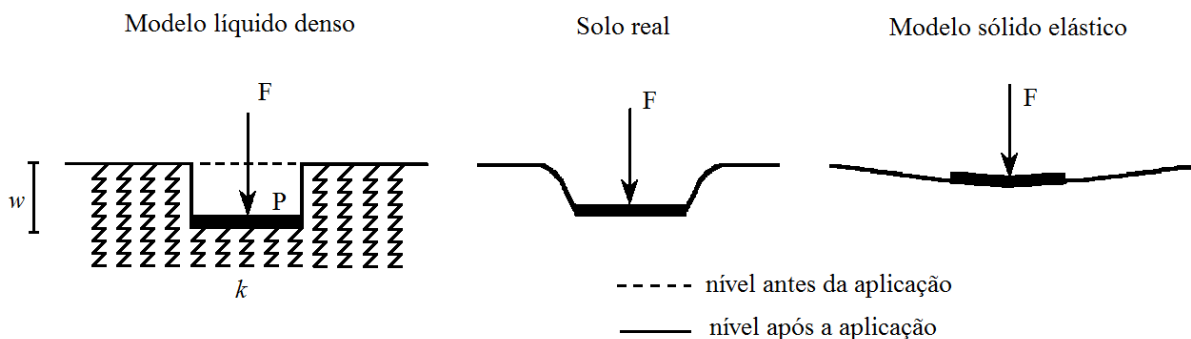
P : pressão exercida (MPa);

w : deslocamento (m) e

k : módulo de reação do subleito (MPa/m).

Vale ressaltar que outra modelagem considera o solo como um sólido elástico onde o deslocamento em um ponto é função também da tensão sobre os pontos vizinhos, sendo, então, contínua a distribuição de deslocamento na superfície. O solo real, porém, tem um comportamento entre esses dois modelos extremos: líquido denso e sólido elástico (vide Figura 32).

Figura 32 – Esquema que representa o Modelo líquido denso, Solo real e Modelo sólido elástico



Fonte: Rufino (1997).

⁶ Joseph Valentin Boussinesq (Saint-André-de-Sangonis, 13 de março de 1842 — Paris, 19 de fevereiro de 1929) foi um físico e matemático francês.

Westergaard⁷ deduz então suas equações considerando a não existência de transferência de cargas em juntas de placas. Tais equações foram obtidas empregando-se funções polinomiais para campos de deslocamentos, além de se assumir hipóteses simplificadoras para a integração da equação diferencial que governa as placas em flexão. Em suas deduções empregou-se o método de Ritz de aproximações sucessivas bem como o Teorema de Maxwell⁸ para deformações.

Utilizando um conceito de raio equivalente da seção resistente efetiva, Westergaard obteve soluções para o cálculo de tensões de tração na flexão no concreto para placas de dimensões semi-infinitas, conforme descritas pelas Equações 4, 5 e 6 para, o interior, canto e borda das placas, respectivamente (BALBO, 2002, p.2):

$$\sigma = \frac{0,572 \cdot Q}{h^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{\ell}{b} \right)^4 + 0,359 \right] \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{0,316 \cdot Q}{h^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{\ell}{b} \right)^4 + 1,069 \right] \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{3 \cdot Q}{h^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{a \cdot \sqrt{2}}{\ell} \right)^{0,6} \right] \quad (6)$$

nas quais

Q : Carga total aplicada;

h : Espessura da placa;

a : Raio da carga distribuída;

b : Raio equivalente da seção resistente efetiva, dado por:

$$b = (1,6 \cdot a^2 + h^2)^{0,5} - 0,675 \cdot h \quad (7)$$

ℓ : Raio de rigidez relativa, obtido a partir da relação:

$$\ell^4 = \frac{D}{k} \quad (8)$$

⁷ Harald Malcolm Westergaard (Copenhague, 9 de outubro de 1888 — 22 de junho de 1950) foi um engenheiro e matemático estadunidense nascido na Dinamarca.

⁸ Teorema das deformações recíprocas, estabelece que a deflexão em um ponto A de uma estrutura produzida por uma carga aplicada em outro ponto B é igual à deformação no ponto B produzida pela mesma carga no ponto A.

na qual

D : Módulo de Rigidez à flexão da placa, dado por (MARQUES, 2014):

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \quad (9)$$

na qual

E : Módulo de Elasticidade longitudinal (módulo de Young);

μ : Coeficiente de Poisson do concreto e

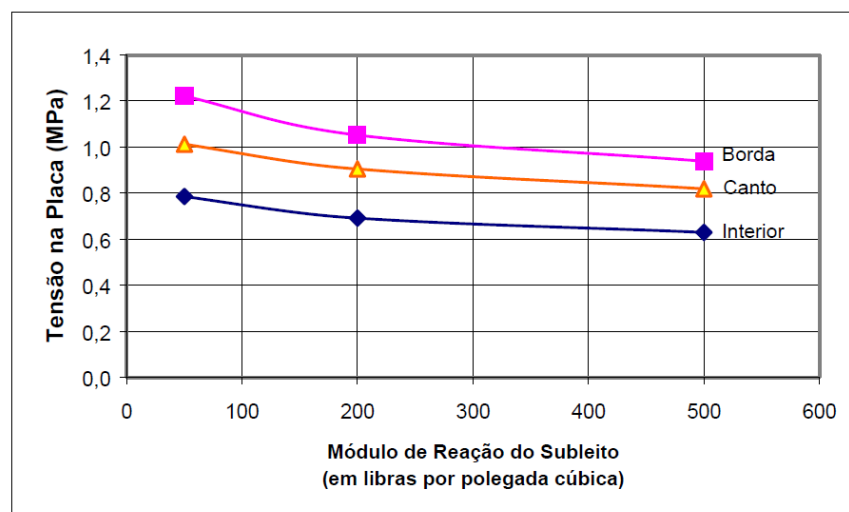
k : Módulo de Reação do subleito.

e

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}} \quad (10)$$

Na Figura 33, apresenta-se a influência da posição da carga na máxima tensão desenvolvida em uma placa com 200 mm de espessura (h), módulo de elasticidade (E) de 28.000 MPa, coeficiente de Poisson (μ) de 0,15, raio da área de contato da carga (a) de 112,5 mm e carga aplicada sobre uma roda (Q) de 20,41 kN.

Figura 33 – Tensões de borda, canto e interna à uma placa em função do módulo de reação do subleito



Fonte: Balbo (2002).

Note-se pela Figura 33 que a variação do local de aplicação da carga na placa interfere na magnitude do esforço de tensão de tração na flexão da placa de concreto. A partir desses gráficos, infere-se que as cargas sobre bordas de placas resultam em tensões maiores que aquelas devidas a cargas de canto, seguidas daquelas devidas a cargas internas à placa de concreto. Observa-se também que, para uma faixa de variação de k entre 50 (baixo suporte) e 200 lb/in^3 (excelente suporte) há um decréscimo nas tensões na placa de concreto na ordem de 10%.

Fica patente, portanto, que tal módulo de reação do subleito exerce um efeito menor no dimensionamento de um pavimento de concreto comparado à própria espessura da placa.

Dada uma carga constante, Q , infere-se, a partir das equações de Westergaard, que:

- A dimensão da roda influi na tensão resultante na placa: à medida que o raio da carga aumenta a tensão de tração na flexão diminui;
- As tensões não aumentam na mesma proporção em que as cargas são incrementadas; pois estão em função de parâmetros não lineares;
- As respostas na variação da tensão na placa são pouco sensíveis a incrementos em k , comparados aos na espessura.

❖ Cartas de influência de Pickett e Ray

Em virtude da expansão da malha rodoviária e aeroportuária nos anos pós Grande Guerra, com paralelo incremento de carga em veículos e o emprego de eixos com múltiplas rodas, culminou por exigir-se a consolidação de métodos de cálculo de momentos fletores (e tensões de tração na flexão) resultantes da aplicação de várias cargas sobre uma mesma placa de concreto.

Em 1951, Pickett e Ray construíram uma série de figuras conhecidas por “Cartas de Influência” que se prestavam à obtenção de deflexões e momentos fletores em placas de concreto sob a ação de cargas posicionadas sobre cantos, bordas ou no centro das placas.

Dentre as oito cartas, na carta de número 6 (vide Figura 34) empregou-se a equação do cômputo da deflexão (ω) causada por uma carga distribuída próxima ao bordo transversal da placa, em uma modificação da teoria original proposta por Westergaard em 1948 (Equação 11), a saber (BALBO, 2002, p. 5):

$$\omega = \frac{(2 \cdot P)}{(\pi \cdot k \cdot \ell)} \int_0^{\infty} \frac{\gamma \cdot \cos \frac{\alpha X}{\ell} \cdot \left[\cos \frac{\beta Y}{\ell} + (1 - \mu) \cdot \alpha^2 \cdot \text{sen} \frac{\beta Y}{\ell} \right] \cdot e^{-\frac{\gamma Y}{\ell}}}{1 + 4 \cdot (1 - \mu) \cdot \alpha^2 \cdot \gamma^2 - (1 - \mu)^2 \cdot \alpha^4} d\alpha \quad (11)$$

na qual

P : Carga aplicada;

α , β e γ : Números reais positivos, tais que

$$\alpha^2 + \beta^2 = \gamma^2 \quad (12)$$

$$2 \cdot \beta \cdot \gamma = 1 \quad (13)$$

k e ℓ : (já citados).

Na integração numérica da equação acima, Pickett e Ray assumiram que o valor do coeficiente de Poisson do concreto seria constante e igual a 0,15. Recorrendo à curvatura da placa em flexão, uma vez conhecida a citada equação da linha elástica de Westergaard, a tensão de tração na flexão na face inferior da placa, na direção x (sentido do tráfego), foi obtida pela expressão:

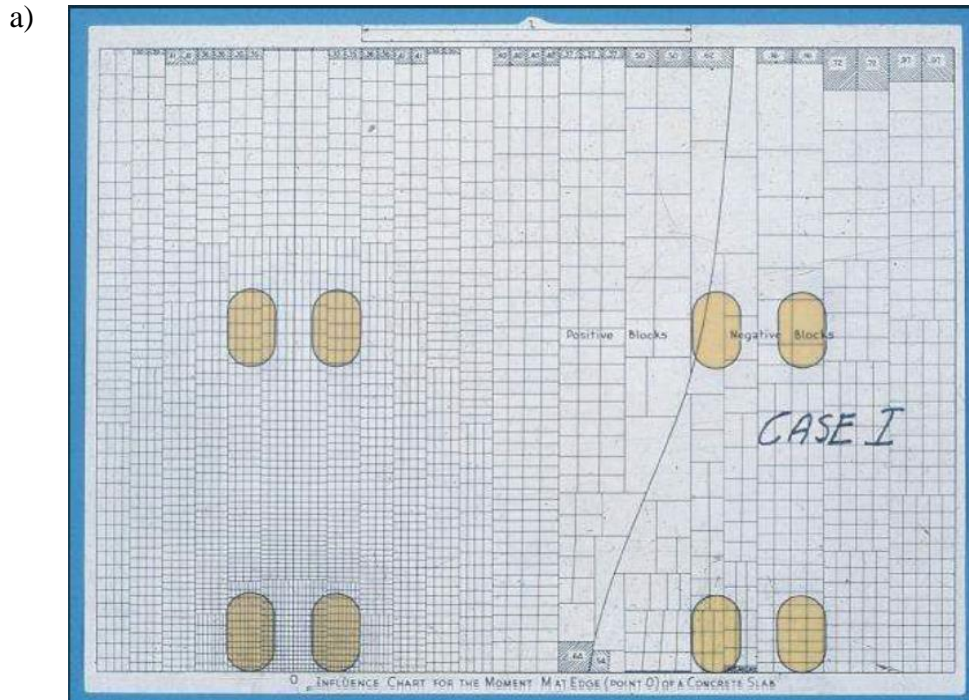
$$\sigma = -\frac{E \cdot h}{2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad (14)$$

na qual

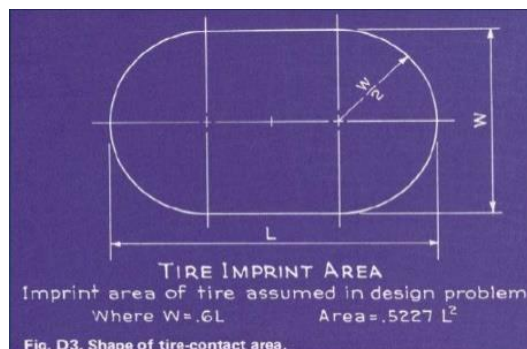
ω : deflexão devido a uma carga distribuída posicionada na borda (junta) da placa.

E e h : (já citados).

Figura 34 – Carta de influência nº 6, de Pickett e Ray. Em (a) gráfico para o momento na borda (ponto 0); em (b) esquema da área de contato do pneu assumida no projeto



(b)



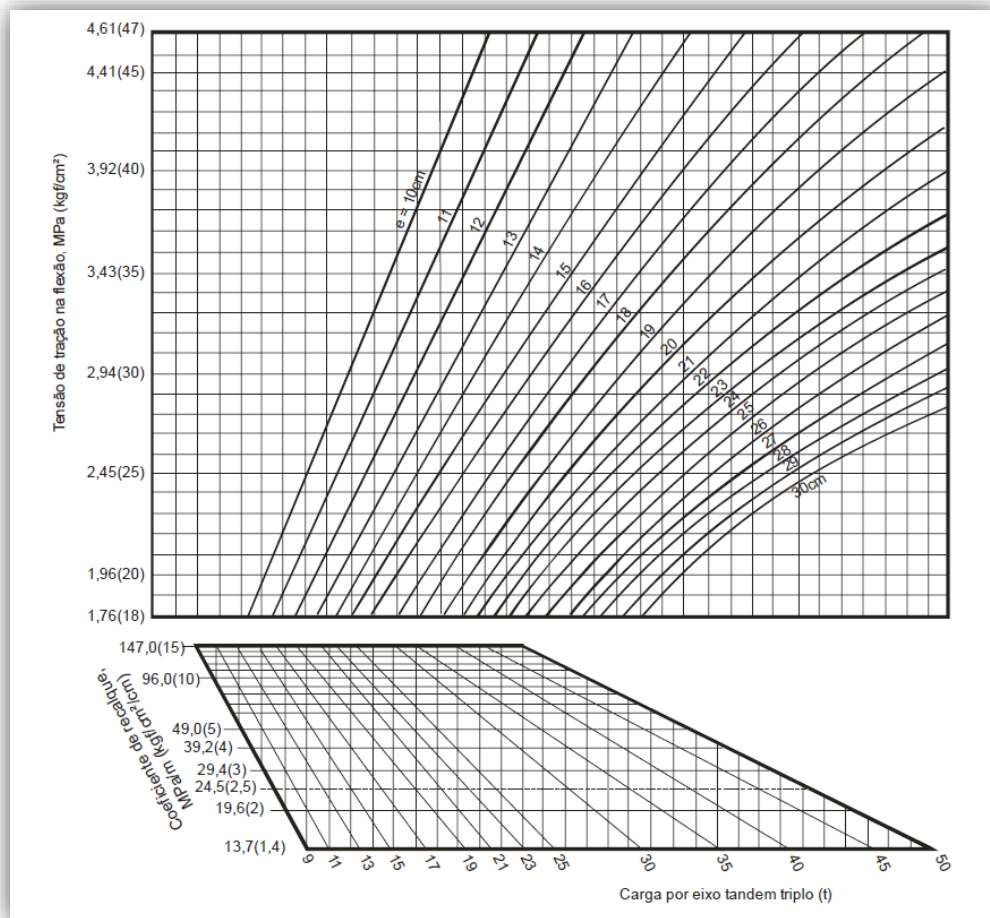
Fonte: Carvalho (2017).

❖ Método PCA de 1966

O método de projeto proposto pela PCA de 1966 remonta ao emprego da equação de Westergaard de 1948 para cargas sobre a borda de placas com o auxílio das cartas de influência desenvolvidas por Pickett e Ray para simplificar o emprego das fórmulas de Westergaard.

Numa época já com acesso aos computadores, a PCA (1966) propõe ábacos para o cálculo de tensões que foram desenvolvidos após manipulação computacional das cartas de influência de Pickett e Ray pelos próprios autores (vide Figura 35).

Figura 35 – Ábaco de Pickett e Ray, para o Caso I, Carta de influência n° 6



Fonte: DNIT (2005).

Nesse ábaco, admitida uma espessura para a placa de concreto e conhecidos os valores de k e o tipo de eixo, bem como a carga sobre o mesmo, obtém-se a tensão máxima na face interior da placa, quando a carga está próxima à junta (borda transversal) da placa.

O método PCA de 1966 passou a adotar como alternativa ao apoio diretamente no subleito o uso de uma camada delgada de sub-base, que tem as seguintes funções:

- Proporcionar suporte razoável, uniforme e constante;
- Eliminar a ocorrência do fenômeno de bombeamento dos finos do subleito;
- Aumentar o módulo de reação do subleito de cálculo, trazendo, portanto, uma certa economia na espessura da placa de concreto.

De acordo com Rufino (1997) os estudos de Westergaard foram concebidos para se analisar um sistema composto por apenas duas camadas (placa e suporte), não se podendo aplicar suas modelagens quando existir uma camada de propriedades diferentes entre o subleito

e a placa. Segundo Stock (1981 *apud* RUFINO, 1997) no caso de essa camada intermediária ser relativamente rígida, pode-se utilizar um método proposto por Fukuda em 1975. Este método consiste na substituição de duas placas por uma com espessura equivalente ao do sistema, a qual é obtida a partir das espessuras e propriedades elásticas dos materiais de cada camada (coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade).

O método permite o uso de correlações que envolvem o valor do módulo de reação do subleito, o tipo de material e a espessura da sub-base, dispondo-se de ábaco apropriado para tanto. O emprego de sub-bases estabilizadas com cimento é indicado quando se trata de projetos importantes e quando se tiver tráfego pesado.

Um avanço considerável foi a introdução no método PCA de 1966 do conceito de consumo de resistência à fadiga (CRF) do concreto no dimensionamento da espessura da placa. Isto se concretizou face aos estudos experimentais em laboratório conduzidos por Hilsdorf e Kesler, em 1966 (BALBO, 2002).

Empregando corpos de prova prismáticos de concreto, estabeleceu-se um modelo experimental de fadiga por meio de ensaios dinâmicos, relacionando o número de ciclos (N) à fadiga verificada em laboratório para um dado nível de tensão atuante no concreto, dado por

$$\log_{10} N_f = \frac{0,9718 - S_r}{0,0828} \quad (15)$$

na qual

S_r : Razão entre a tensão de tração aplicada no concreto (σ_t) e sua resistência à tração na flexão (fct, m), também denominada “relação entre tensões”.

Tais ensaios permitiram inferir na época que para valores de S_r de 0,5 ou inferiores não ocorreria ruptura por fadiga do concreto (em laboratório). Maiores detalhes acerca do cômputo do CRF serão apresentados na Seção 3.1.1.2.

❖ Análises computacionais iniciais (origem do PCA de 1984)

Estudos feitos por Packard e Tayabji, e que deram origem ao PCA de 1984, empregando um programa de modelagem de tensões (*J-Slab*) pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) para o cômputo dos efeitos de cargas sobre placas de concreto, permitiram considerar suas dimensões finitas, a presença de barras de transferência de cargas, existência ou não de acostamentos em concreto, contribuição estrutural das sub-bases de concreto pobre (CCR), suprimindo, desta maneira, várias limitações dos modelos teóricos descritos.

O modelo de fadiga do método de 1966 foi modificado, acrescentando-se uma função parabólica para valores de S_r entre 0,55 e 0,45, mantendo-se o modelo anterior para $S_r > 0,55$ (modelo logarítmico) e $S_r < 0,45$ (ilimitadas repetições de carga), que será apresentada mais adiante. Além do modo de ruptura por fadiga, herdado da versão de 1966, a PCA leva em consideração as conclusões oriundas da *AASHO Road Test*, sobre processos de ruptura das estruturas de pavimento, e desenvolve o modelo de dano por erosão (BALBO, 2002).

Simulando-se situações de projeto, concluiu-se que as tensões tabuladas a partir do MEF para cargas de borda deveriam ser multiplicadas por um fator de 0,89, garantindo igual consumo de fadiga para uma situação real de distribuição transversal do tráfego, resultando nas chamadas “tensões equivalentes” (este tema será abordado mais adiante na Seção 3.1.1.6).

Assim, o clássico sistema de placa apoiada em fundação contínua ou o de camadas múltiplas, Westergaard e Burmister⁹, respectivamente (DNIT, 2005), foi modificado com uso do Método dos Elementos Finitos (MEF).

3.1.1.2 Modelos de comportamento do pavimento

Devido às cargas móveis do tráfego o pavimento está sujeito a danos irreversíveis capazes de comprometer a vida útil de projeto. A seguir são apresentados os 3 (três) fenômenos de ruína que norteiam toda a análise estrutural de projeto de pavimentos rígidos simples pelo método PCA de 1984.

▪ Modo de dano por Fadiga

Relação de tensões. As tensões de tração na flexão consideradas no cálculo são as produzidas pela carga tangente à borda longitudinal e a meio caminho entre as juntas. Denominada de “relação de tensões” aquela entre a tensão de tração calculada considerando cada tipo de eixo e a resistência característica à tração na flexão do concreto (Equação 17), haverá um número limite de aplicações de determinada carga acima do qual o concreto romperá por efeito do fenômeno de fadiga (vide Figura 36). O critério de fadiga está ao lado da segurança, pois o método esclarece que, implicitamente, no ábaco de projeto, a resistência de projeto especificada para o concreto é minorada em termos de um coeficiente de variação de 15%, o que tornaria o modelo de fadiga mais conservador (DNIT, 2005).

⁹ Donald M. Burmister (1895 - 15 de maio de 1981) foi um professor de engenharia civil e um pioneiro no campo da mecânica dos solos e engenharia geotécnica.

$$S_r = \frac{\sigma_t}{f_{c,tf}} \quad (17)$$

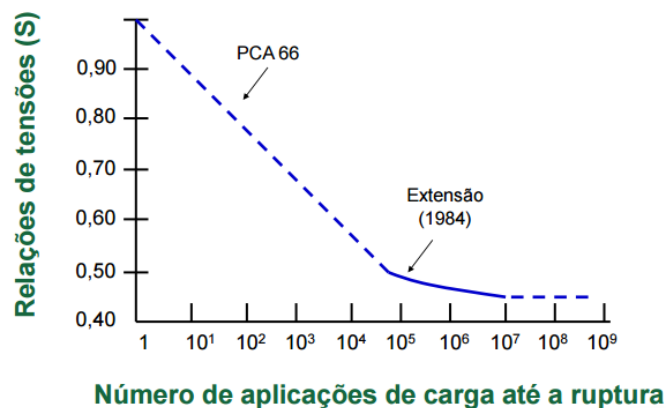
na qual

S_r : relação de tensões;

σ_t : tensão de tração na flexão e

$f_{c,tf}$: resistência característica à tração na flexão do concreto.

Figura 36 – Relação de tensões e número admissível de repetições de carga – curva de Fadiga (PCA de 1984)



Fonte: ABCP (2017).

Conforme citado, o método PCA de 1984 aprimorou o modelo de fadiga concebido pelo PCA de 1966, acrescentando-se uma função parabólica para valores de S_r (Equação 19). As equações de fadiga utilizadas no dimensionamento de pavimentos rígidos simples pelo método PCA de 1984 são as seguintes (PACKARD; TAYABJI, 1985):

$$N_f = \text{ilimitado} \quad \text{quando} \quad S_r < 0,45 \quad (18)$$

$$N_f = \left(\frac{4,2577}{S_r - 0,4325} \right)^{3,268} \quad \text{quando} \quad 0,45 \leq S_r \leq 0,55 \quad (19)$$

$$\log_{10}(N_f) = \left(\frac{0,9718 - S_r}{0,0828} \right) \quad \text{quando} \quad S_r > 0,55 \quad (20)$$

nas quais

N_f : Repetições admissíveis no modo de fadiga;

S_r : já definido;

No método, a Lei de Palmgren-Miner¹⁰ do dano acumulado por fadiga é a base do modelo comportamental do pavimento no que se refere ao fenômeno de fadiga. O consumo de resistência à fadiga (CRF) do concreto é a relação porcentual entre o número previsto de repetições de uma dada carga e o número admissível de repetições da mesma carga. Somando-se todos os (CRF) individuais, em todas as categorias de eixo consideradas, obtém-se o consumo total de resistência à fadiga para uma dada espessura-tentativa da laje de concreto. Para que esta espessura seja adequada, é preciso que o valor (CRF) total seja, por sua vez, igual ou inferior a 100% (DNIT, 2005).

$$CRF = 100 \cdot \sum_{i=1}^m n_i \left(\frac{C_1}{N_i} \right) \quad (21)$$

$$CRF \leq 100\% \quad (22)$$

na qual

CRF : Consumo de resistência à Fadiga;

n_i : Número de repetições previstas da carga;

N_i : Número de repetições admissíveis da carga e

C_1 : 0,06 para pavimentos sem acostamento e 0,94 para pavimentos com acostamento de concreto.

▪ Modo de dano por Erosão

A partir das análises computacionais de Packard e Tayabji considerando as conclusões da AASHO *Road Test* sobre processos de ruptura das estruturas de pavimento, desenvolveu-se o modelo de dano por erosão. Este fenômeno é decorrente do bombeamento da parcela fina do subleito e sub-base ocasionada pela repetição de eixos de carga pesada, nos cantos e bordas da laje, deixando vazios sob e adjacentes aos mesmos (PACKARD; TAYABJI, 1985).

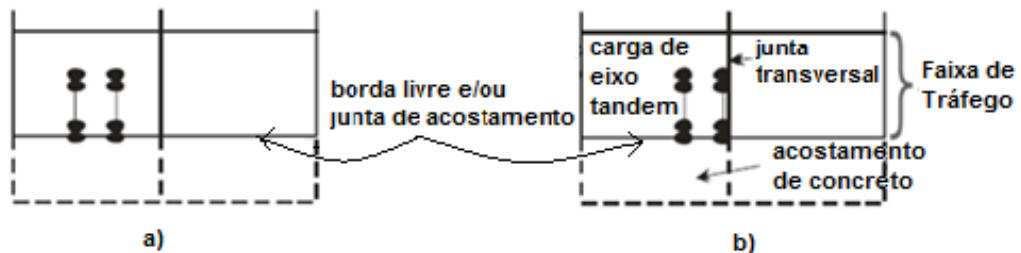
Posição crítica da carga quanto à erosão. O método considera que os danos por erosão estão mais relacionados com as deflexões do pavimento do que com as tensões de tração na

¹⁰ Esta lei determina que a parcela da resistência à fadiga não consumida por uma certa classe de carga fica disponível para uso por outras cargas, sendo que o dano total é a soma final dos consumos individuais da resistência à fadiga.

flexão. Os efeitos da erosão manifestam-se sob a forma de deflexões críticas nos cantos da placa causando escalonamentos ou "degraus" nas juntas transversais, especialmente aquelas desprovidas de barras de transferência (vide Figura 37) (DNIT, 2005).

O critério de erosão é mensurado pela potência ou taxa de trabalho com que uma carga de eixo desvia a laje, ou seja, é a razão entre o produto da pressão da carga aplicada pela deflexão e o raio de rigidez relativa (Equação 23). Com base nessa definição, um pavimento delgado, por ter um raio de curvatura curto, recebe um pulso de carga mais rápido do que uma laje mais espessa. Em outras palavras, para uma mesma potência e igual velocidade de caminhão, a laje mais fina é submetida a uma taxa mais rápida de trabalho ou potência (PACKARD; TAYABJI, 1985).

Figura 37 – Posições críticas de carga por eixo: a) Posição crítica para as tensões de tração na flexão, e b) Posição crítica de carga para as deformações por erosão



Fonte: DNIT (2005).

$$P = \text{power} \cong \frac{p \cdot w}{\ell/v} \cdot C/k^{0,0633} \quad (23)$$

$$P = \frac{p \cdot w}{h} \cdot k^{0,27} \cdot 268,7 \quad (24)$$

Pela Equação (3), tem-se que $k = \frac{p}{w}$, então,

$$P = 268,7 \cdot \frac{p^2}{h \cdot k^{0,73}} \quad (25)$$

nas quais (unidades mantidas – PACKARD; TAYABJI, 1985)

P : potência, taxa de trabalho ou fator de erosão (FE) (inch-pound/s);

p : pressão na interface laje-fundação no canto da placa (psi);

w : deslocamento vertical no canto da placa (in);

ℓ : raio de rigidez relativa (in);

v : velocidade do caminhão (in/s);

C : constante;

k : módulo de reação do subleito (pci) e

h : espessura da laje (in).

Finalmente, Packard e Tayabji (1985) propuseram a seguinte fórmula para o critério de erosão:

$$\log_{10} N = 14,524 - 6,777 \cdot (C_1 \cdot P - 9)^{0,103} \quad (26)$$

na qual

N : repetições admissíveis de carga por eixo para o período de projeto;

P : potência segundo a Equação 25 (em função de h e k);

C_1 : fator de ajustamento: 1,0 para sub-bases de solo (não tratadas) e 0,9 para sub-bases estabilizadas quimicamente.

O consumo do dano por erosão (CDE) é dado por:

$$CDE = 100 \cdot \sum_{i=1}^m n_i \left(\frac{C_2}{N_i} \right) \quad (27)$$

$$CDE \leq 100\% \quad (28)$$

na qual

CDE : Consumo do dano por Erosão;

n_i : número de repetições previstas de carga por eixo;

N_i : número de repetições admissíveis de carga por eixo e

C_2 : 0,06 para pavimentos sem acostamento e 0,94 para pavimentos com acostamento de concreto (vide Seção 3.1.1.6).

▪ Escalonamento

O escalonamento (degraus) é o fenômeno que ocorre devido ao deslocamento relativo entre placas sucessivas, durante a passagem de carga, e está intimamente ligado à eficiência das juntas (vide Figura 38).

O escalonamento é calculado pela seguinte fórmula:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot d'}{d + d'} \cdot 100 (\%) \quad (29)$$

na qual

ε : escalonamento em porcentagem;

d : deslocamento vertical do lado carregado da junta e

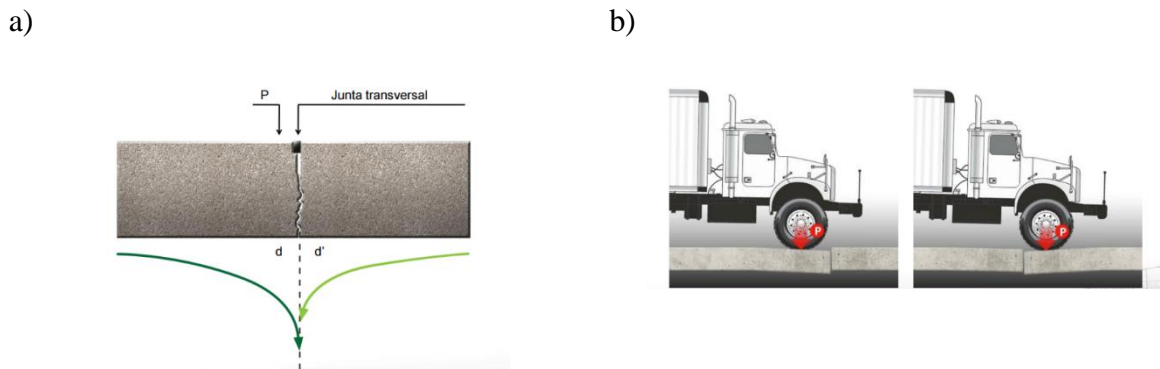
d' : idem, do lado descarregado da junta.

Para mitigar ou mesmo eliminar o fenômeno de escalonamento nas juntas o método recomenda projetar os pavimentos rígidos com a característica e componentes a seguir (vide Figura 39):

- Placas curtas;
- Barras de transferência e
- Sub-base estabilizada com cimento.

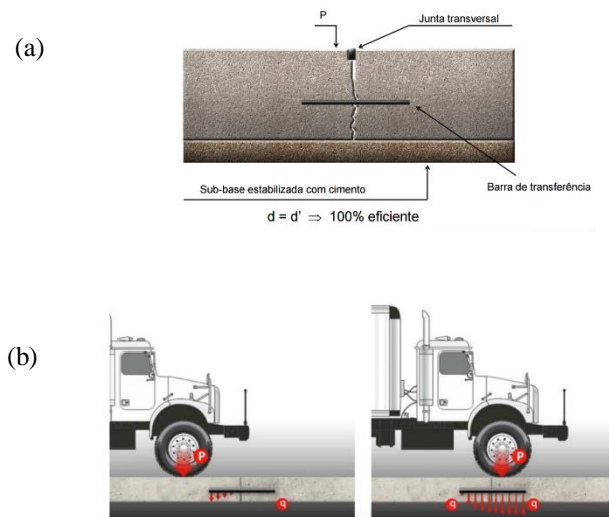
Os danos causados pela deformação devido ao escalonamentos nas juntas transversais foram incorporados ao modelo de erosão através de estudos de Packard e de Brokaw, em que o índice de serventia do pavimento é função do grau de escalonamento, da intensidade do tráfego e da espessura da placa, incluindo fatores não considerados nos modelos baseados exclusivamente na Pista Experimental da AASHO, como: juntas sem barras de transferência, sub-bases estáveis e acostamentos de concreto (DNIT, 2005).

Figura 38– Escalonamento e ineficiência de junta quanto à transferência de carga devido à ausência de barras de transferência de carga. Em (a) vista em corte da placa do pavimento rígido; em (b) representação do escalonamento durante a passagem de eixo de um veículo pesado



Fonte: ABCP (2017).

Figura 39 – Eficiência de junta quanto à transferência de carga devido à presença de barras de transferência de carga. Em (a) vista em corte da placa do pavimento rígido; em (b) representação da performance das barras de transferência de carga durante a passagem de eixo de um veículo pesado



Fonte: ABCP (2017).

3.1.1.3 Características do concreto

O método incorpora automaticamente o aumento de resistência do concreto à tração na flexão após os 28 dias, que continua sendo a idade base para fixação da resistência característica. Esta alteração é baseada em uma análise que incrementa ganhos de resistência do concreto e de repetições de cargas, mês a mês para um período de projeto de 20 anos. O

efeito está incluso nos gráficos e tabelas de projeto para que o usuário simplesmente insira o valor da resistência do concreto aos 28 dias.

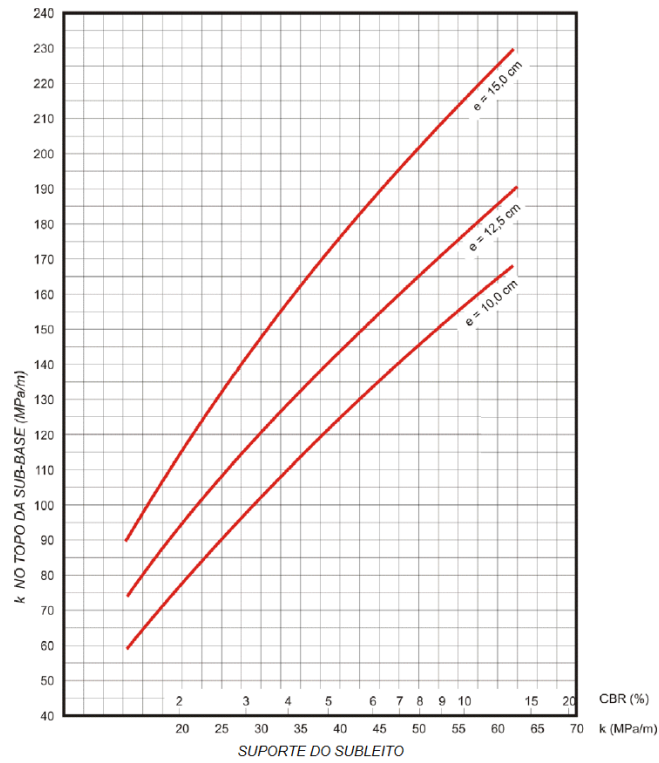
Da mesma forma estão embutidas no procedimento de projeto as alterações na resistência do concreto pela adoção de um coeficiente de variação de 15%, equivalente a um controle de qualidade entre regular e bom, conforme o *American Concrete Institute* (ACI 214R-11). As variações na resistência do concreto têm maior efeito estrutural do que as variações nas propriedades de outros materiais como: subleito, sub-base e as espessuras das camadas (DNIT, 2005).

3.1.1.4 Módulo de reação do sistema da fundação

Para a avaliação do coeficiente de recalque, k , do sistema da fundação, pode-se utilizar ábacos como, por exemplo, os representados pelas Figuras 40 e 41, correspondentes à sub-base de concreto pobre rolado e de brita graduada tratada com cimento, respectivamente, nas quais e representa a espessura da camada de sub-base em questão. Recomenda-se, por questão de segurança, limitar o valor máximo do coeficiente de recalque no topo da sub-base, a ser considerado no cálculo da espessura necessária de concreto, em cerca de 150 MPa/m.

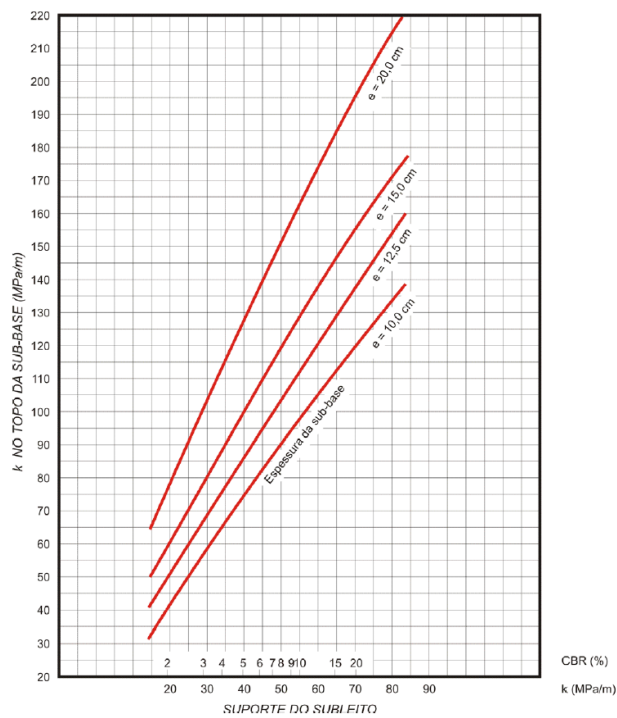
Para fins de averiguação, sempre que possível, a determinação do coeficiente de recalque no topo da sub-base deve ser efetuada por meio da prova de carga estática, conforme citado na Seção 2.1.1.7 “Características do subleito” (DNIT, 2005).

Figura 40 – Aumento de k devido à presença de sub-base de concreto rolado



Fonte: DNIT (2005).

Figura 41 – Aumento de k devido à presença de sub-base de brita tratada com cimento



Fonte: DNIT (2005).

- Sub-bases tratadas com cimento

Foram apresentados na Seção 2.1.1.6.1 os tipos de sub-base tratada com cimento, altamente recomendáveis pelo método. As sub-bases tratadas com cimento proporcionam suporte de alto valor, não são bombeáveis, resistem à erosão, além de possibilitarem economia de até 3 cm na espessura da placa do pavimento (vide Figura 42) (DNIT, 2005).

Figura 42 – Sub-base em concreto compactado a rolo - CCR



Fonte: capturada pelo próprio autor (2013).

3.1.1.5 Condições de contorno no pavimento rígido simples

O projeto de pavimentos rígidos depende das condições de contorno das placas, que vão interferir diretamente na espessura final da laje de concreto. As configurações das condições de contorno utilizadas pelo método PCA de 1984, são:

- Pavimento rígido simples sem barras de transferência e sem acostamento;
- Pavimento rígido simples sem barras de transferência e com acostamento;
- Pavimento rígido simples com barras de transferência e sem acostamento;
- Pavimento rígido simples com barras de transferência e com acostamento.

Conforme já citado, o fenômeno de ruína (fadiga, erosão e escalonamento) está intimamente ligado às condições de contorno de uma placa; o emprego de dispositivos como acostamentos e barras de transferência é imprescindível na durabilidade e economia de um pavimento de concreto. No cálculo do consumo da resistência à fadiga (*CRF*), o método

considera a influência da existência ou não de acostamentos, a espessura inicial da laje, o coeficiente de recalque do sistema de fundação e o tipo de eixo; já no caso do consumo de danos por erosão (*CDE*), além desses parâmetros, são levados em consideração os efeitos da existência ou não de barras de transferência de carga nas juntas. O método disponibiliza uma série de tabelas que são utilizadas no procedimento da avaliação de *CRF* e *CDE*, em função das condições de contorno da placa do pavimento (vide ANEXOS C e G, p.ex.).

▪ Juntas transversais

Conforme citado, a posição crítica da carga de projeto é próxima ou tangente à borda longitudinal e a meio caminho entre duas juntas, no que se refere às tensões de tração por flexão.

Para a análise de fadiga o método admite que as distâncias usuais entre juntas transversais e o sistema de transferência, se feito por entrosagem dos agregados ou por barras de transferência de carga, não influem na avaliação do nível crítico de tensões.

Também foi citado que na análise de erosão a deformação crítica se dá no canto da placa (vide Figura 37 b), quando a carga está tangenciando, simultaneamente, a borda longitudinal livre do pavimento e a junta transversal. Estudando essa condição de contorno, nota-se que a eficácia do sistema de transferência de carga, quer entre placas (juntas transversais) quer entre placas e acostamentos, tem um desempenho preponderante no comportamento do pavimento.

Barras de transferência de carga. Comparando-se pavimentos com e sem barras de transferência de carga (BT), verifica-se que a contribuição destas barras pode ser tão grande a ponto de trazer uma economia de até 5 cm na espessura na placa, no caso de cotejo com pavimentos sem acostamento de concreto e sem sub-base, para tráfego pesado (vide Figura 39) (DNIT, 2005).

▪ Acostamento de concreto

A existência de acostamento de concreto faz decrescerem as tensões na borda quando ele é ligado de alguma forma ao pavimento, quer por barras de ligação quer por uma articulação do tipo de encaixe macho-fêmea, com melhor desempenho do primeiro tipo.

O efeito dos acostamentos de concreto é substancial na redução das deformações verticais ao longo da borda no pavimento. O modelo estrutural computa uma eficiência de junta da ordem de 65%, no caso de haver ligação entre o acostamento e o pavimento. A adoção de um acostamento de concreto pode resultar em até cerca de 4 cm na redução da espessura necessária de placa, dependendo dos demais parâmetros de projeto (DNIT, 2005).

Evidentemente que, ao se adotar determinada condição de contorno, gera-se um custo adicional que deve ser computado no custo total do pavimento. Caberá, portanto, ao projetista efetuar uma análise estrutural levando-se em consideração a relação custo-benefício.

3.1.1.6 Tráfego (distribuição, contagem e tipo de eixo)

Apesar da importância do estudo do tráfego à implementação de um bom projeto de estrada, por questão de foco, serão apresentadas de forma expedita os tópicos que governam o dimensionamento de um pavimento rodoviário, neste aspecto.

▪ Distribuição do tráfego (tensões equivalentes)

A análise de cargas através do programa *J-Slab* (MEF), realizada por Packard e Tayabji (1985), possibilitou visualizar que as tensões críticas ocorrem quando o eixo está posicionado no centro da placa e a roda externa tangencia a borda longitudinal.

As cargas das rodas do caminhão colocadas na borda externa do pavimento criam condições mais críticas do que qualquer outra posição de carga. Porém, apenas uma pequena fração de caminhões trafega com as rodas externas rentes à borda. De acordo com Packard e Tayabji (1985), a maioria dos caminhões circula com sua roda externa à cerca de 60 cm da borda e que estudos mostraram pouca invasão de caminhão na borda do pavimento para pistas de 3,60 m com acostamentos.

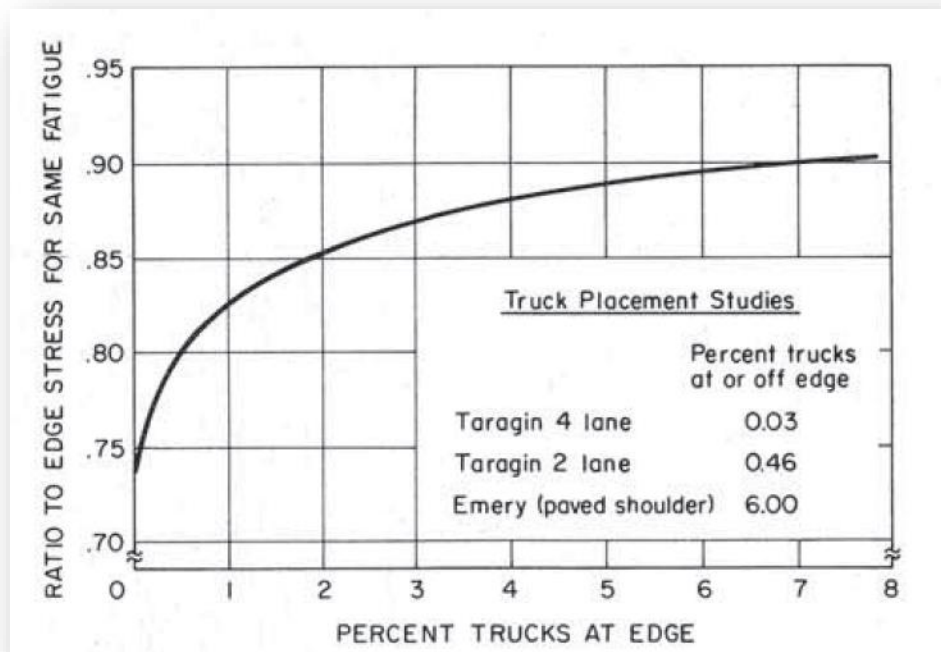
De fato, pesquisas mencionadas por Packard e Tayabji (1985) indicaram que apenas 6% dos eixos, nas avaliações mais pessimistas, estariam posicionados sobre a borda longitudinal das placas, resultando em consumos de resistência à fadiga diferenciados em relação aos 94% restantes dos eixos, mais centralizados sobre as placas.

Por conseguinte, simulando-se situações de projeto por meio de análises numéricas, concluiu-se que as tensões tabuladas a partir do MEF para cargas de borda deveriam ser multiplicadas por um fator de 0,89, para se garantir igual consumo de fadiga simulado para uma situação real de distribuição transversal do tráfego nas pistas de rolamento, resultando nas chamadas “tensões equivalentes” (vide Figura 43).

Para a análise da erosão, que envolve a deflexão no canto da laje, assume-se novamente o caso mais grave (6% dos caminhões na borda). Onde não há acostamento de concreto, cargas de canto são críticas (6% dos caminhões); e onde há um acostamento de concreto, o maior número de cargas no canto do pavimento é crítico (94% dos caminhões). Esses fatores são igualmente incorporados nas fórmulas do cálculo dos consumos de fadiga e de erosão (vide Equações 21 e 27).

Para se calcular o número de repetições admissíveis para cada tipo de carga, o método PCA de 1984 disponibiliza tabelas para o cômputo da tensão equivalente e do fator de erosão para cada categoria de eixo, em função da espessura da placa e de suas condições de contorno, conforme apresentado mais adiante (Seção 3.1.2).

Figura 43 – O fator de tensão equivalente de borda depende da porcentagem de caminhões trafegando na borda



Fonte: Packard e Tayabji (1985).

- Contagem de tráfego (número de eixo)

Para o dimensionamento da espessura do pavimento deve-se inicialmente calcular-se o número de eixos totais por classe de carga e categoria de eixo que irão atuar no pavimento durante o período de projeto previsto (vida útil).

Para construção ou reabilitação de rodovias importantes os órgãos competentes realizam pesquisas de tráfego por meio de contagem, *in situ*, classificando os veículos e projetando o volume de tráfego ao longo de toda a vida útil de projeto. Todo este processo culminará em uma planilha de dados, como a figura trazida no ANEXO A deste estudo. No presente estudo, dados inerentes ao tráfego serão assumidos como já determinados.

- Tipos de eixo

A nova versão da PCA (1984) passou a considerar no cômputo de CRF e CDE, além dos efeitos dos eixos simples e tandem duplo presentes na versão anterior (1966), os efeitos do eixo tandem triplo. Os Limites Legais de carga por tipo de eixo praticados no Brasil são (CONTRAN, Resolução nº 210/06):

- Eixo simples com rodagem simples: 6 tf;
- Eixo simples com rodagem dupla: 10 tf;

- Eixo duplo tandem com rodagem dupla: 17 tf;
- Eixo triplo tandem com rodagem dupla: 25,5 tf;

3.1.1.7 Fatores de segurança para cargas

Os fatores de segurança em relação às cargas foram estabelecidos com base na análise dos resultados das observações das pistas experimentais de BATES, 1924; MARYLAND, 1952, e AASHO (hoje AASHTO), 1962, além de milhares de quilômetros de estradas em serviço. O método recomenda os seguintes níveis de fator de segurança de carga (FSC) apresentados na Figura 44 (DNIT, 2005).

Figura 44 – Quadro com fator de segurança para a carga (FSC)

Tipo de Pavimento	FSC
– para ruas com tráfego com pequena porcentagem de caminhões e pisos em condições semelhantes de tráfego (estacionamentos, por exemplo)	1,0
– para estradas e vias com moderada frequência de caminhões	1,1
– para altos volumes de caminhões	1,2
– pavimentos que necessitem de um desempenho acima do normal	Até 1,5

Fonte: DNIT (2005).

O método explica que além dos fatores de segurança de carga, um certo grau de conservadorismo é fornecido no procedimento de projeto, para compensar imprevistos como sobrecargas de caminhões e variações construtivas nas propriedades do material e na espessura das camadas. Esclarece ainda que o uso de um fator de segurança de carga tão alto quanto 1,3 pode ser justificado quando se deseja obter um nível de capacidade de serviço superior ao normal, durante o período de projeto do pavimento.

É importante ressaltar que possíveis excessos de carga, além do limite legal, presentes no estudo de tráfego, acrescidos de um FSC maior que 1, devem ser analisados com critério, evitando-se superposição de efeitos que possam levar ao dimensionamento com folga do pavimento.

Tendo em vista a evolução do transporte terrestre de cargas pesadas ao longo do tempo, desde as observações das pistas experimentais de BATES até os dias atuais, faz-se necessário um estudo bem fundamentado por parte do DNIT, para adaptar o método PCA de 1984 à

realidade local, sobretudo no que diz respeito ao fator de segurança de carga, modelo de erosão, tensão equivalente e módulo de reação equivalente do subleito.

3.1.2 Projeto da espessura do pavimento rígido simples

Nesta seção serão apresentados o roteiro para o cálculo da espessura do pavimento rígido simples e o respectivo fluxograma, para fixação dos passos.

Conforme citado na Seção 1.3 (Justificativa), o método PCA de 1984 é provido de diversos quadros e ábacos necessários ao dimensionamento da espessura do pavimento rígido não armado. Também foi dito na Seção 1.4.2 (Objetivos específicos) que no Brasil o órgão responsável pelas rodovias federais, DNIT, adotou (*ipsis litteris*) o método PCA de 1984 como guia para a confecção do Manual de Pavimentos Rígidos, MPR (DNIT, 2005).

Apresentam-se, a seguir, o título das planilhas, quadros e ábacos utilizados nos cálculos da espessura da placa, cujos exemplares estão dispostos no ANEXO deste trabalho.

Tráfego

- Número de eixos totais por classe de carga (ANEXO A).

Planilha de cálculo

- Formulário-tipo de dimensionamento da espessura do pavimento (ANEXO B).

Tensão equivalente

- Tensão equivalente para eixos simples (ES) e eixos tandem duplos (ETD) (pavimento sem acostamento de concreto) (ANEXO C);
- Tensão equivalente para eixos tandem triplos (ETT) (pavimento sem acostamento de concreto) (ANEXO D);
- Tensão equivalente para ES e ETD (pavimento com acostamento de concreto);
- Tensão equivalente para ETT (pavimento com acostamento de concreto);

Fator de erosão

- Fator de erosão para ES e ETD (junta sem barras de transferência, pavimento sem acostamento de concreto) (ANEXO E);
- Fator de erosão para ETT (junta sem barras de transferência, pavimento sem acostamento de concreto) (ANEXO F);
- Fator de erosão ES e ETD (junta sem barras de transferência, pavimento com acostamento de concreto);

- Fator de erosão ETT (junta sem barras de transferência, pavimento com acostamento de concreto);
- Fator de erosão para ES e ETD (junta com barras de transferência, pavimento sem acostamento de concreto);
- Fator de erosão para ETT (junta com barras de transferência, pavimento sem acostamento de concreto);
- Fator de erosão para ES e ETD (junta com barras de transferência, pavimento com acostamento de concreto) e
- Fator de erosão ETT (junta com barras de transferência, pavimento com acostamento de concreto).

Repetições admissíveis por fadiga

- Número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga (pavimento com ou sem acostamento de concreto) – (Análise por Fadiga) (ANEXO G).

Repetições admissíveis por Erosão

- Número de repetições admissíveis em função do fator de erosão (pavimento sem acostamento de concreto) – (Análise por Erosão) (ANEXO H) e
- Número de repetições admissíveis em função do fator de erosão (pavimento com acostamento de concreto) – (Análise por Erosão) (ANEXO I).

3.1.2.1 Procedimento para o projeto de pavimento rígido simples pelo PCA de 1984

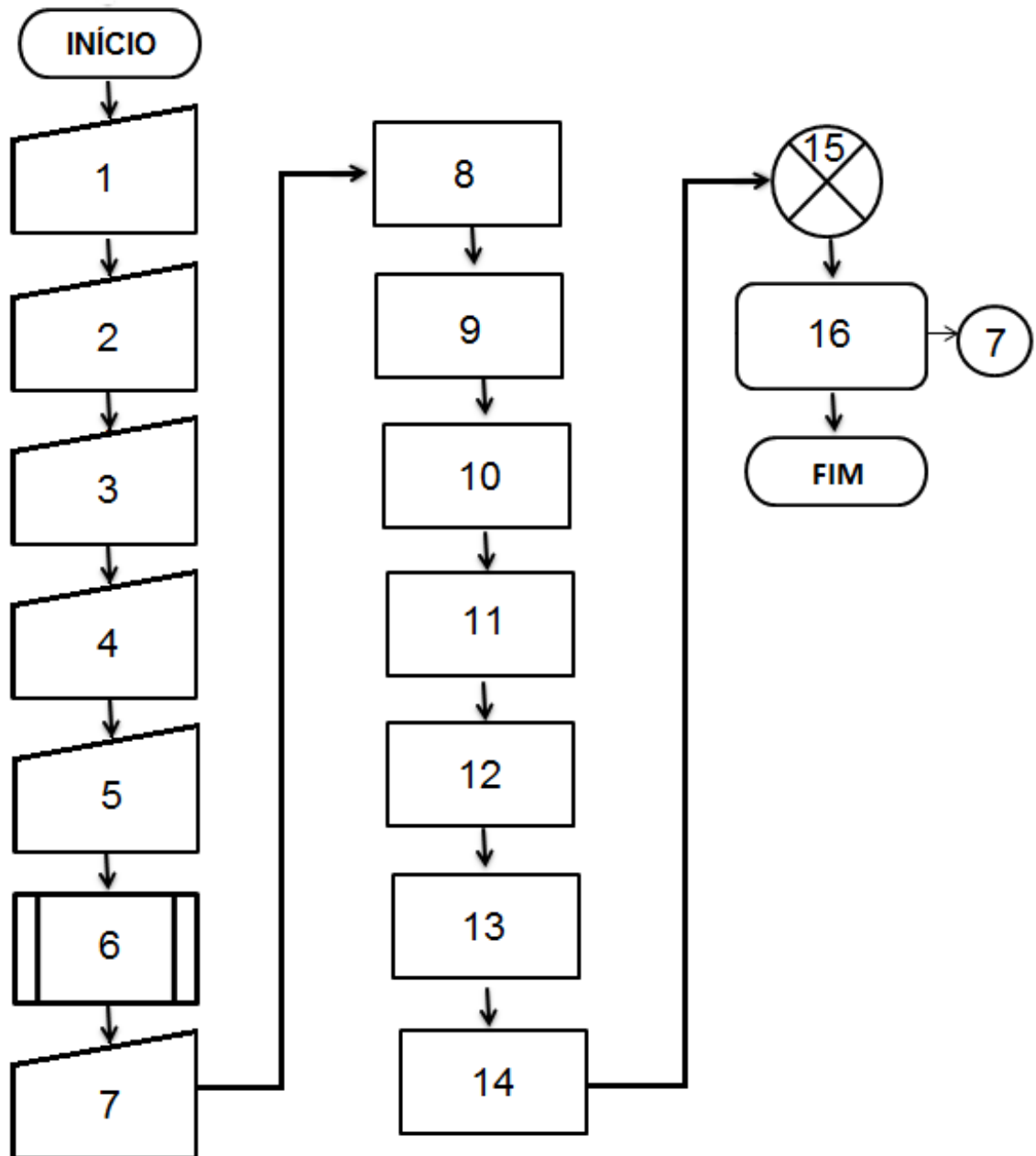
Os passos para o dimensionamento da espessura da base serão apresentados no Quadro 1, a seguir, e, na sequência, um fluxograma do projeto de pavimentos rígidos simples pelo PCA de 1984 (Figura 45).

Quadro 1 – Procedimento para o projeto de pavimento rígido simples pelo PCA de 1984

Passo	Atividade	Referência(Seção)
1	Selecionar o tipo de pavimento rígido: com ou sem barras de transferência; com ou sem acostamento de concreto	3.1.1.5
2	Definir o tipo e a espessura da sub-base	3.1.1.4
3	Determinar o Módulo de reação do sistema da fundação (k)	3.1.1.4
4	Selecionar a resistência característica do concreto à tração na flexão	3.1.1.3
5	Definir o fator de segurança de carga (FS)	3.1.1.7
6	Calcular as repetições previstas de cargas por eixo por grupo de eixo	
7	Definir uma espessura inicial da placa	3.1.1.6
8	Calcular a tensão equivalente de cada grupo de eixo. Entra-se com a espessura da placa estimada e o Módulo de reação (k) no Quadro de Tensão Equivalente correspondente e transporta o resultado para seu respectivo campo (8, 11 e 14) do ANEXO B.	ANEXOS B a D
9	Calcular o fator de fadiga de cada grupo de eixo. Divide-se a tensão equivalente de cada grupo de eixo (encontrada no passo 8) pela resistência característica do concreto à tração na flexão) e insere o resultado em seu respectivo campo (9, 12 e 15) do ANEXO B.	ANEXO B
10	Calcular os fatores de erosão de cada grupo de eixo. Entra-se com a espessura da placa estimada e o Módulo de reação (k) no Quadro de Fator de Erosão correspondente e transporta o resultado para seu respectivo campo (10, 13 e 16) do ANEXO B	ANEXOS E e F
11	Calcular as repetições admissíveis de cada carga por eixo de cada grupo de eixo para o consumo de resistência à fadiga. Entra-se no Ábaco de Análise de Fadiga com o fator de fadiga correspondente ao grupo de eixo para o cômputo das repetições para cada eixo de carga e transporta o respectivo resultado para a coluna 4 do ANEXO B.	ANEXO G
12	Calcular as repetições admissíveis de cada carga por eixo de cada grupo de eixo para o consumo de danos por erosão. Entra-se no Ábaco de Análise de Erosão com o fator de erosão correspondente ao grupo de eixo para o cômputo das repetições para cada eixo de carga e transporta o respectivo resultado para a coluna 6 do ANEXO B.	ANEXOS B e C
13	Calcular a razão das repetições esperadas de fadiga (Passo 11) pelas repetições permitidas e multiplicar por 100 para determinar a porcentagem de consumo de resistência à fadiga (coluna 5)	ANEXO B
14	Calcular a razão das repetições esperadas de erosão (Passo 12) pelas repetições permitidas e multiplicar por 100 para determinar a porcentagem de consumo de danos por erosão (coluna 7).	ANEXO B
15	Somar a porcentagem de fadiga de todas as cargas relevantes de cada grupo de eixos; similarmente, somar a porcentagem de erosão para todas as cargas relevantes de cada grupo de eixos.	ANEXO B
16	Repetir os Passos 7 a 15 até que os somatórios dos percentuais da fadiga e da erosão sejam iguais ou inferiores a 100%.	ANEXO B

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 45 – Fluxograma do projeto de pavimentos rígidos simples pelo PCA de 1984



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

3.1.2.3 Problema 1

- Quesito: cálculo da espessura de uma placa de concreto simples pelo método PCA de 1984.

Parâmetros de entrada de projeto:

- a) Sub-base de brita tratada com cimento, de 12 cm de espessura;

- b) Coeficiente de recalque do sistema: $k = 100$ MPa/m;
- c) Resistência característica do concreto à tração na flexão: $f_{ctk,f} = 4,8$ MPa;
- d) Fator de segurança de carga: $FSC = 1,2$;
- e) Pavimento sem acostamento e junta sem barras de transferência;
- f) Vida útil de projeto: 20 anos;
- g) Tráfego: é o indicado na última coluna do ANEXO A (Total de Eixos Solicitantes).

Será apresentada a seguir a resolução do problema 1, desenvolvida no formulário-tipo, (ANEXO B), com memorial descritivo, memória de cálculo dos principais passos e parecer conclusivo. Note-se que foram realizadas 2 (duas) tentativas para solucionar o problema (Figura 46 e Figura 47). Salienta-se que há excesso de carga no estudo de tráfego ora apresentado, considerando a Resolução nº 12/98 do CONTRAN (vide Seção 3.1.1.6).

a) Memorial descritivo da determinação das Tensões Equivalentes

Por se tratar de pavimento sem acostamento de concreto, utilizam-se os quadros dos ANEXOS C e D, com:

- ✓ $h = 25$ cm;
- ✓ $k_{sb} = 100$ MPa/m.

A tensão equivalente será:

- ✓ Eixo simples 1,14 MPa
- ✓ Eixo tandem duplo 0,99 MPa
- ✓ Eixo tandem triplo 0,727 MPa¹¹

b) Memorial descritivo da determinação dos Fatores de Erosão

Como a junta é isenta de barras de transferência e o pavimento não tem acostamento de concreto, utilizam-se os quadros dos ANEXOS G e H; com $h = 25$ cm e $k = 100$ MPa/m, o que resulta:

- ✓ Eixo Simples 2,72
- ✓ Eixo Tandem Duplo 2,89
- ✓ Eixo Tandem Triplo 2,92¹²

c) Memória de cálculo dos Fatores de Fadiga (F1, F2 e F3) dos Campos 9, 12 e 15 do Figura 46 para os eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, respectivamente

- ✓ Eixo Simples:

¹¹ Embora a variação da tensão equivalentes em função do k não seja linear, pode-se aceitar que assim o seja, para fins de interpolação, pois se está do lado da segurança.

¹² Para a interpolação dos eixos triplos também se supõe uma variação linear do k .

$$F1 = \frac{1,14}{4,8} = 0,238 \quad (30)$$

✓ Eixo Tandem Duplo:

$$F2 = \frac{0,99}{4,8} = 0,206 \quad (31)$$

✓ Eixo Tandem Triplo

$$F3 = \frac{0,727}{4,8} = 0,151 \quad (32)$$

d) Parecer conclusivo

O somatório do CRF satisfaz à restrição imposta pelo método (menor ou igual a 100%); o mesmo não ocorre com o somatório do CDE, que ultrapassa os 100% prescritos (vide Figura 46). Supondo-se que os parâmetros de projeto, exceto espessura, estejam bem estudados e definidos, seguindo a recomendação do método PCA de 1984, prioritariamente, deve-se efetuar nova iteração fazendo uso de uma espessura maior da placa. Na sequência será apresentada nova solução, utilizando-se 26 cm de espessura. Note-se que agora ambos os fatores satisfazem às restrições do método (vide Figura 47). Alternativamente, poder-se-ia manipular outros parâmetros de projeto como a sub-base ou o f_{cf} , por exemplo.

Figura 46 – Formulário-tipo (problema 1 – solução 1)

Espessura-tentativa (cm)	25,0		
Sub-base de brita tratada com cimento, espessura (cm)	12,0		
Ksb (MPa/m)	100		
Fator de segurança de cargas (Fsc)	1,2		
Resistência característica à tração na flexão (Mpa)	4,8		
Período do projeto (anos)	20	Sim	Não
Acostamento de concreto			X
Juntas com barras de transferência			X

Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x Fsc (tf)	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSIÃO	
			Nº de repetições admissíveis	Consumo de fadiga (%)	Nº de repetições admissíveis	Danos por erosão (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Eixo Simples			(8) Tensão Equivalente			1,14
			(9) Fator de Fadiga			0,238
			(10) Fator de Erosão			2,72
< 5	6,0	3.270.843	ilimitado	-	ilimitado	-
5 - 6	7,2	203.804	ilimitado	-	ilimitado	-
6 - 7	8,4	290.488	ilimitado	-	ilimitado	-
7 - 8	9,6	238.118	ilimitado	-	20.000.000	1,19
8 - 9	10,8	242.715	ilimitado	-	8.000.000	3,03
9 - 10	12,0	310.404	ilimitado	-	4.000.000	7,76
10 - 11	13,2	282.267	ilimitado	-	2.400.000	11,76
11 - 12	14,4	242.438	ilimitado	-	1.400.000	17,32
12 - 13	15,6	206.645	ilimitado	-	900.000	22,96
13 - 14	16,8	65.889	2.000.000	3,29	550.000	11,98
14 - 15	18,0	39.296	400.000	9,82	390.000	10,08
15 - 16	19,2	5.565	140.000	3,98	240.000	2,32
Eixos Tandem Duplos			(11) Tensão Equivalente			0,99
			(12) Fator de Fadiga			0,206
			(13) Fator de Erosão			2,89
< 13	15,6	182.532	ilimitado	-	18.000.000	1,01
13 - 14	16,8	5.565	ilimitado	-	8.000.000	0,07
14 - 15	18,0	12.243	ilimitado	-	7.000.000	0,17
15 - 16	19,2	12.243	ilimitado	-	4.000.000	0,31
16 - 17	20,4	17.808	ilimitado	-	2.900.000	0,61
17 - 18	21,6	30.051	ilimitado	-	1.900.000	1,58
18 - 19	22,8	23.373	ilimitado	-	1.500.000	1,56
19 - 20	24,0	17.808	ilimitado	-	1.300.000	1,37
20 - 21	25,2	17.808	ilimitado	-	900.000	1,98
21 - 22	26,4	12.243	ilimitado	-	610.000	2,01
22 - 23	27,6	5.565	ilimitado	-	510.000	1,09
23 - 24	28,8	5.565	ilimitado	-	410.000	1,36
Eixos Tandem Triplos			(14) Tensão Equivalente			0,73
			(15) Fator de Fadiga			0,151
			(16) Fator de Erosão			2,92
< 24	9,6	30.051	ilimitado	-	3.500.000	0,86
24 - 26	10,4	17.808	ilimitado	-	2.100.000	0,85
26 - 28	11,2	12.243	ilimitado	-	1.500.000	0,82
28 - 30	12,0	18.921	ilimitado	-	900.000	2,10
			TOTAL (%)	17,09	TOTAL (%)	106,15

Fonte: DNIT (2005).

Figura 47 – Formulário-tipo (problema 1 – solução 2)

Espessura-tentativa (cm)	26,0		
Sub-base de brita tratada com cimento, espessura (cm)	12,0		
Ksb (MPa/m)	100		
Fator de segurança de cargas (Fsc)	1,2		
Resistência característica à tração na flexão (Mpa)	4,8		
Período do projeto (anos)	20	Sim	Não
Acostamento de concreto			X
Juntas com barras de transferência			X

Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x Fsc (tf)	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSIÃO		
			Nº de repetições admissíveis	Consumo de fadiga (%)	Nº de repetições admissíveis	Danos por erosão (%)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
Eixo Simples				(8) Tensão Equivalente		1,08	
				(9) Fator de Fadiga		0,225	
				(10) Fator de Erosão		2,68	
<5	6,0	3.270.843	ilimitado	-	ilimitado	-	
5 - 6	7,2	203.804	ilimitado	-	ilimitado	-	
6 - 7	8,4	290.488	ilimitado	-	ilimitado	-	
7 - 8	9,6	238.118	ilimitado	-	20.100.000	1,18	
8 - 9	10,8	242.715	ilimitado	-	9.000.000	2,70	
9 - 10	12,0	310.404	ilimitado	-	4.900.000	6,33	
10 - 11	13,2	282.267	ilimitado	-	2.800.000	10,08	
11 - 12	14,4	242.438	ilimitado	-	1.500.000	16,16	
12 - 13	15,6	206.645	ilimitado	-	950.000	21,75	
13 - 14	16,8	65.889	10.000.000	0,66	650.000	10,14	
14 - 15	18,0	39.296	1.000.000	3,93	420.000	9,36	
15 - 16	19,2	5.565	280.000	1,99	300.000	1,86	
Eixos Tandem Duplos				(11) Tensão Equivalente		0,94	
				(12) Fator de Fadiga		0,196	
				(13) Fator de Erosão		2,86	
< 13	15,6	182.532	ilimitado	-	25.000.000	0,73	
13 - 14	16,8	5.565	ilimitado	-	15.000.000	0,04	
14 - 15	18,0	12.243	ilimitado	-	8.000.000	0,15	
15 - 16	19,2	12.243	ilimitado	-	4.500.000	0,27	
16 - 17	20,4	17.808	ilimitado	-	3.000.000	0,59	
17 - 18	21,6	30.051	ilimitado	-	2.200.000	1,37	
18 - 19	22,8	23.373	ilimitado	-	1.800.000	1,30	
19 - 20	24,0	17.808	ilimitado	-	1.450.000	1,23	
20 - 21	25,2	17.808	ilimitado	-	1.000.000	1,78	
21 - 22	26,4	12.243	ilimitado	-	800.000	1,53	
22 - 23	27,6	5.565	ilimitado	-	650.000	0,86	
23 - 24	28,8	5.565	ilimitado	-	490.000	1,14	
Eixos Tandem Triplos				(14) Tensão Equivalente		0,70	
				(15) Fator de Fadiga		0,145	
				(16) Fator de Erosão		2,88	
< 24	9,6	30.051	ilimitado	-	4.000.000	0,75	
24 - 26	10,4	17.808	ilimitado	-	2.200.000	0,81	
26 - 28	11,2	12.243	ilimitado	-	1.900.000	0,64	
28 - 30	12,0	18.921	ilimitado	-	1.300.000	1,46	
TOTAL (%)					6,58	TOTAL (%)	94,20

Fonte: DNIT (2005).

3.2 AUSTRROADS de 2010

Conforme citado na Seção 1.2, o guia de projeto de pavimentos rígidos simples da AUSTRROADS de 2010 é baseado nas recomendações do PCA de 1984. Segundo aquela organização: “Este método de projeto baseia-se no método estadunidense *Portland Cement Association* (PCA 1984; PACKARD 1984) com revisões para se adequar às condições australianas [...]”

Tais revisões são corroboradas, basicamente, por três aspectos. O primeiro deles está relacionado ao apoio elástico do subleito, pois, enquanto o PCA de 1984 faz uso do Módulo de reação, k , do subleito, o AUSTRROADS de 2010 utiliza para esta finalidade o *CBR* efetivo, que será devidamente esmiuçado mais adiante. Em seguida tem-se a questão do estudo de tráfego, cujas composições diferem nos tipos de eixo utilizados nos cálculos. Enquanto o PCA de 1984 utiliza apenas três tipos de eixo (simples, tandem duplo e tandem triplo), o AUSTRROADS de 2010 faz uso de até seis eixos. Por último, há uma diferença sutil, entre tais métodos, que está presente nas fórmulas para o cálculo da repetição admissível de carga por eixo; não somente na estruturação das fórmulas, mas também pela presença de alguns fatores em tais fórmulas do AUSTRROADS de 2010 e que não foram consideradas pelos autores do PCA de 1984. Tudo isto será facilmente detectado pelo leitor ao longo desta seção.

Portanto, esta seção será restrita à apresentação tão somente dos parâmetros, fórmulas e tabelas, imprescindíveis ao alcance do objetivo deste trabalho, já que os princípios e fundamentos apresentados na Seção 3.1, do método PCA de 1984, são os mesmos que regem o AUSTRROADS de 2010.

3.2.1 Considerações iniciais

Este guia AUSTRROADS fornece orientação sobre o projeto da espessura da placa de pavimentos rígidos construída *in situ* e proposto para estradas projetadas para um número de grupo de eixos para veículos pesados (*Heavy Vehicle Axle Groups* ou as siglas: HVAG) na ordem de 10^6 ou maior. Ademais, as informações aqui contidas não se destinam à utilização em projetos de instalações industriais ou aeroportuárias. Igualmente, o método assume que as camadas placa e sub-base não estão interligadas.

O método de projeto é baseado nas seguintes avaliações:

- Volume e composição do tráfego previsto durante o período de projeto;
- Suporte do subleito em termos do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou *CBR*) e

- Resistência à tração na flexão do concreto da placa.

Recomenda-se uma sub-base ligada (asfáltica) ou CCR sob uma placa de concreto pelas seguintes razões:

- Resistir à erosão do subleito e mitigar o bombeamento dos finos nas juntas e bordas da laje;
- Fornecer suporte uniforme sob a laje de concreto;
- Reduzir a deflexão nas juntas e aumentar a transferência de carga através das juntas (especialmente se não forem providas de outros dispositivos de transferência de carga, como barras de transferências).

Com estes fatores permanecendo constantes, a espessura da placa de concreto varia de acordo com o tipo de acostamento e de junta adotados.

3.2.2 Pavimento rígidos

A configuração global do pavimento rígido é uma questão de decisão do projetista com base na economia e adequação para um determinado projeto.

3.2.2.1 Tipos de placa

Os principais tipos de pavimentos de concreto de cimento Portland, são:

- *Jointed plain (unreinforced) concrete pavements (PCP)*: Pavimento de concreto simples (não reforçado) com juntas;
- *Jointed reinforced concrete pavements (JRCP)*: Pavimento de concreto reforçado com juntas;
- *Continuously reinforced concrete pavements (CRCP)*: Pavimento de concreto continuamente reforçado;
- *Steel fibre reinforced concrete pavements (SFCP)*: Pavimento de concreto reforçado com fibras de aço.

Outro tipo de pavimento rígido é o pavimento de concreto protendido, mas os procedimentos de projeto não estão incluídos no guia AUSTRROADS de 2010 nem fazem parte do presente estudo.

3.2.2.2 Tipos de sub-base

O concreto magro rolado (no Brasil: concreto compactado a rolo, CCR, e na Austrália: *Lean-mix concrete*, LMC) é usado para a construção da sub-base, podendo conter cinzas

volantes, e deve atingir uma resistência característica à compressão aos 28 dias de 5 MPa (sem cinzas volantes) e 7 MPa (com cinzas volantes). A resistência do concreto feito com cimento misturado com cinzas volantes aumenta a uma taxa mais lenta até os 28 dias.

Para efeitos de projeto de pavimento rígido, uma sub-base ligada é definida como:

- Agregado estabilizado com um teor de cimento não inferior a 5% do conteúdo, para garantir uma resistência satisfatória à erosão (verificável em teste específico de laboratório). Dentre os materiais cimentícios, pode-se incluir: cimento, cal/cinzas volantes e/ou escória de forno de solos granulares.
- Asfalto denso e
- CCR ou LMC com uma resistência característica aos 28 dias não inferior a 5 MPa e projetado para ter baixa retração.

A seleção do tipo de sub-base mínima é determinada a partir da Figura 48 (Table 9.1 da AUSTROADS de 2010).

Figura 48 – Tabela do Limite mínimo para os tipos de sub-base asfáltica ou LMC (CCR) em função do projeto de tráfego

Design traffic (HVAG)	Subbase type
Up to 10^6	125 mm bound
Up to 5×10^6	150 mm bound or 125 mm LMC
Up to 1×10^7	170 mm bound or 125 mm LMC
Greater than 1×10^7	150 mm LMC*
* Under CRCP, a heavily bound subbase with an asphalt surfacing is an acceptable alternative	

Fonte: AUSTROADS (2010).

3.2.3 Fatores utilizados na determinação da espessura

Para a concepção da espessura do pavimento rígido, a resistência do subsolo pode ser avaliada em termos de *CBR*.

3.2.3.1 Suporte do subleito

Para fins de projeto de espessura, todo material situado a pelo menos um metro de profundidade em relação à face inferior da sub-base deve ser avaliado para a determinação do *CBR* de projeto do subleito. Em outras palavras, não é admissível adotar como *CBR* de projeto

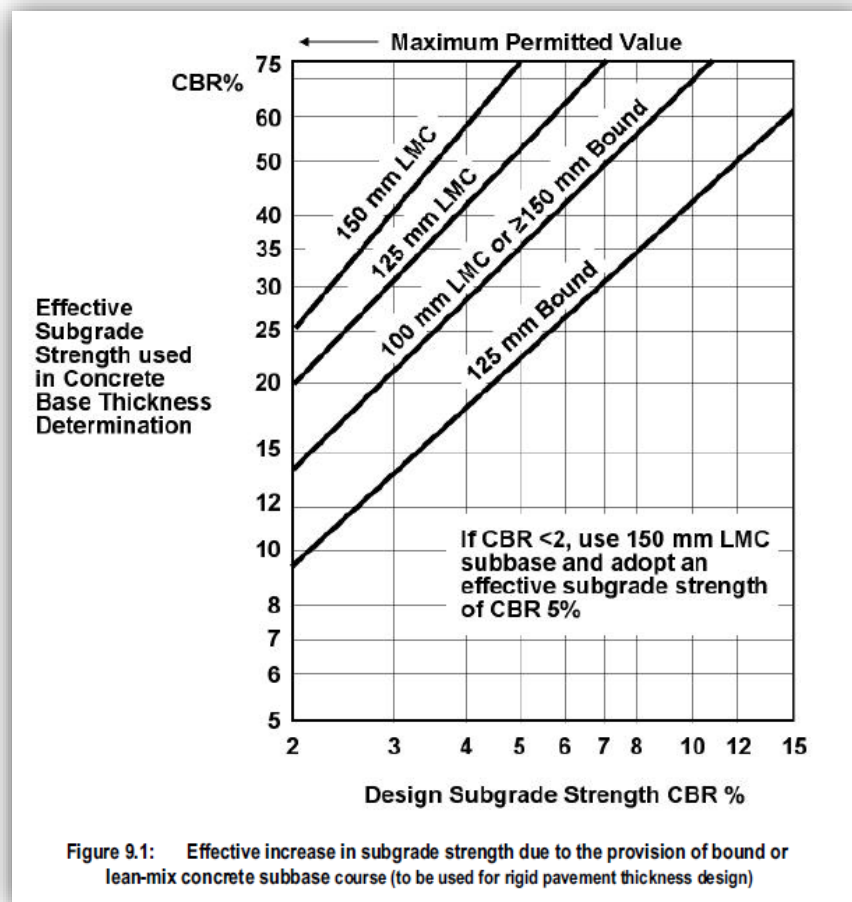
aquele referente a uma camada delgada, imediatamente abaixo da sub-base, ainda que de material de alta resistência.

O material selecionado do subleito deve consistir em um material uniforme, volumetricamente estável e com um *CBR* mínimo de 5%, constante em toda vida útil do pavimento. A profundidade do material selecionado do subleito, sob a sub-base, deve ser aumentada em 600 mm, quando sobre solos expansivos.

3.2.3.2 Suporte efetivo do subleito

O trabalho de investigação e a experiência identificaram que existe um aumento no suporte efetivo do subleito com o uso de sub-bases asfálticas ou de CCR. A Figura 49 (Figure 9.1 da AUSTROADS de 2010) pode ser usada para determinar o aumento do suporte para utilização no projeto da espessura da placa.

Figura 49 – Suporte efetivo do subleito usado na determinação da espessura da placa de concreto em função da espessura e do tipo da sub-base adotada



Fonte: AUSTROADS (2010).

3.2.3.3 Resistência da placa de concreto

A resistência característica ($f_{ctk,f}$) do concreto à tração na flexão aos 28 dias, de projeto, adequada para construção de pavimento rodoviário é tipicamente de 4,0 a 5,0 MPa. O concreto reforçado com fibras de aço deve ter uma $f_{ctk,f}$ na gama de 5,0 a 5,5 MPa.

Salienta-se, porém, que a $f_{ctk,f}$ mínima do concreto para pavimentos de concreto com um projeto de Tráfego de 10^6 HVAG ou mais, é de 4,5 MPa aos 28 dias.

A durabilidade da superfície de desgaste requer uma resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias não inferior a 32 MPa (Standards Australia 2001a). Uma relação típica para a conversão desta à $f_{ctk,f}$ aos 28 dias é dada pela seguinte relação:

$$f_{ctk,f} = 0,75 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (33)$$

na qual

f_{ck} : Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias (MPa) e

$f_{ctk,f}$: Resistência característica do concreto à tração na flexão aos 28 dias (MPa).

O teste indireto de tração (Ensaio Brasileiro¹³) ou *splitting test* (ensaio de tração por compressão diametral) também tem sido utilizado para o controle da resistência do concreto aplicado no pavimento. Uma relação típica para converter a resistência à compressão diametral em resistência à tração na flexão é:

$$f_{ct,f} = 1,37 \cdot f_{ct,sp} \quad (34)$$

na qual

$f_{ct,f}$: Resistência do concreto à tração na flexão e

$f_{ct,sp}$: Resistência do concreto à tração por compressão diametral

A partir desta seção, denominar-se-á f_{cf} a resistência característica do concreto à tração na flexão aos 28 dias (MPa).

¹³ Desenvolvido por Lobo Carneiro, 1943. Methods of testing concrete Determination of indirect tensile strength of concrete cylinders ('Brasil' or splitting test) – AS 1012.10-2000 (R2014).

3.2.3.4 Projeto de tráfego

Foge ao escopo deste estudo aprofundar-se no tópico Projeto de Tráfego. Este trabalho assume que as informações acerca do tráfego são pré-processadas; porém, a seguir, serão apresentadas informações básicas relevantes ao entendimento do projeto de tráfego adotadas pelo método AUSTRROADS de 2010.

Para fins de projeto de pavimentos, são identificados os seguintes tipos de grupos de eixos (veículos pesados e pneus convencionais):

- Eixo simples com roda simples (SAST);
- Eixo simples com roda duplos (SADT);
- Eixo em tandem com roda simples (TAST);
- Eixo duplo com roda duplos (TADT);
- Tri-eixo com roda duplos (TRDT) e
- Quad-eixo com pneus duplos (QADT).

Projeto de Tráfego. O projeto de tráfego para o dimensionamento de pavimentos rígidos consiste em calcular o número total (N_{DT}) de Grupos de Eixo de Veículos Pesados (HVAG) durante o Período de Projeto, classificado de acordo com o tipo de grupo de eixo e a carga no tipo de grupo de eixo específico, dado pela seguinte expressão:

$$N_{DT} = 365 \cdot AADT \cdot DF \cdot \%HV/100 \cdot LDF \cdot CGF \cdot N_{HVAG} \quad (35)$$

na qual

$AADT$: Tráfego médio diário anual em veículos por dia no primeiro ano;

DF : Fator de Direção (proporção dos dois sentidos que viajam na direção da faixa de projeto);

$\%HV$: Percentagem média de veículos pesados;

LDF : Fator de distribuição de faixa;

CGF : Fator de crescimento cumulativo, dado por

$$CGF = \frac{(1 + 0,01 \cdot R)^P - 1}{0,01 \cdot R} \quad (36)$$

na qual

R : Taxa de crescimento anual e

P : Período de projeto e

N_{HVAG} : Número médio de Grupo de Eixo de Veículos Pesados.

3.2.3.5 Acostamentos de concreto

Prevê-se no procedimento de projeto a incorporação de acostamentos de concreto. Acostamentos de concreto reforçam o desempenho do pavimento e permitem adotar uma espessura menor da placa. Para os propósitos deste documento, o acostamento de concreto deve ser integral ou estrutural, a fim de satisfazer os critérios de projeto.

Acostamentos de concreto integrais são compostos do mesmo concreto e têm a mesma espessura da placa, e são moldados integralmente com a placa do pavimento com uma largura mínima de 600 mm.

Um acostamento estrutural está efetivamente ligado ao pavimento por meio de uma ondulação na junta para transferência de carga e tem uma largura mínima de 1,5 m (podendo incluir sarjeta e meio-fio). Ele é composto dos mesmos material e espessura da placa.

3.2.3.6 Confiabilidade do Projeto

No procedimento de projeto, as cargas do grupo de eixos são multiplicadas por um fator de segurança de carga (LSF). Os fatores de segurança de carga usados nas Equações 40 e 42, a seguir, são derivados dos valores da Figura 50 (Table 9.2 da AUSTROADS de 2010) de acordo com a confiabilidade de projeto desejada para um tipo de pavimento especificado.

A confiabilidade do projeto é a probabilidade de que a vida útil do pavimento, quando construído de acordo com o projeto, atenderá ao tráfego projetado antes da maior e necessária reabilitação.

Figura 50 – Tabela trazendo a confiabilidade do projeto – Fator de Segurança de Carga (LSF) em função do tipo de pavimento

Pavement type	Project design reliability				
	80%	85%	90%	95%	97.5%
PCP	1.15	1.15	1.20	1.30	1.35
Dowelled & CRCP	1.05	1.05	1.10	1.20	1.25

Fonte: AUSTROADS (2010).

3.2.4 Projeto da espessura da placa

O procedimento para a determinação da espessura de pavimentos rígidos baseia-se no método americano da *Portland Cement Association, 1984*, proposto por Packard (1984).

Os dois modos de danos considerados neste procedimento são:

- Trincas por fadiga em flexão da base do pavimento;
- Erosão subleito/sub-base decorrente de deflexões repetidas nas juntas planejadas.

Leva-se em consideração a presença ou a ausência de juntas e de acostamentos de concreto. Para efeitos de projeto, os pavimentos continuamente reforçados são considerados como sendo pavimentos com barras de transferência, pois descobriu-se a partir de estudos de Packard, em 1984, que as tensões médias são semelhantes para ambos os pavimentos.

São necessárias informações acerca dos tipos de grupos de eixos, sua distribuição e o número de repetições de cada tipo de eixo/combinção de carga que se espera utilizar durante a vida útil de projeto.

A espessura é calculada usando o procedimento de projeto descrito na Seção 3.2.4.1. O resultado da espessura da placa deve então ser acrescido de mais 5 mm. A espessura deve ser considerada um valor mínimo e é referida como a espessura da placa de projeto.

O acréscimo de 5 mm à espessura final da placa não é uma prática adotada no Brasil nem recomendada pelo método PCA de 1984. Este assunto será abordado mais adiante no Capítulo 5.

3.2.4.1 Procedimento para o projeto da espessura da placa

Uma espessura de placa estimada é selecionada e as rupturas totais por fadiga (CRF) e os danos por erosão (CDE) são calculados para todo o volume de tráfego e composição durante o período de projeto. Se as rupturas por fadiga ou os danos por erosão excederem 100%, a espessura estimada é aumentada e o processo de concepção é repetido. A espessura de projeto será a menor espessura testada que proporcione um consumo de ruptura por fadiga total inferior ou igual a 100% e de dano por erosão total menor ou igual a 100%. As etapas do procedimento do projeto da espessura da placa serão apresentadas mais adiante.

As repetições admissíveis da carga por eixo podem ser determinadas a partir das equações:

- **Modo de ruptura por Fadiga:**

As repetições de carga admissíveis (N_f) para uma dada carga de eixo são:

$$\log(N_f) = \left(\frac{0,9718 - S_r}{0,0828} \right) \quad \text{quando } S_r > 0,55 \quad (37)$$

$$N_f = \left(\frac{4,258}{S_r - 0,4325} \right)^{3,268} \quad \text{quando } 0,45 \leq S_r \leq 0,55 \quad (38)$$

$$N_f \text{ é ilimitado quando } S_r < 0,45 \quad (39)$$

na qual

$$S_r = \frac{S_e}{0,944 \cdot f_{cf}} \cdot \left(\frac{P \cdot LSF}{4,45 \cdot F_1} \right)^{0,94} \quad (40)$$

na qual

S_r : é relação entre tensões;

S_e : é a tensão equivalente (MPa);

f_{cf} : é a resistência à tração na flexão de projeto do concreto;

P : é a carga do eixo (kN);

LSF : é o fator de segurança de carga e

F_1 : é o fator de ajustamento de carga para a fadiga devido ao grupo de eixo:

9	para eixo simples com roda simples (grupo de eixo SAST);
18	para eixo simples com roda dupla (grupo de eixo SADT);
18	para eixo tandem com roda simples (grupo de eixo TAST);
36	para eixo tandem com roda dupla (grupo de eixo TADT);
54	para eixo triplo com roda dupla (grupo de eixo TRDT) e
72	para eixo quad com roda dupla (grupo de eixo QADT).

A tensão equivalente (S_e) é determinada a partir da equação:

$$S_e = a + \frac{b}{D} + c \cdot \ln(E_f) + \frac{d}{D^2} + e \cdot [\ln(E_f)]^2 + f \cdot \frac{\ln(E_f)}{D} + \frac{g}{D^3} + h \cdot [\ln(E_f)]^3 + i \cdot \frac{[\ln(E_f)]^2}{D} + \frac{j \cdot \ln(E_f)}{D^2} \quad (41)$$

na qual

$a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$: são coeficientes na Figura 51 (Table 9.4 da AUSTROADS de 2010);

D : espessura do concreto da base (mm) e

E_f : CBR(%) efetivo de projeto.

▪ **Modo de dano por Erosão:**

As repetições de carga admissíveis (N_e) para uma dada carga de eixo são:

$$\log(F_2 \cdot N_e) = 14,524 - 6,777 \cdot \left[\max\left(0, \left(\frac{P \cdot LSF}{4,45 \cdot F_4}\right)^2 \cdot \frac{10^{F_3}}{41,35} - 9,0\right) \right]^{0,103} \quad (42)$$

na qual

P, LSF : são similares às definições anteriores;

F_2 : é o fator de ajustamento para efeitos de borda da laje:

0,06 para base sem acostamento e

0,94 para base com acostamento.

F_3 : é o fator de erosão;

F_4 : é o fator de ajustamento de carga para a erosão devido ao grupo de eixo:

9 para eixo simples com roda simples (grupo de eixo SAST);

18 para eixo simples com roda dupla (grupo de eixo SADT);

18 para eixo tandem com roda simples (grupo de eixo TAST);

36 para eixo tandem com roda dupla (grupo de eixo TADT);

54 para eixo triplo com roda dupla (grupo de eixo TRDT) e

54 para eixo quad com roda dupla (grupo de eixo QADT).

O fator de erosão (F_3) também é determinado a partir da Equação 41, na qual $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$ são coeficientes nas Figuras 52 e 53 (Tables 9.5 e 9.6 da AUSTROADS de 2010).

Vale ressaltar, a respeito do guia AUSTROADS de 2010, que não existem limites estabelecidos para os fatores de entrada de carga do eixo e de segurança de carga para as Equações 37 e 42. No entanto, é aconselhável precaução quando se utilizam cargas admissíveis calculadas com valores de $(4,5 \cdot PLSF/F_1)$ ou $(4,5 \cdot PLSF/F_4)$ superiores a 65 kN.

Figura 51 – Tabela com coeficientes para previsão da tensão equivalente: lado esquerdo, sem acostamento de concreto e lado direito, com acostamento de concreto, em função do tipo de eixo

Coefficient	Without concrete shoulders				Concrete shoulders			
	Axle group type				Axle group type			
	SAST & TAST	SADT	TADT	TRDT & QADT	SAST & TAST	SADT	TADT	TRDT & QADT
a	0.118	0.560	0.219	0.089	-0.051	0.330	0.088	-0.145
b	125.4	184.4	399.6	336.4	26.0	206.5	301.5	258.6
c	-0.2396	-0.6663	-0.3742	-0.1340	0.0899	-0.4684	-0.1846	0.0080
d	26 969	44 405	-38	-10007	35 774	28 661	4418	1408
e	0.0896	0.2254	0.1680	0.0830	-0.0376	0.1650	0.0939	0.0312
f	0.19	19.75	-71.09	-83.14	14.57	2.82	-59.93	-61.25
g	-352174	-942585	681381	1215750	-861548	-686510	280297	488079
h	-0.0104	-0.0248	-0.0218	-0.0120	0.0031	-0.0186	-0.0128	-0.0058
i	-1.2536	-4.6657	3.6501	5.2724	1.3098	-1.9606	4.1791	4.7428
j	-1709	-4082	2003	4400	-4009	-2717	1768	2564

Fonte: AUSTRoads (2010).

Figura 52 – Tabela com coeficientes para previsão do fator de erosão para bases sem BTC: lado esquerdo, sem acostamento de concreto e lado direito, com acostamento de concreto, em função do tipo de eixo

Coefficient	Without concrete shoulders				Concrete shoulders			
	Axle group type				Axle group type			
	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT
a	0.745	1.330	1.907	2.034	0.345	0.914	1.564	2.104
b	533.8	537.5	448.3	440.3	534.6	539.8	404.1	245.4
c	-0.2071	-0.1929	-0.1749	-0.2776	-0.1711	-0.1416	-0.1226	-0.2473
d	-42419	-43035	-35827	-36194	-44908	-44900	-32024	-15007
e	0.0405	0.0365	0.0382	0.0673	0.0347	0.0275	0.0256	0.0469
f	27.27	26.44	0.64	15.77	20.49	16.37	-9.79	8.86
g	1547570	1586100	1291870	1315330	1676710	1654590	1150280	518916
h	-0.0044	-0.0039	-0.0060	-0.0084	-0.0038	-0.0032	-0.0052	-0.0075
i	-1.4656	-1.4547	1.0741	-1.2068	-1.3829	-0.9584	2.1997	1.5517
j	-1384	-1344	50	-625	-913	-765	469	-599

Fonte: AUSTRoads (2010).

Figura 53 – Tabela com coeficientes para previsão do fator de erosão para bases com BTC ou CRC: lado esquerdo, sem acostamento de concreto e lado direito, com acostamento de concreto, em função do tipo de eixo

Coefficient	Without concrete shoulders				Concrete shoulders			
	Axle group type				Axle group type			
	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT	SAST	SADT	TADT & TAST	TRDT & QADT
a	0.072	0.643	1.410	2.089	-0.184	0.440	0.952	1.650
b	679.9	684.5	498.9	351.3	602.3	609.8	544.9	359.4
c	-0.0789	-0.0576	-0.1680	-0.3343	-0.0085	-0.0484	-0.0404	-0.1765
d	-58342	-58371	-39430	-25576	-50996	-52519	-47500	-28901
e	0.0179	0.0128	0.0322	0.0723	-0.0122	0.0017	0.0179	0.0435
f	6.70	4.61	13.80	29.58	8.99	9.62	-31.54	-15.97
g	2139330	2131390	1437580	923081	1874370	1949350	1719950	1085800
h	-0.0021	-0.0017	-0.0044	-0.0086	0.0008	-0.0007	-0.0051	-0.0084
i	-0.5199	-0.2056	-0.0380	-1.6301	-0.4759	-0.6314	3.3789	3.2908
j	-187	-185	-697	-1327	-374	-326	1675	758

Fonte: AUSTROADS (2010).

3.2.4.2 Espessura mínima da placa

Independentemente das espessuras de placa determinadas de acordo com este procedimento, a espessura admissível da placa de concreto a ser trafegada por veículos pesados é observada na Figura 54 (Table 9.7 da AUSTROADS de 2010). Os valores mínimos para o tráfego de carga de projeto superior ou igual a 10^7 HVAG devem levar em consideração fatores ambientais, tais como, deformação e ondulação de placas.

Figura 54 – Tabela mostrando a espessura mínima de projeto da placa (mm), em função do tipo de placa do pavimento

Pavement type (Base)	Design traffic		
	$1 \times 10^6 \leq HVAG < 1 \times 10^7$	$1 \times 10^7 \leq HVAG < 5 \times 10^7$	$HVAG \geq 5 \times 10^7$
Plain concrete	150	200	250
Jointed reinforced and dowelled	150	180	230
Steel fibre reinforced concrete	125	180	230
Continuously reinforced concrete	150	180	230

Fonte: AUSTROADS (2010).

3.2.4.3 Provisão de barras de transferência de carga

O procedimento de projeto de espessura prevê a opção de se combater as retrações por meio de juntas transversais com ou sem barras de transferência de carga. As barras devem ser de aço cilíndrico de classe 250N (CA-25) e 450 mm de comprimento, com a extremidade de expansão/contração livre de rebarbas e mais da metade de seu comprimento deve ser revestida com um agente antiaderente ao concreto, no lado livre.

As barras devem ser alinhadas com precisão, do contrário o bloqueio da articulação é provável de ocorrer. Os diâmetros apropriados para tais barras estão dispostos na Figura 55 (Table 9.9 da AUSTROADS de 2010).

Figura 55 – Tabela mostrando diâmetro mínimo da barra de transferência de cargas do pavimento rígido em função da espessura da placa

Design base thickness (D) (mm)	Dowel diameter* (mm)
$125 < D \leq 160$	24
$160 < D \leq 200$	28
$200 < D \leq 250$	32
$D > 250$	36

*Standards Australia (2001b)

Fonte: AUSTROADS (2010).

3.2.4.4 Provisão de barras de ligação

As barras de ligação impedem a separação do pavimento nas juntas longitudinais, mas permitem a ocorrência de deformação ou curvatura sem restrições excessivas. O seu projeto e a sua integridade a longo prazo são de extrema importância porque a sua falha criaria uma condição de carregamento na placa que poderia reduzir a vida útil do pavimento em até 50%. Estas barras são tipicamente de 12 mm de diâmetro, barras de aço CA-50, de 1 m de comprimento, colocadas centralmente na junta.

3.2.4.5 As etapas do procedimento

1. Decidir o tipo de pavimento rígido simples;
2. Decidir se haverá ou não acostamentos de concreto;
3. Calcular o N_{DT} do Projeto de Tráfego (Equação 35);
4. Definir o CBR do subleito;

5. Baseado no N_{DT} HVAG e CBR do subleito e, usando a Figura 48 (Table 9.1 do AUSTROADS de 2010), determinar a sub-base mínima necessária;
6. Escolher o tipo e espessura da sub-base e usando a Figura 50 (Table 9.2 do AUSTROADS de 2010) determinar o CBR efetivo;
7. Escolher a resistência característica do concreto aos 28 dias de projeto, não inferior a 32 MPa, usando a Equação 33 para calcular a resistência característica de tração na flexão do concreto;
8. Escolher a espessura inicial da placa, h , que deve ser pelo menos 150 mm, Figura 54 (Table 9.7 do AUSTROADS de 2010);
9. Baseado em h , CBR efetivo, a existência ou não de acostamentos e se o pavimento é provido ou não de barras de transferência de carga, usar a Equação 41 para calcular a tensão equivalente e fator de erosão para cada tipo de eixo. Estes devem ser calculados pelo uso das Figuras 51, 52 e 53 (Tables 9.4, 9.5 e 9.6 do AUSTROADS de 2010);
10. Escolher o fator de segurança de carga (LSF). Isto depende do tipo de pavimento e do fator de confiabilidade do projeto, Figura 50 (Table 9.2 do AUSTROADS de 2010);
11. Para cada tipo de grupo de eixo e se o pavimento está localizado em uma área rural ou urbana, determinar as percentagens de cada grupo de eixo e da distribuição dos diferentes eixos de carga em cada grupo. Isto é dado no APÊNDICE I (AUSTROADS, 2010). Multiplicar essa distribuição pelo $N_{DT}HVAG$ e multiplicar pelo LSF. Disto resultarão as repetições previstas de cada eixo de carga dentro dos respectivos grupos de eixo;
12. Para cada eixo de carga de cada grupo de eixo, calcular as repetições admissíveis de carga baseadas nos limites de fadiga do concreto e de erosão da sub-base/subleito. Utilizar as Equações 37, 38 e 39 (fadiga) e Equação 42 (erosão);
13. Para cada eixo de carga de cada grupo de eixo, dividir as repetições previstas de carga pelas repetições admissíveis de carga obtidas a partir do modo de ruptura por fadiga e multiplicar por 100% para obter as percentagens de fadiga. Somar as percentagens de fadiga para todos os eixos de carga para obter o consumo de ruptura por fadiga (CRF);
14. Repetir o passo 13 para todos os eixos de carga para calcular o consumo do dano por erosão (CDE) pela soma das percentagens do dano de cada eixo de carga o qual é calculado pela divisão das repetições esperadas de carga pelas repetições admissíveis de carga para obter o consumo do dano por erosão (CDE);
15. Se o CRF ou CDE é maior que 100%, há duas opções para o projeto: ou aumenta-se a espessura da base, h , portanto repetir os passos 8 – 15 ou usar uma sub-base com maior módulo de rigidez à flexão, por conseguinte repetir os passos 5 – 15;

16. Satisfeitas as restrições do projeto para a fadiga e erosão, a espessura requerida está determinada.

A seguir será apresentada o Quadro 2 que reúne as principais divergências entre o método PCA de 1984 e o guia AUSTROADS de 2010.

Quadro 2 – Tópicos divergentes entre o método PCA de 1984 e AUSTROADS de 2010

Tópico	PCA de 1984	AUSTROADS de 2010
Fundamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos teóricos de Westergaard; • Pistas experimentais da AASHO <i>Road Test</i>; • Análise computacionais (MEF); • Ensaios laboratoriais 	PCA de 1984
Suporte do sistema da fundação	Módulo de reação do subleito (k) ou do sistema da fundação	CBR efetivo (CBR_e)
Tipos de sub-base	<ul style="list-style-type: none"> • Granular • Tratada 	<ul style="list-style-type: none"> • Tratada
Espessura mínima da sub-base	10 cm	12,5 cm (recomendável)
BT	Cerca de 45 cm	45 cm
BL	Cerca de 85 cm	100 m
LSF	Volume de Tráfego <ul style="list-style-type: none"> • Leve; • Médio e • Pesado. 	Tipo de pavimento <ul style="list-style-type: none"> • Não reforçado e • Com BT e continuamente reforçado.
Tensão equivalente	Tabelado	Fórmula
Fator de erosão	Tabelado	Fórmula
Repetição admissível fadiga p/	Fórmula	Fórmula do PCA de 1984 com adaptações
Repetição admissível erosão p/	Fórmula	Fórmula do PCA de 1984 com adaptações
Tipos de eixo	<ul style="list-style-type: none"> • Simples; • Tandem duplo e • Tandem triplo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Simples com roda simples; • Simples com roda dupla; • Tandem com roda simples; • Tandem com roda dupla; • Triplo com roda dupla e • Quad com roda dupla.

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

4 DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS SIMPLES

Este capítulo está dividido em duas seções. A primeira, 4.1, aborda o tópico Modelo Conceitual (MC) que inspirou os objetivos específicos deste trabalho; a segunda Seção, 4.2, apresenta o algoritmo aqui denominado *austroads*, em alusão ao método da AUSTROADS de 2010.

4.1 Modelo Conceitual (MC)

O primeiro objetivo específico deste trabalho é descrever um Modelo Conceitual¹⁴ (MC) para problema de otimização de projeto da placa de pavimentos rígidos simples, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF) na plataforma MATLAB, para determinar as variáveis otimizadas de projeto, espessura (hs) e resistência característica (f_{cf}) à compressão do concreto aos 28 dias, sem considerar os fenômenos de fadiga e de erosão, a partir de uma função objetivo custo do metro quadrado de placa de pavimentos rígidos simples (C_p). Em outras palavras, obedecendo-se às restrições impostas pelo projeto, a questão é descobrir os valores otimizados para os parâmetros hs e f_{cf} tais que minimizem C_p .

4.1.1 Concepção do modelo estrutural

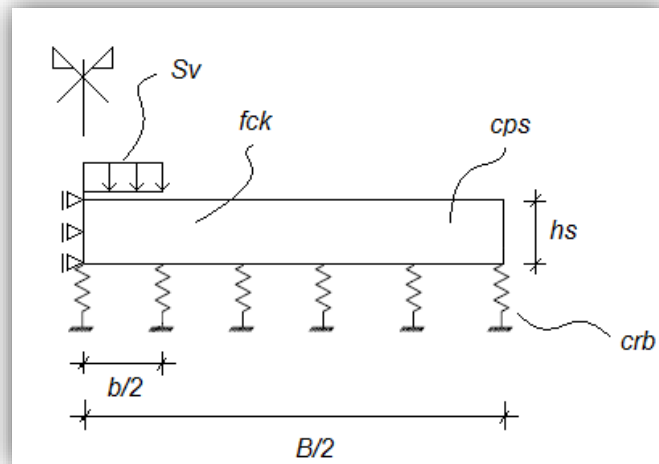
Concebe-se um modelo estrutural de pavimento rígido não armado, apoiado em uma base elástica equivalente (k) e contínua em todo o domínio do modelo, constituído de elementos finitos isoparamétricos quadráticos de quatro nós e bidimensionais em estado plano de deformação (vide Figura 56).

¹⁴ No presente estudo, tanto no MC quanto no algoritmo *austroads*, a função objetivo está associada à função polinomial do 3º (terceiro) grau de ajuste do custo do f_{ck} — função *cunt* do algoritmo *opavrig.m* e *oaustroads.m* (vide APÊNDICE C e APÊNDICE E, respectivamente) —, gerada a partir de pesquisa de preço, posto obra, praticada em Maceió, Alagoas, em 2016, para diversas resistências correntes (vide APÊNDICE A). Isto decorre do fato de não existir no mercado preço de concreto em função de sua resistência à tração. Daí a necessidade de transformação de f_{ck} em f_{cf} , utilizada neste estudo. Ressalta-se, entretanto, que no supracitado custo não se está considerando despesas relativas ao serviço de execução da placa, como: transporte de concreto ao local da obra, lançamento, espalhamento, acabamento do concreto, etc.).

Salienta-se ainda, que a utilização de diferentes formulações para transformar o f_{ck} em f_{cf} , uma para o MC e outra para o *oaustroads.m*, a seguir apresentadas, não tem outra razão a não ser por motivos de ordem cronológica de pesquisa e, conseqüentemente, construção de algoritmos específicos. Note-se que tais formulações podem ser facilmente substituídas pelo usuário, caso se faça necessário.

O material constitutivo do modelo possui comportamento isotrópico, elástico e linear (Lei de Hooke) e é isento de armação. O parâmetro k do modelo representa o Módulo de reação da infraestrutura do pavimento ou Coeficiente de recalque.

Figura 56 – Modelo estrutural (corte transversal)



Fonte: elaborada pelo próprio autor (2016).

no qual

B : Largura da placa;

b : Largura do carregamento uniformemente distribuído;

hs : (já definido anteriormente);

Sv : Carga distribuída;

cps : Coeficiente de Poisson da camada superior;

crb : Coeficiente de recalque equivalente da base elástica;

f_{ck} : (já definido anteriormente).

4.1.2 Função objetivo

Conforme mencionado na Seção 4.1, a função objetivo, C_p , utilizada no algoritmo em foco possui duas variáveis de projeto e sua unidade de medida é custo do concreto por área de placa. Em outras palavras, $C_p(hs, f_{ck})$, conforme demonstrado a seguir:

$$C_p = B \cdot uc \cdot hs \cdot C_{unit}(f_{ck}) \quad (43)$$

na qual

B : (já definido anteriormente);

uc : Unidade de comprimento, adimensional (ortogonal ao plano do Modelo estrutural);

hs : (já definido anteriormente) e

$C_{unit}(f_{ck})$: é a curva do custo do f_{ck} por metro cúbico de concreto.

Como B e uc podem ser retirados da equação, pois são constantes, obtém-se:

$$C_p = hs \cdot C_{unit}(f_{ck}) \quad (44)$$

4.1.3 Restrições

$$0 \leq hs \leq \infty \quad (45)$$

$$0 \leq f_{ck} \leq 600 \quad (46)$$

nas quais

hs : Espessura da placa (cm);

f_{ck} : Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias (kgf/cm²).

$$\text{Max } \sigma_1 \leq \text{limite em tração na flexão do material da região inferior: } \left(\frac{f_{ck}}{10}\right) \quad (47)$$

na qual

σ_1 : Resistência característica do concreto à tração na flexão aos 28 dias (kgf/cm²)

$$\text{Max } \sigma_3 \geq \text{limite em compressão do material da região superior: } (-f_{ck}) \quad (48)$$

na qual

σ_3 : Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias (kgf/cm²)

A resistência à compressão do concreto é calculada a partir da relação constitutiva:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (49)$$

na qual

E : é o módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young do material, tangente na origem, em kgf/cm², cujo valor, neste trabalho, é determinado pela expressão (SÜSSEKIND, 1979):

$$E = 0,9 \cdot 21000 \cdot \sqrt{f_{ck} + 35} \quad (50)$$

Nota: $f_{ck} + 35 \cong f_{cj}$, resistência média à compressão do concreto em kgf/cm².

ε : é a deformação de engenharia ou lagrangiana, dada por

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (51)$$

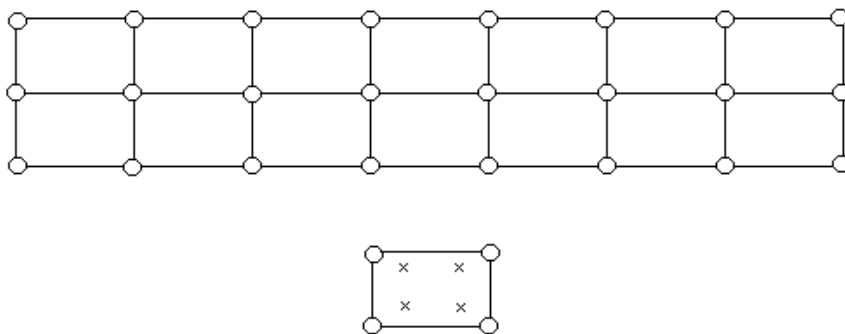
na qual

ΔL : é a variação do comprimento e

L_0 : é o comprimento indeformado

Finalmente, a Figura 57 ilustra a discretização do modelo pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

Figura 57 – Modelo estrutural discretizado - Q4 (MEF)



Fonte: elaborada pelo próprio autor (2016).

no qual

Q4: é o elemento finito 2D quadrilátero com quatro nós;

ndh1: é o nº de divisões na direção horizontal para os subdomínios à esquerda do eixo de simetria do Modelo estrutural (Figura 56);

ndh2: é o n° de divisões na direção horizontal para os subdomínios à direita do eixo de simetria do Modelo estrutural e

ndv: é o n° de divisões na direção vertical para todos os subdomínios.

Tal discretização gerou uma malha de elementos finitos com a seguinte característica:

$$\text{ndh1} = 10 \quad (52)$$

$$\text{ndh2} = 62 \quad (53)$$

$$\text{ndv} = 21 \quad (54)$$

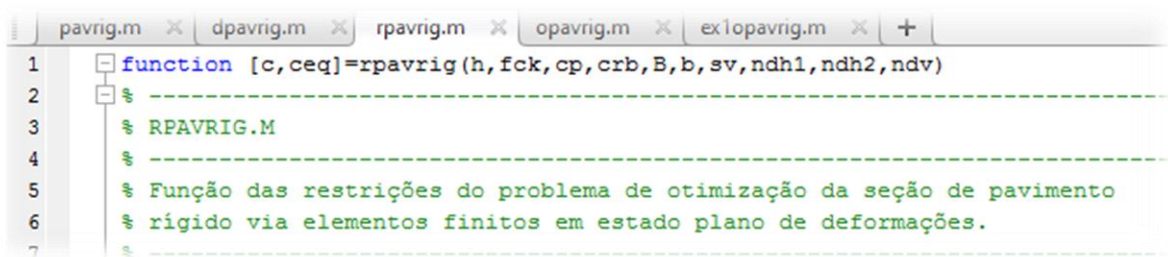
4.1.4 Algoritmo Modelo Conceitual (MC)

Serão apresentadas duas funções (*rpavrig.m* e *opavrig.m*) e um exemplo de funcionamento do Modelo Conceitual elaborados na plataforma MATLAB.

rpavrig.m

A função *rpavrig.m* (APÊNDICE B) realiza tarefa de restrições de limites das variáveis de projeto do problema de otimização da seção de pavimento rígido via elementos finitos em estado plano de deformações (vide Figura 58, fragmento do APÊNDICE B, a seguir).

Figura 58 – Fragmento do APÊNDICE B



```

1  function [c,ceq]=rpavrig(h,fck,cp,crb,B,b,sv,ndh1,ndh2,ndv)
2  % -----
3  % RPAVRIG.M
4  % -----
5  % Função das restrições do problema de otimização da seção de pavimento
6  % rígido via elementos finitos em estado plano de deformações.
7  % -----

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Conforme definições anteriores acerca do Modelo Conceitual (Seção 4.1), os parâmetros de entrada da função *rpavrig.m* são (vide Figura 59, fragmento do APÊNDICE B, a seguir):

Figura 59 – Fragmento do APÊNDICE B

```

8      % Parâmetros:
9      %   h   (E) - Altura da camada superior.
10     %   fck (E) - fck da camada superior.
11     %   cp  (E) - Coeficiente de Poisson da camada superior.
12     %   crb (E) - Coeficiente de recalque da base.
13     %   B   (E) - Largura total da seção.
14     %   b   (E) - Largura de aplicação do carregamento distribuído.
15     %   sv  (E) - Tensão aplicada no pavimento.
16     %   ndh1 (E) - Número de divisões horizontais 1.
17     %   ndh2 (E) - Número de divisões horizontais 2.
18     %   ndv (E) - Número de divisões verticais.
19     %   c   (S) - Vetor das inequações não lineares de restrição.
20     %   ceq (S) - Vetor das equações não lineares de restrição.
21

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

A função *EC* (linha 35 do algoritmo) reporta-se à Equação 50 para o cálculo do Módulo de Young (Seção 4.1.3 – Função objetivo) e a função *mef* (linha 38) analisa o modelo em estudo e a função *lims* (linha 41) define as tensões limites da camada em função do f_{ck} corrente (Inequações 47 e 48 da Seção 4.1.3) (vide Figura 60, fragmento do APÊNDICE B, a seguir).

Figura 60 – Fragmento do APÊNDICE B

```

33
34     % Calcula o módulo de Young da camada em função do fck corrente
35 -   Ec=0.9*21000*sqrt(fck+35);
36
37     % Analisa o modelo corrente
38 -   mef=pavrig(h,Ec,cp,crb,B,b,sv,ndh1,ndh2,ndv);
39
40     % Define as tensões limites da camada em função do fck corrente
41 -   lims=[-fck fck/10];
42

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Um comando de rotina *for* é acionado e o algoritmo realiza a etapa de varredura nos pontos de integração dos elementos da camada superior para a determinação das tensões extremas em serviço (vide Figura 61, fragmento do APÊNDICE B, a seguir).

Figura 61 – Fragmento do APÊNDICE B

```

43 % Varredura nos pontos de integração dos elementos da camada
44 % superior para determinação das tensões extremas em serviço
45 - idelem=0;
46
47 - s1max=0;
48 - s3min=0;
49
50 - for i=1:ndv
51 -     for j=1:ndh1+ndh2
52 -         idelem=idelem+1;
53 -         tcurr=get(mef, 'tensoeselem', idelem);
54
55 -         for k=1:size(tcurr,1)

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Finalmente as funções de restrições não lineares e lineares são processadas (vide Figura 62, fragmento do APÊNDICE B, a seguir):

Figura 62 – Fragmento do APÊNDICE B

```

70
71 % Restrições não lineares
72 - c=[s3min/lims(1)-1 s1max/lims(2)-1];
73
74 % Restrições lineares (inexistentes)
75 - ceq=[];
76
77 - disp(['h = ' num2str(h) ' fck = ' num2str(fck)]);
78 - disp(['Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = ' mat2str(c)]);
79
80 - cunt=3.02207792208E+002-3.80543530542E-001*fck+1.85425685425E-003* ...
81     fck^2-1.34680134680E-006*fck^3;
82 - disp(['fobj (Custo) = ' num2str(h/1000*cunt)]);
83
84 - disp(' ');

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

opavrig.m

A segunda função do MC, *opavrig.m*, (APÊNDICE C) realiza a tarefa de otimização da seção da placa de pavimento rígido via elementos finitos em estado plano de deformação (vide Figura 63, fragmento do APÊNDICE C, a seguir).

Figura 63 – Fragmento do APÊNDICE C

```

1 function [ho, fcko, Eo]=opavrig(cp, crb, B, b, sv, ndh1, ndh2, ndv)
2 % -----
3 % OPAVRIG.M
4 % -----
5 % Função de otimização da seção de pavimento rígido via elementos finitos
6 % em estado plano de deformações.
7 % -----

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

A função *cunt* define o custo do metro cúbico do concreto em função do seu f_{ck} (linha 34 do algoritmo) e a função *fmincon* realiza o processo de otimização em função de todos os parâmetros e restrições de projeto (linha 42) buscando minimizar a função objetivo, que está associada à função do custo do f_{ck} do concreto (vide Figura 64, fragmento do APÊNDICE C, a seguir).

O primeiro argumento de entrada da função *fmincon*, @(vp)vp(1)/1000*cunt(vp(2)), define a função objetivo, que é o custo do metro quadrado de placa do pavimento, porque o termo @(vp) diz que essa função recebe uma variável de entrada chamada, vp, que é um vetor de duas posições: a primeira posição, vp(1), é a espessura da placa do pavimento em milímetro (mm), que é dividido por 1000 para balancear as unidades, e a segunda, vp(2), é o f_{ck} do concreto da placa (kgf/cm²). O termo cunt(vp(2)) consulta a função do custo do concreto por metro cúbico para o f_{ck} especificado em vp(2). O produto de vp(1)/1000 por cunt(vp(2)) resulta no custo do metro quadrado (m²) de placa do pavimento com a espessura definida em vp(1).

Figura 64 – Fragmento do APÊNDICE C

```

33 % Define a função do custo do m^3 do concreto em função do fck
34 - cunt=@(fck)3.02207792208E+002-3.80543530542E-001*fck+1.85425685425E-003* ...
35     fck^2-1.34680134680E-006*fck^3;
36
37 % Redefine algoritmo e executa função de otimização
38 - options=optimset('Algorithm','sqp');
39 - options=optimset('Algorithm','active-set');
40 - options=optimset('Algorithm','interior-point');
41
42 - vp=fmincon(@(vp)vp(1)/1000*cunt(vp(2)), [300 350], [], [], [], [], [0 0], [Inf 600], ..
43     @(vp)rpavrig(vp(1), vp(2), cp, crb, B, b, sv, ndh1, ndh2, ndv), options);
44
45 % Variáveis otimizadas de projeto
46 - ho=vp(1);
47 - fcko=vp(2);
48 - Eo=0.9*21000*sqrt(fcko+35);

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

O segundo argumento, [300 350], são valores iniciais para o processo de otimização, na qual 300 é a espessura (mm) e 350 o f_{ck} (kgf/cm²). Os seus dois últimos vetores de entrada, [0 0] e [Inf 600], são os limites inferiores e superiores, respectivamente, das variáveis de projeto, h e f_{ck} , do problema de otimização. A correlação entre f_{ck} e E , utilizada no *opavrig.m*, é efetuada através da Equação 50 (Seção 4.1.3) (Linha 48).

Exemplo de funcionamento do Modelo Conceitual

A Figura 65 ilustra, de forma resumida, todo processo de iteração, ou seja, na alínea *a* da Figura são apresentados os parâmetros de entrada, nas alíneas *b* e *c* as fases inicial e final das iterações, respectivamente, e, em *d* o fim do processo de otimização com os resultados otimizados.

Figura 65 – Modelo Conceitual – ex1opavrig.m – Exemplo de dimensionamento de pavimento rígido por meio do Modelo Conceitual (a-d)

a)

```

1      % Camada superior
2      cps=0.225;
3
4      % Base
5      crb=10;      % Coeficiente de recalque(F/L^2/L)
6
7      B=720;
8      b=40;
9
10     sv=6000/2/b;
11
12     ndh1=10;
13     ndh2=62;
14     ndv=21;
15
16     [hso,fckso,Eso]=opavrig(cps,crb,B,b,sv,ndh1,ndh2,ndv)
17
18     dpavrig(hso,Eso,cps,fckso,crb,B,b,sv,ndh1,ndh2,ndv);

```

b)

```

Command Window

>> exlopavrig
h = 300 fck = 350
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.778498147854624 -0.601789706040887]
fobj (Custo) = 101.526

h = 300 fck = 350
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.778498148526471 -0.601789719592537]
fobj (Custo) = 101.526

h = 300 fck = 350
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.778498151154269 -0.601789711948864]
fobj (Custo) = 101.526

h = 299.6625 fck = 349.8735
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.778367255484479 -0.600620671291662]
fobj (Custo) = 101.3958

h = 299.6626 fck = 349.8735
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.778367256158 -0.600620684884921]
fobj (Custo) = 101.3958

h = 299.6625 fck = 349.8735
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.778367258786343 -0.600620677222951]
fobj (Custo) = 101.3958

h = 297.975 fck = 349.2416
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.777709550877738 -0.594709649153418]
fobj (Custo) = 100.7453

```

(c)

```

Command Window

h = 190.8698 fck = 373.9132
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.760393228844909 -2.51440252951873e-07]
fobj (Custo) = 66.567

h = 190.8698 fck = 373.9132
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.760393228845543 -2.51445968046937e-07]
fobj (Custo) = 66.567

h = 190.8698 fck = 373.9132
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.76039322887653 -2.514385685215e-07]
fobj (Custo) = 66.567

h = 190.8698 fck = 373.9132
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.760393228876942 -2.51443629695203e-07]
fobj (Custo) = 66.567

h = 190.8698 fck = 373.9132
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.760393228892122 -2.51438571852169e-07]
fobj (Custo) = 66.567

h = 190.8698 fck = 373.9132
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.760393228892499 -2.51442208831776e-07]
fobj (Custo) = 66.567

h = 190.8698 fck = 373.9132
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.760393228900546 -2.51443333931789e-07]
fobj (Custo) = 66.567

```

(d)



```

Command Window
ff = 150.0050  fck = 373.9132
Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = [-0.760393228900546 -2.51443333931789e-07]
fobj (Custo) = 66.567

Local minimum possible. Constraints satisfied.

fmincon stopped because the size of the current step is less than
the default value of the step_size_tolerance and constraints are
satisfied to within the default value of the constraint_tolerance.

<stopping criteria details>

hso =

    190.8698

fckso =

    373.9132

Eso =

    3.8219e+05

fx >>

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

4.2 Otimização do AUSTROADS de 2010 — *austroads*

A implementação do MC aliada às importantes equações que deram origem ao método PCA de 1984 fomentaram a construção de um efetivo algoritmo de otimização, no qual estão implícitos os fenômenos de fadiga e de erosão, indispensáveis no projeto de pavimentos rígidos simples, culminando no segundo objetivo específico do estudo.

Fazendo uso do *Modus operandi* do algoritmo MC, apresentado na Seção 4.1, desenvolveu-se o algoritmo *austroads*, definido no Capítulo 4. Sua estrutura foi concebida a partir do procedimento de projeto de pavimentos rígidos simples da AUSTROADS de 2010 (Seção 3.2.4.5), e do uso das equações e tabelas da Seção 3.2.4.1.

É oportuno enfatizar que as restrições que governam a rotina de otimização do *austroads* são:

$$0 \leq \text{CRF} \leq 100\% \quad (55)$$

$$0 \leq \text{CDE} \leq 100\% \quad (56)$$

Durante as iterações em busca dos valores otimizados dos parâmetros de projeto que regulam a otimização do *austroads*, os cálculos são direcionados para que o CRF e CDE atinjam 100%, garantindo, assim, o melhor custo-benefício para o projeto.

O algoritmo foi concebido em duas partes fundamentais: *raustroads.m* e *oaustroads.m*, conforme apresentado a seguir (vide APÊNDICES D e E, respectivamente).

raustroads.m

O arquivo *raustroads.m* (APÊNDICE D) é uma função que verifica os critérios de fadiga e erosão para um dado par de valores da altura da camada, h , de concreto do pavimento e do correspondente f_{cf} . Seus parâmetros de entrada são (vide Figura 66, fragmento do APÊNDICE D, a seguir):

Figura 66 – Fragmento do APÊNDICE D

```

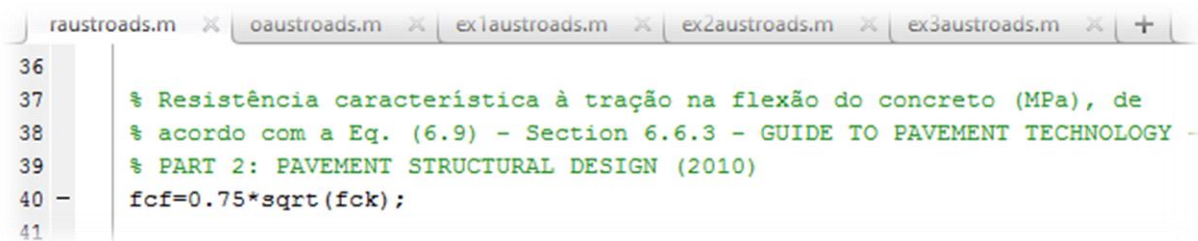
1 function [c,ceq]=raustroads(D,fck,Ef,LSF,AC,BT,P,nrp)
2
3 % -----
4 % RAUSTROADS.M
5 % -----
6 % Função de cálculo dos indicadores percentuais associados ao critérios de
7 % fadiga e erosão para pavimentos rígidos segundo a AUSTROADS.
8 % -----
9 % Parâmetros:
10 % D (E) - Espessura da base do pavimento rígido (mm).
11 % fck (E) - Resistência característica do concreto à compressão aos 28
12 % dias (MPa).
13 % Ef (E) - CBR efetivo do sub-leito (%).
14 % LSF (E) - Fator de segurança de carga.
15 % AC (E) - Flag se há (1) ou não (0) acostamento de concreto.
16 % BT (E) - Flag se há (1) ou não (0) junta com barra de transferência.
17 % P (E) - Matriz de cargas por eixo, em kN, referentes às categorias
18 % SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT.
19 % nrp (E) - Matriz de número de repetições previstas de carga, já
20 % considerando a vida útil do projeto, referentes às
21 % categorias SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT.
22 % c (S) - Indicadores associados às restrições de desigualdades em
23 % relação aos critérios de fadiga e de erosão da AUSTROADS.
24 % ceq (S) - Não utilizado.

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Internamente o f_{ck} é transformado no f_{cf} (resistência característica do concreto à tração na flexão) através da Equação 33 da Seção 3.2.3.3 (vide Figura 67, fragmento do APÊNDICE D, a seguir):

Figura 67 – Fragmento do APÊNDICE D



```

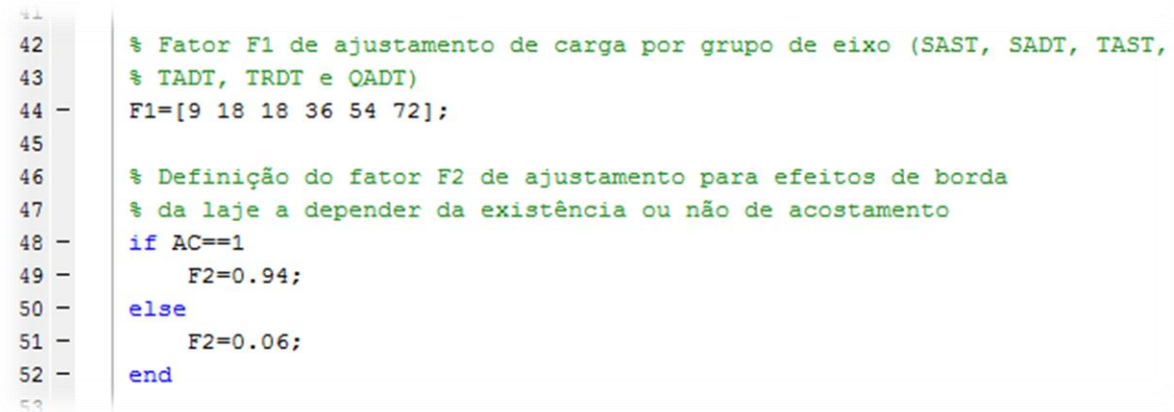
36
37 % Resistência característica à tração na flexão do concreto (MPa), de
38 % acordo com a Eq. (6.9) - Section 6.6.3 - GUIDE TO PAVEMENT TECHNOLOGY -
39 % PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010)
40 - fcf=0.75*sqrt(fck);
41

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Na sequência, atribuem-se valores às variáveis chave do programa, conforme suas estruturas e condição de processamento, a respeito do fator de ajustamento de carga, $F1$, e do fator de ajustamento para efeitos de borda da laje, $F2$ (vide Figura 68, fragmento do APÊNDICE D, a seguir).

Figura 68 – Fragmento do APÊNDICE D



```

41
42 % Fator F1 de ajustamento de carga por grupo de eixo (SAST, SADT, TAST,
43 % TADT, TRDT e QADT)
44 - F1=[9 18 18 36 54 72];
45
46 % Definição do fator F2 de ajustamento para efeitos de borda
47 % da laje a depender da existência ou não de acostamento
48 - if AC==1
49 -     F2=0.94;
50 - else
51 -     F2=0.06;
52 - end
53

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

A variável AC (linha 48, acima) é um comando seletivo da condição de contorno do pavimento, sendo $F2$ uma função de AC por meio de uma estrutura de seleção IF, que direciona os cálculos para serem submetidos aos coeficientes $a-j$ para o cálculo do fator de erosão, $F3$. Nessa fase, ainda se faz necessário a informação de mais uma importante condição de processamento, que é a existência ou não de barras de transferência, através da BT (vide Figura 69, fragmento do APÊNDICE D, a seguir):

Figura 69 – Fragmento do APÊNDICE D

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
52 - end
53
54 % Coeficientes a-j para cálculo do fator de erosão F3 para
55 % cada tipo de eixo (SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT)
56 - if BT==0
57     % Sem barra de transferência
58     if AC==0
59         % Sem acostamento
60         ajF3=[0.745    1.330    1.907    1.907    2.034    2.034; ...
61              533.8    537.5    448.3    448.3    440.3    440.3; ...
62              -0.2071 -0.1929 -0.1749 -0.1749 -0.2776 -0.2776; ...
63              -42419  -43035  -35827  -35827  -36194  -36194; ...
64              0.0405   0.0365   0.0382   0.0382   0.0673   0.0673; ...
65              27.27   26.44    0.64    0.64    15.77   15.77; ...
66              1547570 1586100 1291870 1291870 1315330 1315330; ...
67              -0.0044 -0.0039 -0.0060 -0.0060 -0.0084 -0.0084; ...
68              -1.4656 -1.4547 1.0741 1.0741 -1.2068 -1.2068; ...
69              -1384   -1344    50      50      -625    -625];
70     else
71         % Com acostamento
72         ajF3=[0.345    0.914    1.564    1.564    2.104    2.104; ...
73              534.6    539.8    404.1    404.1    245.4    245.4; ...
74              -0.1711 -0.1416 -0.1226 -0.1226 -0.2473 -0.2473; ...
75              -44908  -44900  -32024  -32024  -15007  -15007; ...
76              0.0347   0.0275   0.0256   0.0256   0.0469   0.0469; ...

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Procedimento idêntico consta no algoritmo para o caso de $BT = 1$ (“Com barras de transferência”).

Seguindo-se os passos do algoritmo, atribui-se valores ao também fator de ajustamento de carga $F4$. Note-se que os fatores $F1$ e $F4$ atuam em equações distintas (vide Seção 3.2.4.1), porém o mesmo procedimento computacional dado a $F1$ é destinado a $F4$ e que, em termos de valores, a única diferença entre ambos está no último elemento numérico que os compõem (para $F1$ é 72 e para $F4$ é 54).

Inicia-se o processo das rotinas de cálculo de $F3$ e da tensão equivalente, Se (vide Figura 70, fragmento do APÊNDICE D, a seguir):

Figura 70 – Fragmento do APÊNDICE D

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
144 % Cálculo do fator de erosão F3 e da tensão equivalente Se para cada tipo
145 % de eixo (SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT)
146 F3=zeros(1,6);
147 Se=zeros(1,6);
148
149 for i=1:6
150     F3(i)=ajF3(1,i) + ajF3(2,i)/D + ajF3(3,i)*log(Ef) + ajF3(4,i)/D^2 + ...
151         ajF3(5,i)*log(Ef)^2 + ajF3(6,i)*log(Ef)/D + ajF3(7,i)/D^3 + ...
152         ajF3(8,i)*log(Ef)^3 + ajF3(9,i)*log(Ef)^2/D + ajF3(10,i)* ...
153         log(Ef)/D^2;
154
155     Se(i)=ajSe(1,i) + ajSe(2,i)/D + ajSe(3,i)*log(Ef) + ajSe(4,i)/D^2 + ...
156         ajSe(5,i)*log(Ef)^2 + ajSe(6,i)*log(Ef)/D + ajSe(7,i)/D^3 + ...
157         ajSe(8,i)*log(Ef)^3 + ajSe(9,i)*log(Ef)^2/D + ajSe(10,i)* ...
158         log(Ef)/D^2;
159 end

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Processam-se os cálculos do consumo de fadiga e de erosão (vide Figuras 71 e 72, fragmentos do APÊNDICE D, a seguir):

Figura 71 – Fragmento do APÊNDICE D

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x
160
161 % Avaliação do consumo de fadiga
162 Fp=0;
163
164 for i=1:6
165     for j=1:size(P,1)
166         if P(j,i)~=0
167             Sr=Se(i)/0.944/fcf*(P(j,i)*LSF/4.45/F1(i))^0.94;
168
169             if Sr>0.55
170                 Nf=exp((0.9719-Sr)/0.0828*log(10));
171             elseif 0.45<=Sr && Sr<=0.55
172                 Nf=(4.258/(Sr-0.4325))^3.268;
173             else
174                 Nf=-1;
175             end
176
177             if Nf~-1
178                 Fp=Fp+nrp(j,i)/Nf*100;
179             end

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 72 – Fragmento do APÊNDICE D

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x
184 % Avaliação do dano por erosão
185 Ep=0;
186
187 for i=1:6
188     for j=1:size(P,1)
189         if P(j,i)~=0
190             Ne=exp((14.524-6.777*max([0 (P(j,i)*LSF/4.45/F4(i))^2*10^
191                 F3(i)/41.35-9])^0.103)*log(10))/F2;
192             Ep=Ep+nrp(j,i)/Ne*100;
193         end
194     end
195 end

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

E, finalmente, processam-se os cálculos dos indicadores associados às restrições de desigualdades para fadiga e erosão a serem utilizados no *oaustroads.m*. (vide Figura 73, fragmento do APÊNDICE D, a seguir):

Figura 73 – Fragmento do APÊNDICE D

```

196
197 % Cálculo dos indicadores associados às restrições de desigualdades
198 % em relação aos critérios de fadiga e de erosão da AUSTROADS
199 c=[Fp-100 Ep-100];
200
201 % Não há restrição de igualdade a ser calculada
202 ceq=[];

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

oaustroads.m

Este arquivo, *oaustroads.m* (APÊNDICE E), realiza o processo de otimização. Seus parâmetros de entrada e de saída são (vide Figura 74, fragmento do APÊNDICE E, a seguir):

Figura 74 – Fragmento do APÊNDICE E

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
1 function [Do, fcko, fcfo, custo, Fp, Ep]=oaustroads (Ef, LSF, AC, BT, P, nrp)
2 -----
3 % OAUSTROADS.M
4 -----
5 % Função de otimização do pavimento rígido via AUSTROADS.
6 -----
7 % Parâmetros:
8 % Ef (E) - CBR efetivo do sub-leito (§).
9 % LSF (E) - Fator de segurança de carga.
10 % AC (E) - Flag se há (1) ou não (0) acostamento de concreto.
11 % BT (E) - Flag se há (1) ou não (0) junta com barra de transferência.
12 % P (E) - Matriz de cargas por eixo, em kN, referentes às categorias
13 % SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT.
14 % nrp (E) - Matriz de número de repetições previstas de carga, já
15 % considerando a vida útil do projeto, referentes às
16 % categorias SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT.
17 % Do (S) - Altura otimizada (mm).
18 % fcko (S) - Fck otimizado (MPa).
19 % fcfo (S) - Resistência característica otimizada do concreto à tração
20 % em flexão (MPa).
21 % custo (S) - Custo otimizado (R$/m^2).
22 % Fp (S) - Fadiga total percentual do projeto otimizado.
23 % Ep (S) - Erosão total percentual do projeto otimizado.

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Assim como no Modelo Conceitual (MC), no *austroads* o custo do metro cúbico do concreto em função do f_{ck} é definido pela função *cunt* (linha 38). Também, tanto no arquivo *opavrig.m* do MC quanto no arquivo *oaustroads.m*, a função objetivo está definida no primeiro argumento de entrada da função *fmincon*, como: @(vp)vp(1)/1000*cunt(vp(2)) (Linha 44) (vide Figura 75, fragmento do APÊNDICE E, a seguir).

Figura 75 – Fragmento do APÊNDICE E

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
36
37 % Define a função do custo do m^3 do concreto em função do fck em MPa
38 cunt=@(fck) 3.02207792208E+2-3.80543530543*fck+1.85425685425E-1*fck^2- ...
39 1.34680134680E-3*fck^3;
40
41 % Redefine algoritmo e executa função de otimização
42 options=optimset('Algorithm','interior-point');
43
44 [vp,custo]=fmincon(@(vp) vp(1)/1000*cunt(vp(2)), [250 40], [], [], [], [], [0 20], ...
45 [Inf 60], @(vp) raustroads(vp(1), vp(2), Ef, LSF, AC, BT, P, nrp), options);

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Mais uma vez, esta função objetivo é o custo do metro quadrado de placa do pavimento, pelas seguintes razões: o termo @(vp) demonstra que essa função recebe uma variável de

entrada chamada, *vp*, que é um vetor de duas posições: a primeira posição, *vp(1)*, é a espessura da placa em milímetro (mm), que é dividida por 1000 para mudança de unidade para metro, e a segunda, *vp(2)*, é o f_{ck} do concreto (MPa). *cunt(vp(2))* está consultando a função do custo do concreto por metro cúbico para o f_{ck} especificado em *vp(2)*. Multiplicando-se *vp(1)/1000* por *cunt(vp(2))* gera-se o custo do metro quadrado de placa do pavimento com a espessura definida em *vp(1)*.

Assim, *fmincon* efetua o processo de otimização em função de todos os parâmetros e restrições do projeto, buscando minimizar a função objetivo, que está associada à função do custo do concreto, que, por sua vez, está em função do f_{ck} .

O segundo argumento, [250 40], são valores estimados para inicialização do processo de otimização, na qual 250 é a espessura (mm) e 40 o f_{ck} (MPa). Os seus dois últimos vetores de entrada, [0 20] e [Inf 60], são, respectivamente, os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto, *h* e f_{ck} , do problema de otimização. Note-se que a correlação entre f_{ck} e f_{cf} , utilizada no *austroads*, é efetuada através da Equação 33 (Seção 3.2.3.3) (Linha 60, a seguir).

Finalmente, processam-se as variáveis otimizadas do projeto que governam a análise estrutural (vide Figura 76, fragmento do APÊNDICE E, a seguir).

Figura 76 – Fragmento do APÊNDICE E

```

46
47     % Variáveis otimizadas de projeto
48 -   Do=vp(1);
49 -   fcko=vp(2);
50
51     % Avalia fadiga total percentual e erosão total percentual do projeto
52     % otimizado
53 -   c=raustroads(Do,fcko,Ef,LSF,AC,BT,P,nrp);
54
55 -   Fp=c(1)+100;
56 -   Ep=c(2)+100;
57
58     % Cálculo da resistência característica otimizada à tração na flexão do
59     % concreto em MPa, de acordo com a Eq. (6.9) - Section 6.6.3 - GUIDE
60     % TO PAVEMENT TECHNOLOGY - PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010)
61 -   fcfo=0.75*sqrt(fcko);

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

5 EXEMPLOS DE OTIMIZAÇÃO DE PROJETO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS SIMPLES VIA *AUSTROADS*

Este capítulo está fundamentado em três exemplos imprescindíveis à verificação das possibilidades de análise estrutural otimizada proporcionada pelo *austroads*, assim como para a comprovação do objetivo deste trabalho.

Antes da apresentação do processo de otimização efetuado pelo *austroads*, faz-se necessário verificar a sua acurácia em cálculos correntes destinados ao projeto de pavimento rígido simples, ou seja, sem a ferramenta de otimização do *austroads*. O primeiro exemplo, portanto, destina-se a tal processo. O segundo exemplo presta-se à averiguação do processo de otimização do *austroads*, e, por fim, o terceiro exemplo abrange a análise estrutural da influência no projeto otimizado dos diversos parâmetros de entrada, bem como das possíveis condições de contorno da placa.

Os algoritmos computacionais dos dois primeiros exemplos encontram-se apresentados nos APÊNDICES F e G, respectivamente. Para implementar o terceiro exemplo utiliza-se o Cenário 2 do segundo exemplo.

5.1 Primeiro Exemplo

Este exemplo destina-se à verificação da acurácia do algoritmo *austroads*, exceto otimização, através da implementação de cálculo dos percentuais de erosão e de fadiga, baseada nos dados do exemplo de projeto apresentado pela AUSTROADS de 2010, APPENDIX L - EXAMPLES OF USE OF DESIGN PROCEDURE FOR RIGID PAVEMENTS – p. 242-243 - GUIDE TO PAVEMENT TECHNOLOGY - PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010) (vide ANEXO K).

Busca-se verificar e validar o algoritmo *austroads*, reproduzindo o procedimento do guia AUSTROADS de 2010, sem o processo de otimização, utilizando-se como veículo o supracitado exemplo e seus dados numéricos, para fins de cotejo entre os resultados oriundos de cada um dos processos. Vale ressaltar que o algoritmo computacional denominado *ex2austoads_new* (vide APÊNDICE F) é um ajuste do *ex2austoads* (vide APÊNDICE I ou APÊNDICE J) por não ter ligação com a ferramenta de otimização, *oaustroads*, mas apenas com *raustroads*, e por utilizar os mesmos parâmetros de entrada utilizados no exemplo original da AUSTROADS de 2010.

Processando o *ex2austroads_new*, obtêm-se os seguintes percentuais para fadiga (Fp) e erosão (Ep) (vide Figura 77, fragmento do APÊNDICE F, abaixo):

Figura 77 – Fragmento do APÊNDICE F

```

Command Window
>> [custo, Fp, Ep]=ex2austroads_new

custo =

    71.9644

Fp =

    125.3350

Ep =

    119.3405

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Fazendo a comparação desses resultados com os respectivos do exemplo original da AUSTROADS de 2010 (vide Figura 78, fragmento do ANEXO K, abaixo), percebe-se quão próximos eles estão uns dos outros.

Figura 78 – Fragmento do ANEXO K

180	234.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00	
170	221.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00	
160	208.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00	
150	195.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00	
				Total fatigue %	125.4	Total erosion %	119.3

Austroads 2010

Fonte: AUSTROADS (2010).

A diferença entre os Fp foi de 0,05%, e a diferença entre os Ep foi de 0,03%; portanto, desprezíveis, sendo os resultados praticamente idênticos.

Portanto, está verificada a eficácia do *austroads* no que tange à sua capacidade de cálculos correntes de projeto de pavimentos rígidos simples; em outras palavras, os algoritmos

ex2austroads e *raustroads* tiveram sua acurácia comprovada. A próxima etapa será comprovar a eficácia do *austroads* no tocante à otimização de projeto de pavimentos rígidos simples (*oaustroads*), que será realizada por meio dos dois exemplos, mais adiante.

Quanto ao exemplo original da AUSTROADS de 2010, anteriormente reproduzido, a análise estrutural não está completa, como o próprio guia e a PCA recomendam, já que tanto os percentuais de fadiga quanto os de erosão ultrapassaram os 100% (Fp e Ep com 125,3% e 119,3%, respectivamente); neste caso, a espessura-tentativa deve ser aumentada. A propósito, dando-se continuidade à análise estrutural por meio do *ex2austroads_new*, por recomendação dos métodos, os passos seguintes são, por tentativa, encontrar o valor ideal da espessura, D , da placa, capaz de tornar o Fp e Ep o mais próximo possível de 100%, sem ultrapassar este limite.

Em uma segunda tentativa, adotando-se para D o valor de 220 mm, são encontrados para Fp e Ep os valores de 36,2% e 73,0%, respectivamente, muito aquém de 100%, ou seja, com estes percentuais a placa estaria superdimensionada, portanto, antieconômica. Dando-se continuidade à análise estrutural, em uma terceira tentativa atribui-se a D o valor de 215 mm tendo-se como resposta para Fp e Ep os valores de 66,3% e 93,3%, respectivamente.

A grande maioria dos projetistas se daria por satisfeita com os resultados dessa última iteração, considerando uma análise estrutural efetuada manualmente utilizando-se ábacos e tabelas. Mas, com o poder do computador, aliado aos algoritmos *ex2austroads_new* e *raustroads*, obter resultados ainda melhores é uma tarefa simples de se fazer.

Em uma quarta tentativa, para D de 214 mm, obtêm-se os valores de 75,2% e 98,0% para Fp e Ep, respectivamente. Reduzindo, ainda mais, a espessura, D , para 213 mm, são encontrados para Fp e Ep os valores de 85,3% e 102,9%, respectivamente, não satisfazendo à restrição do limite quanto à erosão. Portanto, a melhor solução é a decorrente da quarta iteração e a espessura otimizada, D_o , é 214 mm. Note-se que, além desses resultados imprescindíveis ao dimensionamento de pavimentos rígidos, o *ex2austroads_new* também fornece o custo do metro quadrado da placa de concreto, ferramenta herdada do algoritmo *oaustroads* (Seção 4.2). A Figura 79, a seguir, reúne, de forma didática, todas as tentativas ora apresentadas, inclusive a inicial.

O guia AUSTROADS de 2010 recomenda ao projetista acrescentar 5 mm na espessura encontrada (vide Seção 3.2.4), a favor da segurança. A PCA, no entanto, não teceu comentário a esse respeito. Isso leva à discussão ao âmbito do bom senso e da experiência, que todo projetista deve possuir. No entanto, com o algoritmo *austroads* determina-se a espessura otimizada, a partir da qual poder-se-á efetuar ajustes para arredondamento; por essa razão não se faz necessário tal procedimento.

Figura 79 – Análise estrutural via *ex2austroads_new*

1ª Tentativa: $D = 210$ mm

Name ▲	Value
custo	71.9644
Ep	119.3405
Fp	125.3350

2ª Tentativa: $D = 220$ mm

Name ▲	Value
custo	75.3912
Ep	73.0193
Fp	36.1927

3ª Tentativa: $D = 215$ mm

Name ▲	Value
custo	73.6778
Ep	93.3104
Fp	66.3385

4ª Tentativa: $D = 214$ mm

Name ▲	Value
custo	73.3351
Ep	98.0029
Fp	75.1559

5ª Tentativa: $D = 213$ mm

Name ▲	Value
custo	72.9924
Ep	102.9278
Fp	85.2488

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

5.2 Segundo Exemplo

Este segundo exemplo, já se acoplando a ferramenta de otimização (*oaustroads*), é composto por três cenários de projeto, cada um deles tendo como pano de fundo um dado projeto de pavimento rígido simples para verificação da eficácia do processo de otimização, pelo algoritmo *austroads*, com considerações e análises.

Acerca da segunda versão, o objetivo específico é o de se averiguar o comportamento dos parâmetros de saída dos Cenários 1, 2 e 3, em resposta ao aumento do limite mínimo do f_{cf} . Por motivos técnicos, cada cenário possui duas versões de otimização: a primeira, restringindo-se o f_{cf} mínimo em 3,4 MPa (Quadro 4), e a segunda, em 4,5 MPa (Quadro 5). Com relação ao primeiro caso, tal restrição objetiva avaliar que níveis de f_{cf} o programa atinge em relação ao limite recomendado pela AUSTROADS de 2010 (4,0 MPa), a fim de enriquecer

a análise estrutural proporcionada pelo *austroads*, bem como sua eficácia. Esta opção permite iterações mais ousadas no que se refere à resistência do concreto à tração na flexão, além de possibilitar ao projetista uma análise estrutural crítica, controle da situação e tomada de decisões seguras e precisas.

Apresentam-se os três cenários, a seguir. Registra-se que o projeto correspondente ao Cenário 2 é o mesmo utilizado para o primeiro exemplo, que desta feita será otimizado automaticamente.

5.2.1 Cenários

- Cenário 1: Packard e Tayabji, em *Concrete Pavement Design and Rehabilitation* — pp. 225-236 — *Proceedings — Third International Conference, Purdue University, 1985* (vide ANEXO J);
- Cenário 2: AUSTROADS de 2010, APPENDIX L - EXAMPLES OF USE OF DESIGN PROCEDURE FOR RIGID PAVEMENTS - p. 242-243 - GUIDE TO PAVEMENT TECHNOLOGY - PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010) (vide ANEXO K);
- Cenário 3: Manual de Pavimentos Rígidos do Departamento Nacional de Infraestruturas de Transporte - DNIT, 2005 (vide ANEXO L).

Reúnem-se os parâmetros originais dos três cenários conforme o Quadro 3. O resultado da otimização de cada um deles, por motivos já citados, é obtido por meio de duas versões. A primeira (Quadro 4) é executada com restrição mínima de 3,4 MPa para o f_{cf} e a segunda, de 4,5 MPa (Quadro 5).

Note-se que no Quadro 3 alguns campos estão originalmente sem informação, porém sem prejuízo ao presente estudo. O parâmetro *localidade* não é informado no terceiro cenário; o HVAG (estudo do tráfego) é informado apenas no segundo cenário, já que nos demais são utilizados dados de tráfego pré-processados.

É importante frisar que, diferentemente do método PCA de 1984, o método AUSTROADS de 2010, autor do segundo cenário, utiliza para o projeto de pavimentos rígidos simples o *CBR* efetivo, CBR_e , (Figura 49) ao invés do módulo de reação do sistema de fundação (subleito ou sub-base), k , utilizado no primeiro e terceiro cenários, que seguem o PCA de 1984. Vale recapitular que o CBR_e é uma correlação entre o *CBR* do subleito e o suporte da camada de sub-base; ou seja, por analogia, é o k equivalente do topo da sub-base do PCA de 1984.

Para corrigir isto, correlaciona-se o k de cada cenário com o seu correspondente CBR_e . Este procedimento é feito por dois processos distintos: o primeiro passo é converter K em CBR, em seguida CBR em CBR_e em função do tipo de sub-base. O k dos Cenários 1 e 3 é referente a módulos de reação equivalentes de tipos diferentes de sub-base. Enquanto o k do Cenário 1 é inerente a uma sub-base não tratada com 10 cm de espessura, o do Cenário 3 refere-se ao do topo da sub-base de brita tratada com cimento, espessura 12 cm.

Para o Cenário 1 inicialmente realiza-se a mudança de unidade do Sistema Americano para o SI, com a seguinte relação: $1 \text{ pci} = 1 \text{ lbf/in}^3 = 0,271 \text{ MPa/m}$, de modo que k , de 130 pci, passa a valer 35,23 MPa/m. Sabendo-se que $1 \text{ MPa} = 10 \text{ kgf/cm}^2$, tem-se $k = 3,52 \text{ kgf/cm}^2 \cdot \text{cm}$. Fazendo uso do ábaco representado pela Figura 26 encontra-se o CBR correspondente de 4,5%. De posse desse valor, lança-se mão do ábaco representado pela Figura 50 para, finalmente, obter o CBR_e de 20%.

A propósito, o mesmo procedimento de mudança de unidade é feito para o f_{cf} , utilizando-se a relação: $1 \text{ psi} = 1 \text{ lbf/in}^2 = 0,01 \text{ MPa}$. Assim, o f_{cf} de 650 psi equivale a 6,5 MPa. Ambas as conversões de unidade descritas são necessárias para compatibilizá-las com as utilizadas nas formulações do algoritmo *austroads*.

Note-se que, na conversão do CBR em CBR_e , devido à limitação do ábaco da Figura 49 de exemplares de camada de sub-base e espessura, adotado pelo método AUSTROADS de 2010, faz-se necessário utilizar a configuração mais aproximada para a camada de sub-base em estudo, que, no caso do Cenário 1 é a sub-base de 125 mm Bound (asfáltico).

Com relação ao Cenário 3 o procedimento é mais simples, já que não há a necessidade de mudança de unidade de nenhum parâmetro. Conforme mencionado, o k do Cenário 3 é intrínseco ao topo da sub-base, o que implica na utilização de ábacos como o representado pela Figura 41, que correlaciona CBR do subleito com o módulo de reação do topo da sub-base. Feito isso, os passos seguintes são idênticos aos já citados, quando da conversão do k do subleito em CBR_e . Obtém-se para o Cenário 3 o CBR_e de 35%, também se supondo similaridade entre camadas e espessuras.

Como o Cenário 2 é de autoria da própria AUSTROADS de 2010, dispensaram-se quaisquer procedimentos preliminares.

Quadro 3 – Dados iniciais dos Cenários 1, 2 e 3

Cenário nº	1	2	3
Localidade	Rural	Urbana	-
HVAG	-	$40 \cdot 10^6$	-
k (MPa)	35,23	-	100
CBR_e (%)	20	75	35
LSF	1,2	1,3	1,2
f_{cf} (MPa)	6,5	4,5	4,8
Barra de transf. (BT)	Sim	Não	Não
Acostamento (AC)	Não	Sim	Não
h_{sb} (mm)	100 (untreated)	150 (LMC)	120 (BTC)
D_{placa} (mm)	241,3	210	260
Fp (%)	62,8	125,4	17,1
Ep (%)	38,9	119,3	106,2

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Uma vez realizadas todas as transformações necessárias à implementação do *austroads*, o passo seguinte é a atribuição, pelo usuário, de valores aos parâmetros de entrada de projeto (vide Figuras 80 a 83, fragmentos dos APÊNDICE E e G, a seguir). Essas figuras são referentes ao algoritmo *oaustroads* e ao Cenário 1, 1ª versão do Exemplo 2, respectivamente. Note-se os parâmetros de entrada, cujos valores são facilmente manuseados pelo usuário.

Os dois primeiros fragmentos de figura, apresentados na sequência, referem-se ao *oaustroads*, cujo funcionamento já foi explicado na Seção 4.2. As alterações do valor do f_{ck} e do f_{cf} são efetuadas neste algoritmo. Na sequência, o penúltimo e o último fragmentos de figura reportam-se ao Cenário 1, 1ª versão do Exemplo 2 (apenas a título de exemplo). Note-se que as alterações dos parâmetros de entrada concernentes aos esforços externos e à geometria da estrutura (condições de contorno) são realizadas no próprio algoritmo específico do projeto.

Figura 80 – Fragmento do APÊNDICE E

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
36
37 % Define a função do custo do m^3 do concreto em função do fck em MPa
38 cunt=@(fck)3.02207792208E+2-3.80543530543*fck+1.85425685425E-1*fck^2- ...
39 1.34680134680E-3*fck^3;
40
41 % Redefine algoritmo e executa função de otimização
42 options=optimset('Algorithm','interior-point');
43
44 [vp,custo]=fmincon(@(vp)vp(1)/1000*cunt(vp(2)),[250 40],[],[],[],[0 20], ...
[Inf 60],@(vp)raustroads(vp(1),vp(2),Ef,LSF,AC,BT,P,nrp),options);

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 81 – Fragmento do APÊNDICE E

```

50
57 % Cálculo da resistência característica ótima à tração na flexão do
58 % concreto em MPa, de acordo com a Eq. (6.9) - Section 6.6.3 - GUIDE
59 % TO PAVEMENT TECHNOLOGY - PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010)
60 fcfo=0.75*sqrt(fccko);

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 82 – Fragmento do APÊNDICE G

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m
29 % -----
30 % CBR efetivo do sub-leito (%)
31 Ef=20;
32
33 % Fator de segurança de carga
34 LSF=1.2;
35
36 % Flag se há (1) ou não (0) acostamento de concreto
37 AC=0;
38
39 % Flag se há (1) ou não (0) junta com barra de transferência
40 BT=1;
41
42 % Matriz de cargas por eixo, em kN, referentes às categorias SAST, SADT
43 % TAST, TADI, TRDT e QADI
44 P=[0 150 0 260 0 0; ...
0 140 0 240 0 0; ...
0 130 0 220 0 0; ...

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 83 – Fragmento do APÊNDICE G

```

raustroads.m x oaustrroads.m x ex1austrroads.m* x ex2austrroads.m x ex3austrroads.m x +
63 % Matriz de número de repetições previstas de carga, já considerando a
64 % vida útil do projeto, referentes às categorias SAST, SADT, TAST, TADT,
65 % TRDT e QADT
66 - nrp=[ 0 6310 0 21320 0 0; ...
67 0 14690 0 42870 0 0; ...

```

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

5.2.1.1 Análise dos resultados

Apresentam-se, na sequência, comentários, quadros e gráficos concernentes a cada versão de otimização.

Primeira versão da otimização (3,4 MPa)

Com base no Quadro 4, a seguir, os cenários 1, 2 e 3, iniciais, após serem submetidos ao processo de otimização via *austroads*, na primeira versão (3,4 MPa), apresentaram um aumento na espessura da placa de 6,44%, 8,10% e 6,80% e redução de f_{cf} em -36,92%, -8,89% e -12,50%, respectivamente. Note-se que os experimentos com o f_{cf} mínimo fixado em 3,4 MPa não apresentaram resultado de f_{cf} otimizado inferior a 4,0 MPa, atendendo, portanto, à recomendação do AUSTROADS de 2010. A variação entre os consumos de fadiga (F_p) otimizado e inicial é de 59,2%, -20,2% e 484,8%, respectivamente; já para o consumo de erosão (E_p) é de -29,6%, -55,4% e -32,2%, respectivamente. Todos apresentam consumo de fadiga (F_p) máximo de 100%.

Quadro 4 – Resultados da otimização pelo algoritmo *austroads* dos Cenários 1, 2 e 3 (iniciais) – 1ª versão: f_{cf} mínimo de 3,4 MPa

Cenário (n°)	Inicial			Otim. via <i>austroads</i> (3,4 MPa)		
	1	2	3	1	2	3
D_{placa} (mm)	241	210	250	257	227	267
f_{cf} (MPa)	6,5	4,5	4,8	4,1	4,1	4,2
F_p (%)	62,8	125,4	17,1	100	100	100
E_p (%)	38,9	119,3	106,2	27,4	53,2	72,0

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Supondo-se ser a curva do custo do f_{ck} adequada a cada cenário, o processo de otimização, em busca dos valores otimizados dos parâmetros de entrada capazes de minimizar

a função objetivo custo (C_p), aumentou a espessura da placa e reduziu a resistência do concreto, f_{cf} , à tração na flexão de todos os cenários. É importante ressaltar que em todos os cenários a otimização é governada pelo fenômeno de fadiga (100%), que está intimamente ligada à resistência do concreto à tração na flexão, por meio da relação entre tensões, S (vide Equação 40 da Seção 3.2).

O aumento da espessura da placa, no processo de otimização, corrobora a teoria de Westergaard expressa pelas Equações 4, 5 e 6, cuja sensibilidade é regida pelo inverso do quadrado da espessura da placa, que acelera o efeito redutor da tensão se comparado com o resultado que o aumento de f_{cf} provocaria. Já a redução do f_{cf} , nesse caso, deve-se ao ajuste que lhe foi dado pelo algoritmo, para concretizar a otimização com o percentual de 100% para o consumo de fadiga.

Além da resistência, outro fato de grande importância é a economicidade obtida na otimização, pois tanto F_p quanto E_p quando não atingem os 100% prescritos alcançam percentuais elevados permitindo o pavimento operar em sua plenitude, ao longo de sua vida útil. Em outras palavras, não há folga estrutural no projeto efetuado a partir do *austroads*.

Segunda versão de otimização

Com base no Quadro 5, a seguir, os cenários 1, 2 e 3, iniciais, após serem submetidos ao processo de otimização via *austroads*, na segunda versão (4,5 MPa), apresentaram um aumento na espessura da placa de 0,41%, 1,90% e 2,80% e redução de f_{cf} em -30,77%, 0% e -6,26%, respectivamente. Com o aumento do f_{cf} de 3,4 para 4,5 MPa (limite inferior) o aumento na espessura dos cenários 1, 2 e 3 foi bem menor comparada com o da primeira versão. Percebe-se, também que todo processo ficou restrito ao valor de 4,5 MPa (recomendação do DNIT). A variação entre os consumos de fadiga (F_p) otimizado e inicial é de 59,2%, -20,2% e 270,2%, respectivamente; já para o consumo de erosão (E_p) é de 24,4%, -16,2% e -5,8%, respectivamente.

Quadro 5 – Resultados da otimização pelo algoritmo *austroads* dos Cenários 1, 2 e 3 (iniciais) - 2ª versão: f_{cf} mínimo de 4,5 MPa

Cenário (nº)	Inicial			Otim. via <i>austroads</i> (4,5 MPa)		
	1	2	3	1	2	3
D_{placa} (mm)	241	210	250	242	214	257
f_{cf} (MPa)	6,5	4,5	4,8	4,5	4,5	4,5
Fp (%)	62,8	125,4	17,1	100	79,1	63,3
Ep (%)	38,9	119,3	106,2	48,4	100	100

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Do mesmo modo que na primeira versão, o processo de otimização, em busca dos valores otimizados dos parâmetros de entrada capazes de minimizar a função objetivo custo (C_p), aumentou a espessura da placa e reduziu a resistência do concreto, f_{cf} , à tração na flexão de todos os cenários. Note-se que na primeira versão o processo de otimização em cada cenário é dominado pela fadiga, que atingiu 100%, já na segunda versão há mudança na regência da otimização dos Cenários 2 e 3, que passa a ser governada pela erosão, que também alcançou os 100%.

Isto porque quando o limite inferior do f_{cf} passou a ser de 4,5 MPa a placa se tornou mais rígida, o que repercutiu na redução do consumo de fadiga (vide Equação 40 da Seção 3.2), desviando o ajuste do processo de otimização para o consumo de erosão. Como originalmente os cenários 2 e 3 já possuíam elevados consumos de erosão, isto explica o fato de neles esse consumo atingir os 100%, não ocorrendo o mesmo com o cenário 1, cujo consumo de erosão já era inferior ao de fadiga.

Primeira versão de otimização versus a Segunda

Os três cenários podem agora ter os resultados obtidos na primeira versão cotejados com os respectivos da segunda, incluindo-se nessa análise o custo, face à influência no projeto da variação de f_{cf} de 3,4 para 4,5 MPa, uma vez que todos passaram pelo mesmo processo de otimização.

Comparando-se os dados dos três cenários obtidos na primeira versão com os respectivos da segunda versão, constata-se que há uma redução na espessura da placa de -5,84%, -5,73% e -3,75%, como reflexo do aumento de f_{cf} em 9,76%, 9,76% e 7,14%, respectivamente (vide Figura 85 a e b).

Os cenários, ainda, apresentam variação entre os consumos de fadiga (F_p) de 0%, -20,9% e -36,7%; já para o consumo de erosão (E_p), de 76,6%, 88,0% e 39,0%, respectivamente.

Reitera-se que no processo de otimização via *austroads* os consumos de fadiga (F_p) ou de erosão (E_p) (raramente ambos), sempre atingem os 100% prescritos em projeto. E isto é consequência do ajuste combinado da espessura da placa com a resistência à tração na flexão do concreto (f_{cf}), culminando na solução mais econômica e mais segura, concomitantemente, corroborando, portanto, a hipótese deste trabalho.

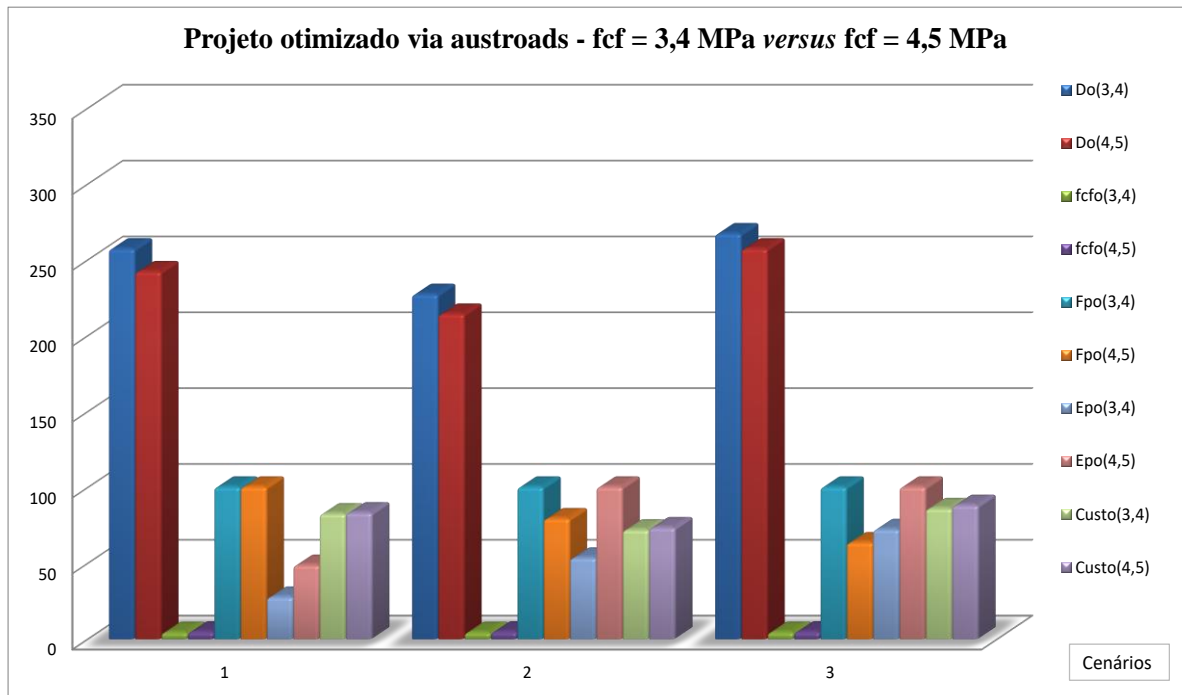
Na sequência, apresenta-se a otimização dos três cenários via *austroads* com restrição para f_{cf} mínimo de 3,4 MPa (primeira versão) versus 4,5 MPa (segunda versão) no Quadro 6, e os gráficos auxiliares na visualização dos resultados das otimizações, Figuras 84 a 87.

Quadro 6 – Cenários 1, 2 e 3 otimizados pelo algoritmo *austroads* - 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa versus 2ª versão: $f_{cf} = 4,5$ MPa

Cenário (nº)	Otim. <i>austroads</i> (3,4 MPa)			Otim. <i>austroads</i> (4,5 MPa)		
	1	2	3	1	2	3
D_{base} (mm)	257	227	267	242	214	257
f_{cf} (MPa)	4,1	4,1	4,2	4,5	4,5	4,5
F_p (%)	100	100	100	100	79,1	63,3
E_p (%)	27,4	53,2	72,0	48,4	100	100
Custo (R\$/m ²)	82,36	71,76	85,80	83,01	73,19	87,93

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

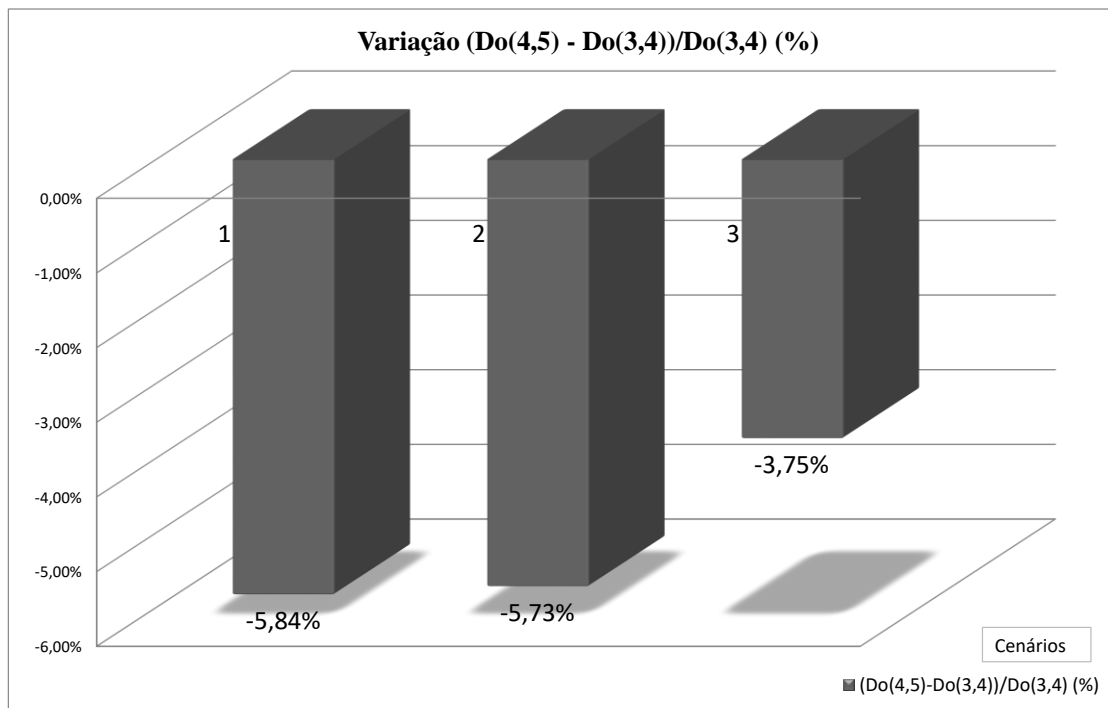
Figura 84 – Gráfico geral dos resultados da otimização via *austroads* dos Cenários 1, 2 e 3 - 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa versus 2ª versão: $f_{cf} = 4,5$ MPa



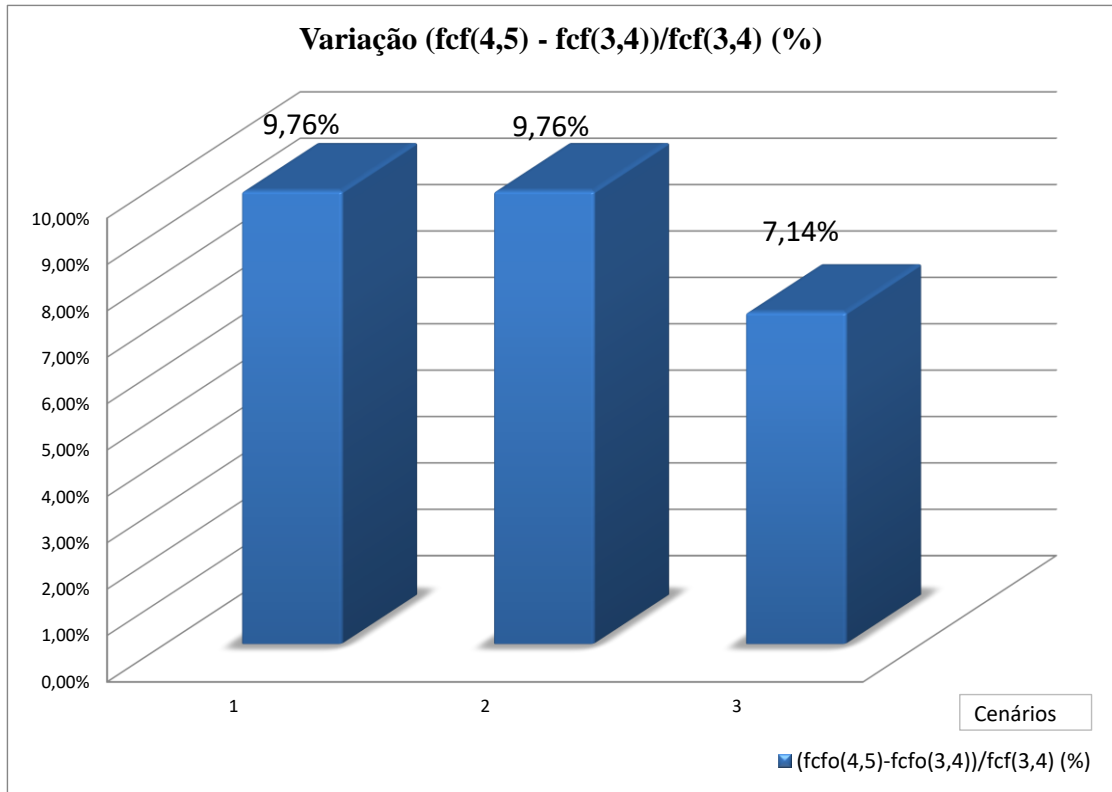
Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 85 – Gráficos específicos dos resultados da otimização via *austroads* dos Cenários 1, 2 e 3 - 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa versus 2ª versão: $f_{cf} = 4,5$ MPa (a-b)

a)

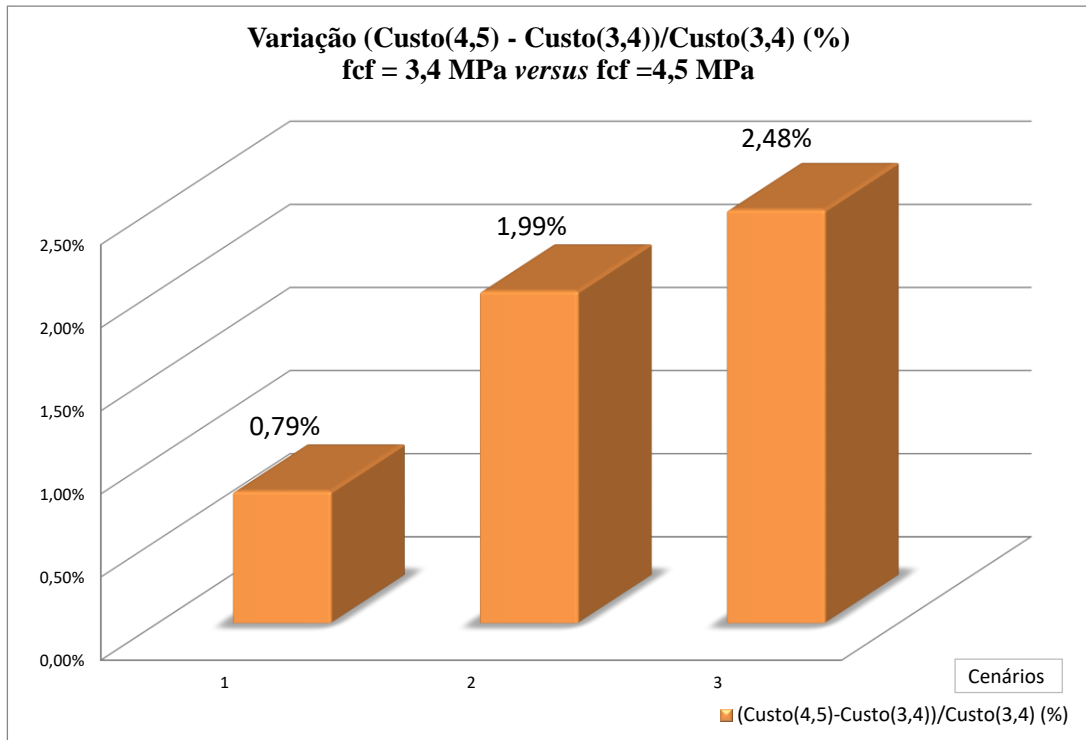


b)



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 86 – Gráficos da variação do custo dos Cenários 1, 2 e 3 otimizados via *austroads* - 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa versus 1ª versão $f_{cf} = 4,5$ MPa



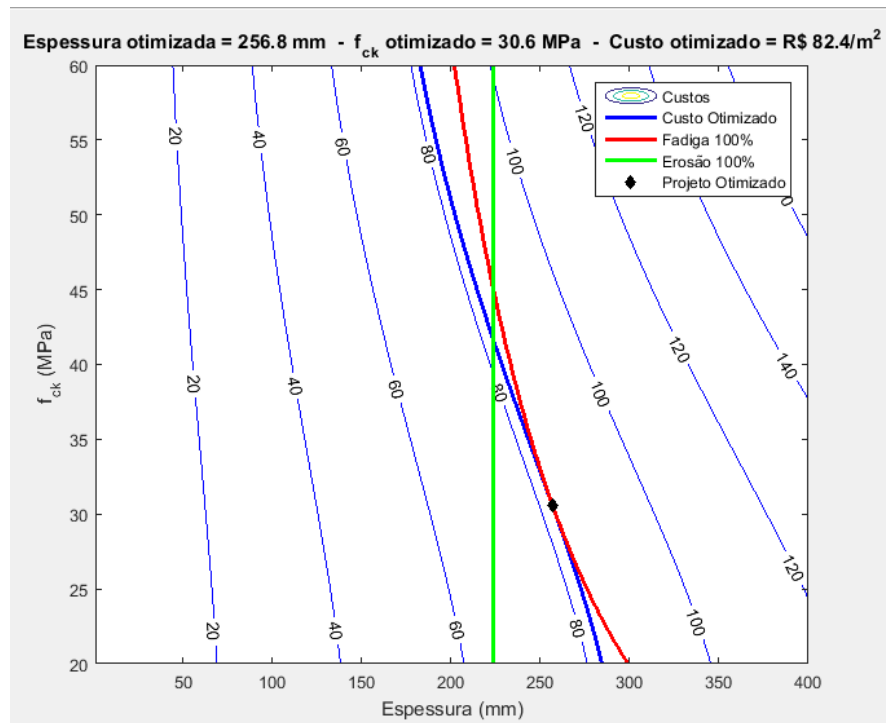
Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Os gráficos apresentados na Figura 87, a seguir, são adequados na análise estrutural da otimização. Eles retratam, de modo objetivo, o contexto de cada processo de otimização, auxiliando no entendimento por meio de uma visão mais concreta do processo. Os gráficos do Cenário 3, por exemplo, informam que o projeto otimizado na versão 1 é governado pela fadiga (100%) e passa, na versão 2, a ser regido pela erosão (100%). Note-se que o projeto otimizado é representado pelo ponto de interseção da curva do Custo otimizado com pelo menos uma das curvas dos fenômenos de ruína governantes. Ademais, os gráficos trazem informações importantes do processo de otimização, que são os parâmetros de saída otimizados, espessura da placa, resistência do concreto e o custo do metro quadrado de placa de concreto; tudo isso, de forma clara e objetiva, sendo, portanto, uma ferramenta auxiliar na análise estrutural.

Figura 87 – Gráficos da otimização via *austroads* dos Cenários 1, 2 e 3 - 1ª versão: $f_{cf} = 3,4$ MPa versus 2ª versão $f_{cf} = 4,5$ MPa (a–f)

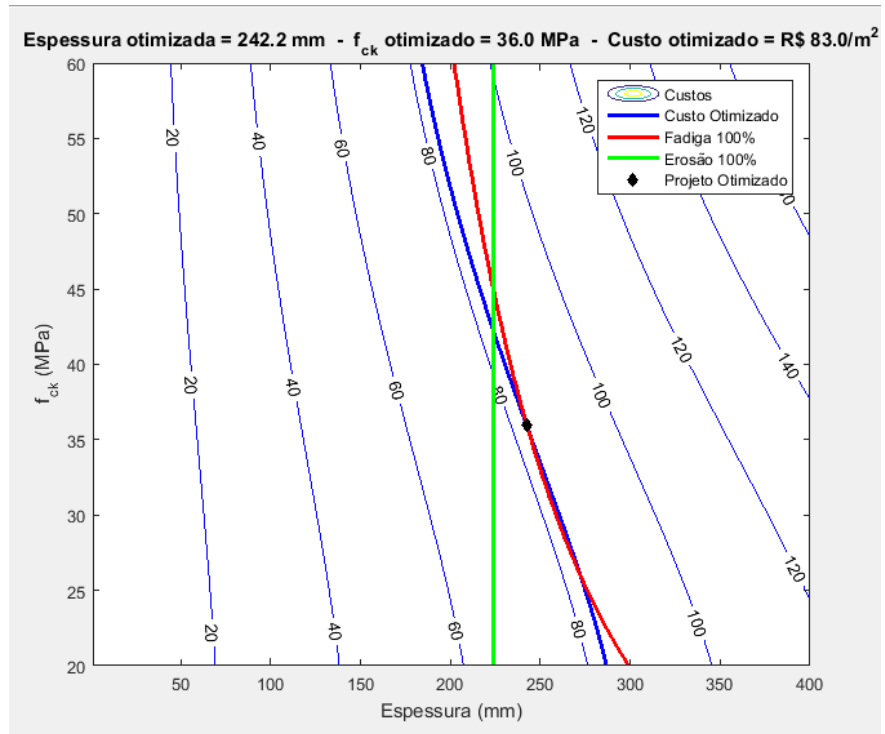
Cenário 1 - 1ª versão

a)



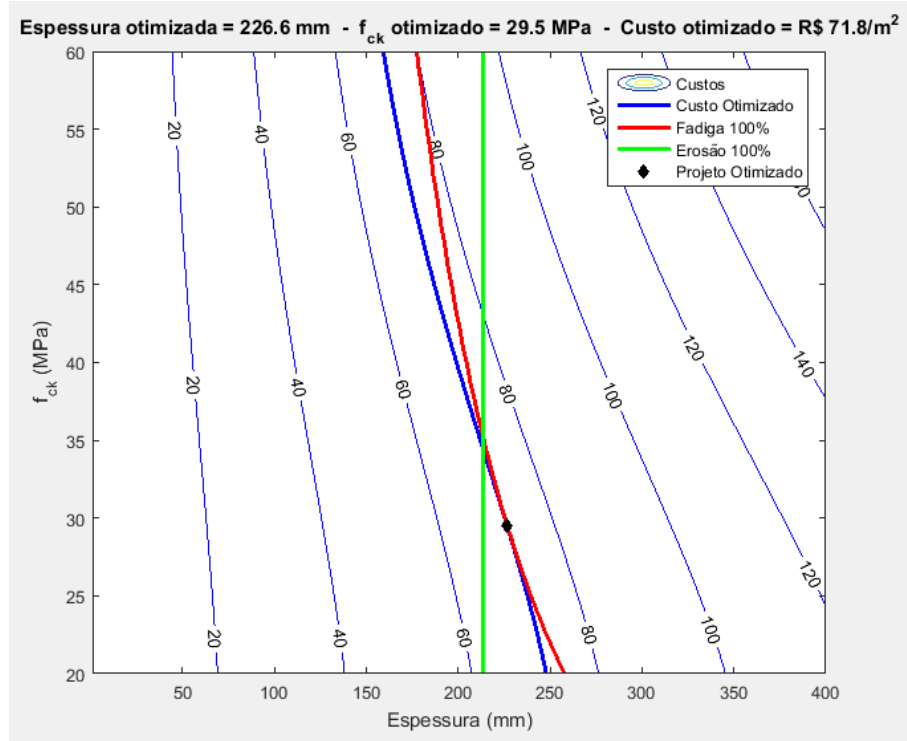
Cenário 1 - 2ª versão

b)



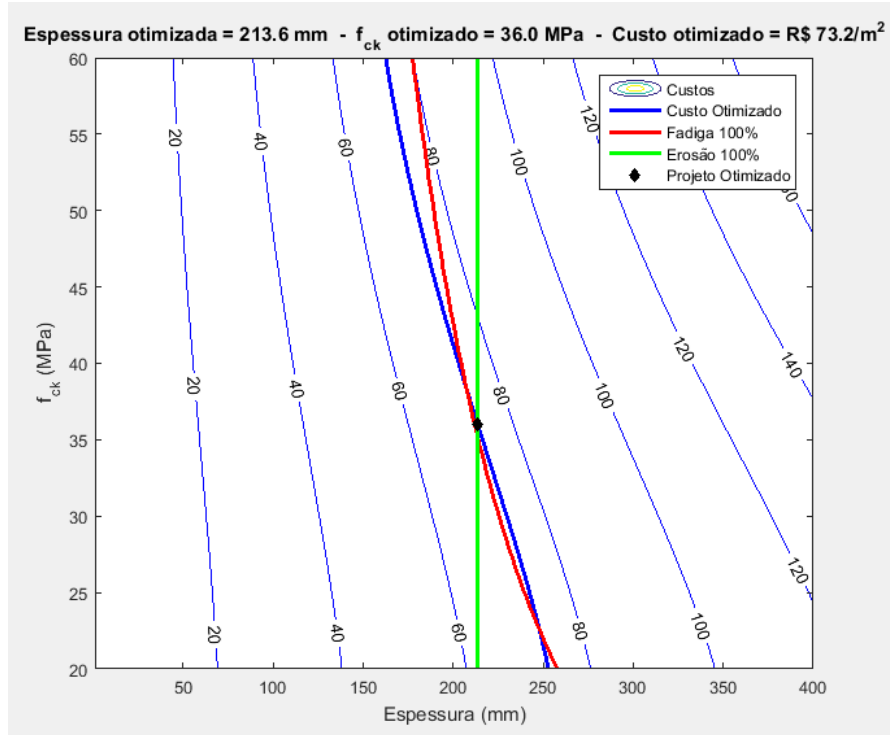
Cenário 2 - 1ª versão

c)



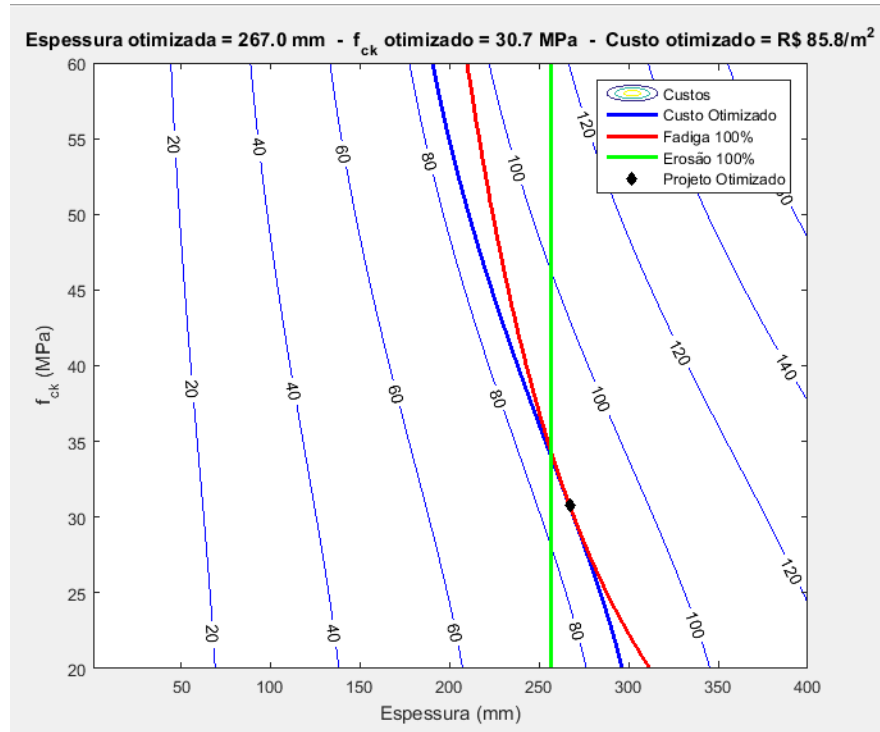
Cenário 2 - 2ª versão

d)



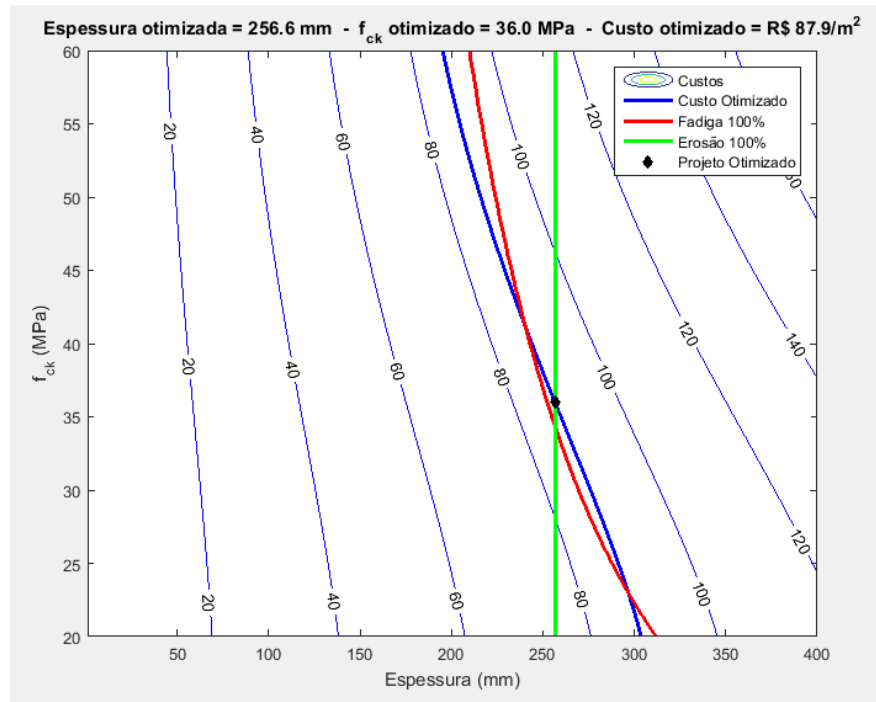
Cenário 3 - 1ª versão

e)



Cenário 3 - 2ª versão

f)



5.3 Terceiro Exemplo

Este exemplo compreende a análise estrutural verificando-se a influência, nos resultados finais do processo de otimização por meio do algoritmo *austroads*, da manipulação de valores dos diversos parâmetros de entrada associados ao projeto, assim como de todas as combinações das condições de contorno da placa do pavimento, através de uma análise paramétrica das respostas.

Em uma outra perspectiva, tais análises tornam-se úteis à verificação do *austroads*, sua acurácia, em resposta às possíveis configurações de uma análise estrutural complexa.

Note-se que no processo de otimização efetuado pelo *austroads* apenas três parâmetros de entrada, D , f_{cf} e o custo do f_{ck} , são responsáveis pela solução otimizada, cujos parâmetros de saída se restringem a D e f_{cf} , otimizados. Neste processo, os percentuais de fadiga e de erosão estão diretamente ligados à melhor combinação de valores daqueles parâmetros de entrada que os deixem iguais a 100% ou o mais próximo possível deste limite, sem ultrapassá-lo.

Alternativamente, dentre outros parâmetros de entrada, há uma quantidade significativa de configurações admissíveis que resultam também em soluções otimizadas. Parâmetros de entrada que interferem expressivamente nos resultados do projeto como o módulo de reação do

subleito, k (ou CBR efetivo, E_f), é de grande interesse à análise estrutural. A influência de k é facilmente percebida ao analisar a fórmula que fundamenta a Teoria do líquido denso (Equação 3). Outros parâmetros de entrada como: condições de contorno da placa, a frequência e a magnitude das cargas por eixo e o fator de segurança de carga são igualmente importantes na análise estrutural do pavimento. Todos esses parâmetros, apesar de não estarem envolvidos diretamente no processo de otimização do custo do metro quadrado da placa de concreto, ora em estudo, interferem, de forma indireta, na solução otimizada, quando manipulados.

A fim de se efetuar a análise paramétrica dos efeitos causados nas respostas do projeto otimizado pelas variáveis de entrada, conceberam-se testes com diferentes configurações para os dados de entrada, a seguir.

Vale ressaltar que a unidade de medida para a espessura da placa adotada nesse exemplo é o milímetro, com duas casas decimais. Apesar de não ser usual em engenharia rodoviária, tal procedimento para aquele elemento estrutural, o objetivo é demonstrar os efeitos, na espessura, causados pela variação dos valores de parâmetros de entrada.

5.3.1 Testes

O presente exemplo está estruturado em quatro testes. A título de cotejo para fundamentar as conclusões das análises estruturais, os três primeiros testes são realizados com base nos estudos de tráfego dos cenários 2 e 3 do segundo exemplo. Para o quarto teste utiliza-se os três cenários do segundo exemplo.

Os parâmetros a serem analisados são:

- E_f : CBR efetivo (%);
- LSF: Fator de segurança de carga;
- AC: Acostamento (1 = sim e 0 = não);
- BT: Barras de transferência de carga (1 = sim e 0 = não); e
- f_{cf} : Resistência característica do concreto à tração na flexão (MPa).

Os parâmetros de saída são:

- D_o : Espessura da placa otimizada (mm);
- f_{cfo} : Resistência característica do concreto à tração na flexão otimizada (MPa);
- f_{cko} : Resistência característica do concreto à compressão otimizada (MPa); e
- $Custo_o$: Custo por metro quadrado de placa de concreto otimizado.

5.3.1.1 Primeiro Teste

No primeiro teste verifica-se o comportamento do projeto em função da variação progressiva do valor de E_f , em duas versões, com os demais parâmetros prescritos fixos (vide Figuras 88 e 89). Assim como no segundo exemplo, e pelas mesmas razões, o primeiro teste é realizado em duas versões: a primeira (versão 1), com o limite inferior para f_{cf} de 3,4 MPa e a segunda (versão 2), 4,5 MPa.

Configuração de entrada

O E_f sofre as seguintes variações: 35%, 45%, 55%, 65% e 75%. Para os cenários 2 e 3 as condições de contorno AC e BT têm valor 0 (zero). Os valores de LSF para os cenários 2 e 3 são, respectivamente: 1,3 e 1,2, ambos para tráfego pesado. Este teste resulta em 10 (dez) configurações de entrada para cada cenário.

A configuração das condições de contorno, acima descrita, tem por objetivo deixar a placa livre de restrições, a fim de se avaliar as respostas na espessura (D) e no f_{cf} em função das variações de E_f , permitindo um processo de otimização mais abrangente.

Análise dos resultados

Em ambos os cenários a primeira versão (f_{cf} de 3,4 MPa) apresenta-se mais econômica em todo teste, corroborando a função objetivo da otimização via *austroads*, que é diretamente proporcional ao custo do f_{ck} do concreto.

À medida em que E_f cresce D e *Custo* diminuem, em ambas as versões de ambos cenários, de forma não linear.

❖ Cenário 2

As espessuras (D) no início do teste têm, praticamente, o mesmo valor (232 mm). À medida em que E_f cresce, a diferença entre elas vai aumentando, culminado em uma diferença entre elas de 13 mm (1,3 cm). Note-se, porém, que a diminuição de D , em função do aumento de E_f , é mais expressiva na segunda versão; o mesmo ocorre com o *Custo*, já que ele é diretamente proporcional à espessura da placa. O *Custo*, como é diretamente proporcional à espessura (D), tem o gráfico com o mesmo comportamento que o desta.

Conforme dito, a primeira versão (f_{cf} de 3,4 MPa) apresenta-se mais econômica em todo teste. Em outras palavras, o aumento de f_{cf} de 3,4 para 4,5 MPa, como ocorreu no exemplo 2, não torna o projeto da placa mais vantajoso, mesmo com a redução de sua espessura (D).

Na versão 1 (f_{cf} de 3,4 MPa) todo processo de otimização é governado por F_p (100%); mas à medida em que E_f aumenta, E_p diminui. Na versão 2 há mudança na regência do processo de otimização, que passa a ser liderada por E_p (100%); porém, neste caso, o processo de otimização se apresenta mais favorável, em termos de F_p , à medida em que E_f cresce, sendo os melhores resultados aqueles com altos E_f .

❖ *Cenário 3*

Na primeira configuração, para E_f de 35%, na primeira versão (f_{cf} de 3,4 MPa) D resulta em 267 mm e na segunda (f_{cf} de 4,5 MPa) em 256,59 mm, havendo, portanto, uma redução de 10,41 mm (cerca de 1,0 cm). Por sua vez, o *Custo* na primeira versão resultou em R\$ 85,80/m² e na segunda, em R\$ 87,93/m², onerando o projeto em R\$ 2,13/m² de placa. Este ônus aumenta à medida em que E_f cresce. Note-se, porém, que a diminuição de D , em função do aumento de E_f , é mais expressiva na primeira versão; o mesmo ocorre com o *Custo*, já que ele é diretamente proporcional à espessura da placa.

Para elevados valores, a variação de E_f pouco influencia na variação da espessura D na versão 1. Note-se que quando E_f passa de 65% para 75% a espessura sofre uma redução de apenas 2,37 mm (versão 1), apresentando, seu gráfico, neste intervalo uma curva. O mesmo não acontece para valores baixos de E_f (35% para 45%) em cujos testes resultaram-se 5,97 mm de diferença na espessura (versão 1).

O gráfico de D na versão 2 se apresenta ligeiramente curvo em todo seu trajeto. Na versão 1 ele se comporta segundo uma reta no intervalo entre E_f de 35% e 65%; somente entre E_f de 65% e 75% é que há uma curvatura coincidente com o traçado da versão 2, tendendo ambos a uma assíntota ao eixo das abscissas. Infere-se que, a partir de E_f de 65% não adiantaria crescer o f_{cf} da versão 1. O mesmo não ocorre com o *Custo*, que se mantém, aparentemente, linear em todo processo da versão 1, mesmo entre E_f de 65% e 75%, revelando que não há entre espessura e custo necessariamente uma relação de linearidade.

De forma análoga ao cenário 2, em todas as configurações de entrada a versão 1 foi quem apresentou o menor custo por metro quadrado de placa. Isto prova, mais uma vez, que variações em D são pouco expressivas em relação ao custo final da placa, comparadas a variações em f_{cf} .

Na versão 1 todo processo de otimização é governado por F_p (100%), enquanto E_p cresce à medida que E_f aumenta, passando de 72,03% (E_f de 35%) para 100% (E_f de 75%).

Em outras palavras, o aumento de E_f na versão 1 torna o pavimento mais bem dimensionado, eliminando-se folgas de utilização por parte do fenômeno de erosão. Na versão 2 há mudança na regência do processo de otimização, que passa a ser liderada por E_p (100%); porém, neste caso, o processo de otimização não se apresenta mais favorável à medida em que E_f cresce, sendo os melhores resultados aqueles com baixos E_f .

Em uma análise estrutural hipotética, considere-se a versão 1. Com E_f de 55%, o projeto otimizado leva a um custo de R\$ 81,92/m², com espessura otimizada de 25,53 cm e um f_{ck} otimizado de 30,62 MPa, respectivamente. Se E_f passar para 75%, o projeto otimizado leva a um custo de R\$ 78,13 MPa/m², com a espessura otimizada de 24,74 cm e um f_{ck} otimizado de 29,24 MPa, respectivamente. A questão é: compensa gastar na sub-base, para aumentar o *CBR* efetivo¹⁵ de 55 para 75% e obter uma redução do custo da placa de R\$ 81,92/m² para R\$ 78,13/m², uma redução de R\$ 3,79/m²?

Questionamentos como esse devem ser feitos com frequência pelo projetista durante uma análise estrutural. Note-se que a redução no custo correspondeu à diminuição de 0,79 cm da espessura otimizada. Para obter resposta a tal questionamento, o projetista necessita acercar-se dos custos unitários diretos e indiretos relativos à execução de sub-bases correntes em obras de pavimentos rígidos simples. Deve-se ainda estar munido de informações geotécnicas do subleito, dos materiais de empréstimo (jazida) e sua distância média de transporte ao local da obra com o custo associado, entre outras informações.

¹⁵ Existem três maneiras de se aumentar o *CBR* efetivo da sub-base: a primeira é aumentando a sua espessura, a segunda é substituí-la por outro tipo com módulo de reação maior, e a terceira é aumentar o *CBR* do subleito, melhorando a qualidade de suporte do material selecionado, mantendo-se a sub-base inicialmente adotada em projeto. Note-se que cada caso requer uma análise técnica e econômica por parte do projetista, cuja experiência é fundamental às tomadas de decisão.

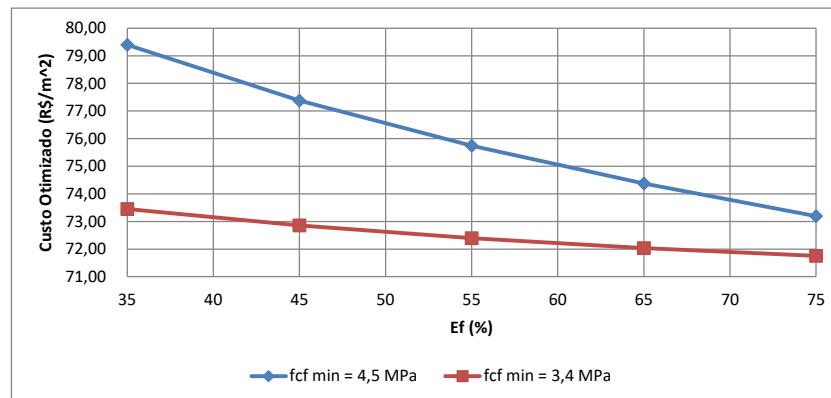
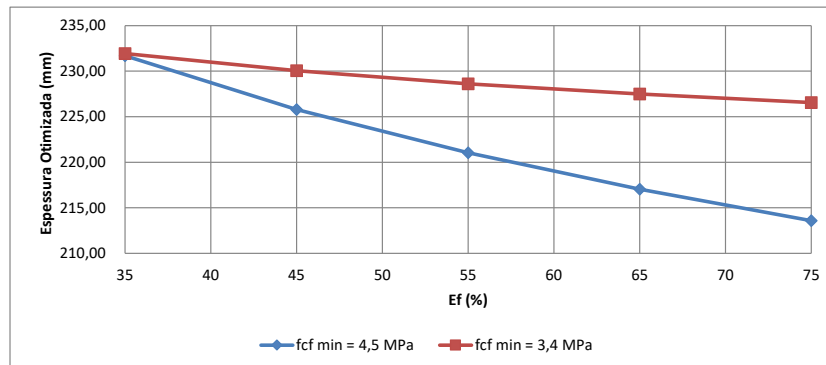
Figura 88 – Primeiro Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado (E_f)

Primeira Versão – Cenário 2

	LSF	AC	BT	fcf	
	1,3	0	0	3,4	
Ef					
	35	45	55	65	75
Custo (R\$/m ²)	73,45	72,85	72,39	72,04	71,76
Do (mm)	231,93	230,05	228,62	227,48	226,56
fcfo (MPa)	4,07	4,07	4,07	4,07	4,07
fcko (MPa)	29,49	29,48	29,48	29,48	29,49
Fp(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Ep(%)	98,98	82,93	70,67	60,95	53,19

Segunda Versão – Cenário 2

	LSF	AC	BT	fcf	
	1,3	0	0	4,5	
Ef					
	35	45	55	65	75
Custo (R\$/m ²)	79,39	77,38	75,75	74,38	73,19
Do (mm)	231,68	225,79	221,04	217,04	213,59
fcfo (MPa)	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
fcko (MPa)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Fp(%)	17,24	27,21	40,31	57,29	79,14
Ep(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

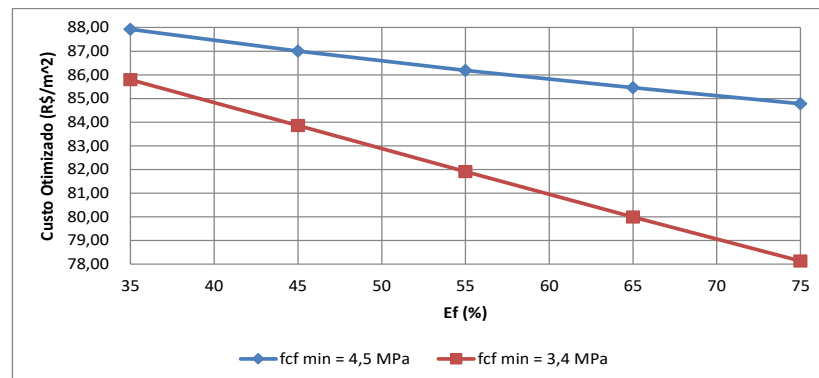
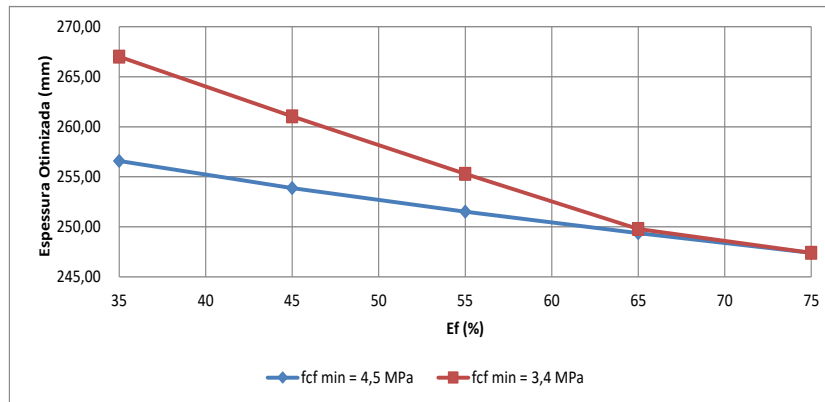
Figura 89 – Primeiro Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado (E_f)

Primeira Versão – Cenário 3

	LSF	AC	BT	fcf	
	1,2	0	0	3,4	
Ef					
	35	45	55	65	75
Custo (R\$/m ²)	85,80	83,86	81,92	79,99	78,13
Do (mm)	267,00	261,03	255,30	249,78	247,41
fcfo (MPa)	4,16	4,16	4,15	4,14	4,06
fcko (MPa)	30,74	30,72	30,62	30,45	29,24
Fp(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Ep(%)	72,03	79,34	88,20	98,61	100,00

Segunda Versão – Cenário 3

	LSF	AC	BT	fcf	
	1,2	0	0	4,5	
Ef					
	35	45	55	65	75
Custo (R\$/m ²)	87,93	87,00	86,19	85,46	84,78
Do (mm)	256,59	253,88	251,51	249,37	247,41
fcfo (MPa)	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
fcko (MPa)	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Fp(%)	63,34	45,45	30,42	19,16	11,32
Ep(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

5.3.1.2 Segundo Teste

No segundo teste verifica-se o comportamento do projeto otimizado em função das combinações das condições de contorno AC (acostamento) e BT (barras de transferência), com os demais parâmetros prescritos fixos (vide Figuras 90 a 92).

Configuração de entrada

São realizadas as seguintes combinações para AC e BT, respectivamente: (0/0); (0/1); (1/0) e (1/1). Opta-se por utilizar no segundo teste f_{cf} de 3,4 MPa, permitindo maior abrangência de processamento.

A pretexto de se averiguar as afirmações constantes do DNIT (2005) (vide Seção 3.1.1.5) acerca dos benefícios que as barras de transferência de cargas e os acostamentos de concreto proporcionam em termos de redução de espessura de placa, esse teste é dotado de uma configuração específica.

No caso das BT a vantagem, (até 5 cm), ocorre comprando-se, entre si, pavimentos rígidos sem acostamento e sem sub-base, para tráfego pesado. E quanto aos efeitos causados pela existência de acostamento (cerca de 4 cm) está na dependência dos demais parâmetros de projeto.

Por esta razão, o valor de 5% para E_f é utilizado nesse teste para simular um pavimento rígido apoiado no subleito. E para se tirar conclusões seguras, utiliza-se para esse fim o valor de 55%, por ser um valor intermediário. Na questão dos acostamentos, opta-se também pelo valor de 55% para E_f , pelas mesmas razões.

Os valores de LSF são, respectivamente 1,3 e 1,2 para os cenários 2 e 3, os mesmos do projeto de origem. Este teste resulta em 4 (quatro) configurações de entrada para cada cenário.

Análise dos resultados

Inicia-se utilizando-se para E_f o valor intermediário de 55%, em ambos os cenários, e em seguida o de 5%.

❖ *Cenário 2*

Configuração de 55% para E_f . Para a configuração de 55% para E_f (vide Figura 90), F_p permanece inalterado e governando o processo de otimização em todo teste (100%). Da primeira configuração, (0/0), para a segunda, (0/1), há uma redução na espessura da placa de cerca de 17 mm (1,7 cm). Isto reflete no E_p , que passa de 100% para 30,94%. Em outras

palavras, E_p sofre uma redução acentuada quando a placa do pavimento passa a ser provida de BT (isto corrobora a previsão do método da PCA de 1984 no que tange ao fenômeno de erosão), passando a operar com folga acentuada.

Comparando-se, agora, a primeira configuração, (0/0), com a terceira, (1/0), percebe-se que há uma redução ainda mais acentuada no valor da espessura de aproximadamente 35 mm (3,5 cm), refletindo, portanto, no custo. E_p sofre um aumento atingindo-se cerca de 70%, sendo essa a melhor configuração em termos de aproveitamento estrutural.

Comparando-se a terceira configuração, (1/0), com a quarta, (1/1), nota-se que não há variação nos parâmetros exceto em E_p , que reduz significativamente de 100% para cerca de 5%, o que leva o pavimento à folga estrutural em termos de E_p . No caso de *Custo* poder-se-ia optar pela terceira ou quarta configurações, já que são iguais.

De fato, a presença das barras de transferência de cargas, neste teste, interferem na redução da espessura da placa, ocorrendo o mesmo fenômeno com o uso de acostamentos de concreto. Mas, é importante frisar que não se pode adotar como regra geral as informações de apenas um ensaio com determinada configuração de entrada. O efeito e sua proporção podem não ser os mesmos para um segundo cenário (projeto). Exemplo disso está presente no teste seguinte (cenário 3) e no presente teste com 5% para E_f . Note-se que, agora, a redução da espessura é mais significante devido a presença das BT à dos acostamentos de concreto.

Configuração de 5% para E_f . Ao ser equipado com BT (primeira configuração) a placa sofre uma redução significativa de cerca de 51 mm (5,1 cm), corroborando, portanto, a supracitada previsão no que tange à BT. Comparando-se a primeira configuração, (0/0), com a terceira, (1/0), percebe-se que há uma redução acentuada no valor da espessura de aproximadamente 48 mm (4,8 cm), (vide Figura 91).

❖ *Cenário 3*

Configuração de 55% para E_f . Para a configuração de 55% para E_f (vide Figura 92), F_p também permanece inalterado e governando o processo de otimização em todo teste (100%). Da primeira configuração, (0/0), para a segunda, (0/1), não há nenhuma mudança de valores dos parâmetros exceto no E_p , que passa de cerca de 88% para aproximadamente 19,5%. E_p sofre uma redução acentuada quando a placa do pavimento passa a ser provida de BT, passando a operar com mais folga.

Comparando-se a primeira configuração, (0/0), com a terceira, (1/0), percebe-se que há uma redução no valor da espessura de aproximadamente 19 mm (1,9 cm), que reflete no custo.

Ep sofre um aumento atingindo-se 100%, sendo essa a melhor configuração em termos de aproveitamento estrutural.

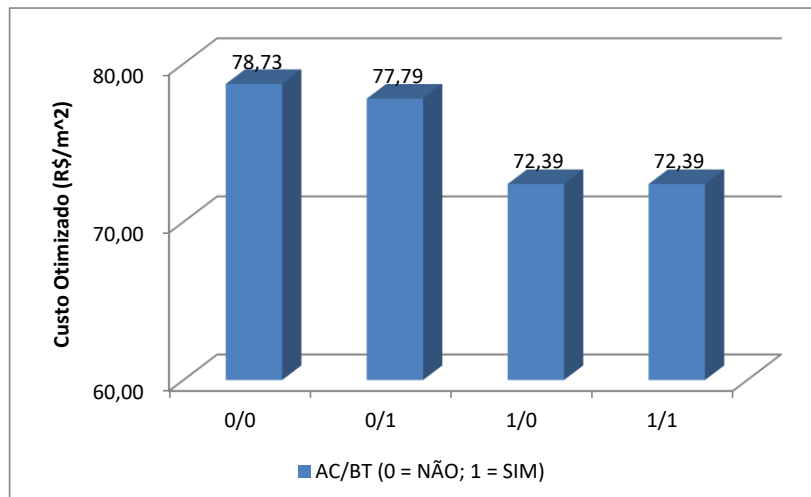
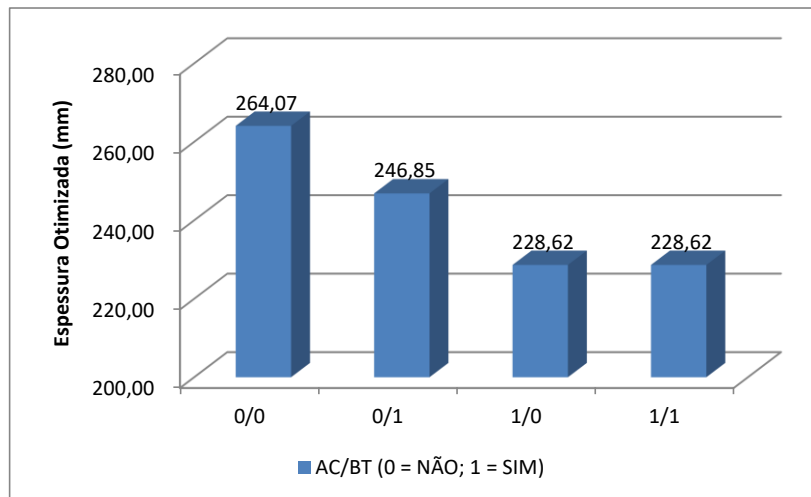
Comparando-se a terceira configuração, (1/0), com a quarta, (1/1), nota-se que não há variação significativa no *Custo*, apesar de a espessura ter reduzido cerca de 14 mm (1,4 cm). Ep reduz significativamente de 100% para cerca de 19%, o que leva o pavimento à folga estrutural. No caso de *Custo* a opção mais vantajosa é a quarta configuração.

Configuração de 55% para E_f . Ao ser equipado com BT¹⁶ (primeira configuração) a placa não sofre redução na espessura. Por outro lado, comparando-se a primeira configuração com a terceira, nota-se uma significativa redução de cerca de 40 mm (4,0 cm), corroborando, portanto, a supracitada previsão concernente a acostamentos de concreto (vide Figura 93).

¹⁶ O projeto de pavimentos rígidos simples, assim como outro de grande responsabilidade, é prescindido de amplo estudo por parte da entidade que o concebe. Dotá-lo de BT ou AC deve ser uma decisão tomada dentro do contexto do projeto. Cada um desses equipamentos traz um benefício específico que deve sempre ser ponderado em termos de custo-benefício. Prover a placa de AC reduz sua espessura, mas pode onerar o custo total do empreendimento. A mesma análise deve ser feita para BT; uma placa equipada com esse dispositivo passa a ter mais folga no CDE, mas o custo dessas barras (incluindo mão-de-obra) deve entrar no cômputo do custo-benefício.

Figura 90 – Segundo Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado - Cenário 2, $E_f = 55\%$ (AC/BT)

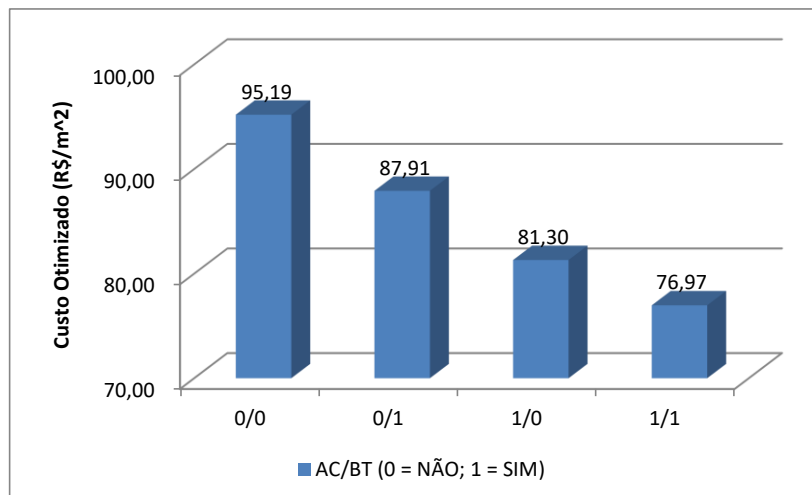
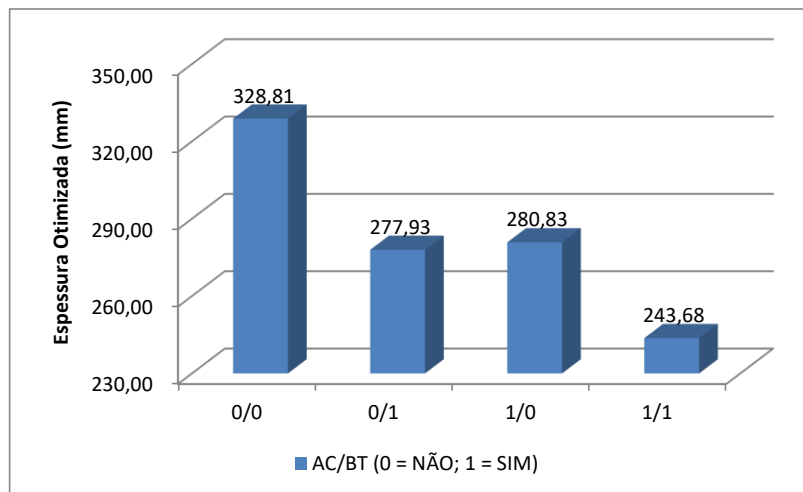
Cenário 2				
	LSF	Ef	fcf	
	1,3	55	3,4	
AC/BT				
	0/0	0/1	1/0	1/1
Custo (R\$/m ²)	78,73	77,79	72,39	72,39
Do (mm)	264,07	246,85	228,62	228,62
fcfo (MPa)	3,65	4,04	4,07	4,07
fcko (MPa)	23,66	29,06	29,48	29,48
Fp(%)	100,00	100,00	100,00	100,00
Ep(%)	100,00	30,94	70,67	4,95



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 91 – Segundo Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 2, $E_f = 5\%$ (AC/BT)

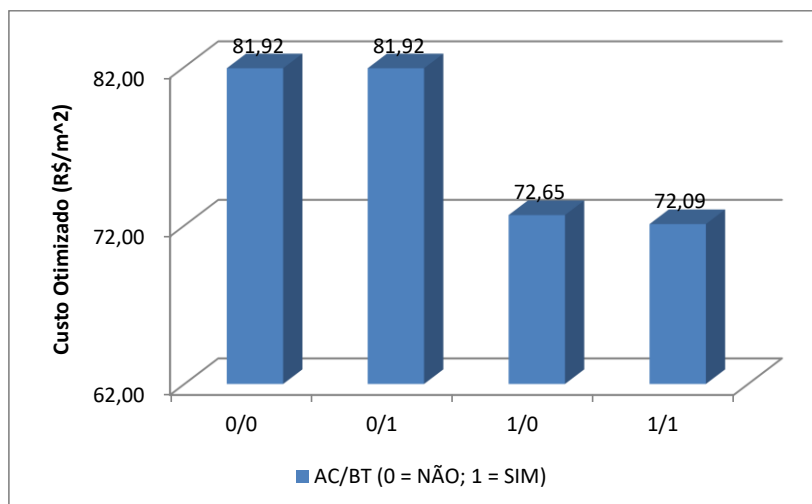
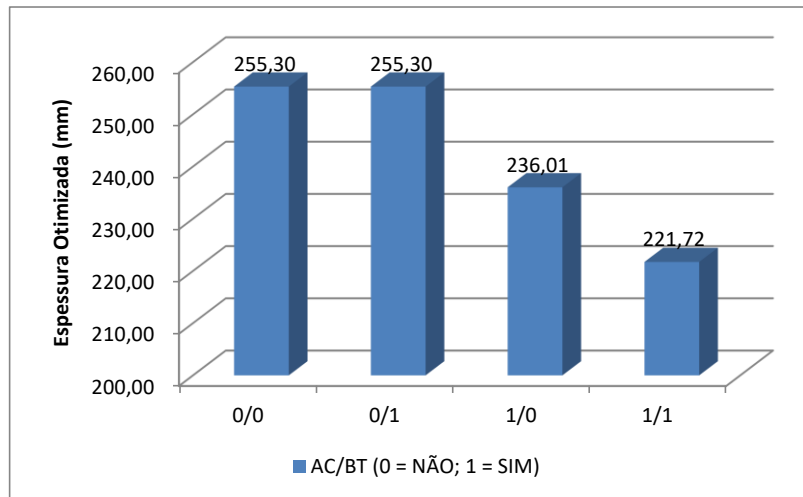
Cenário 2				
	LSF	Ef	fcf	
	1,3	5	3,4	
AC/BT				
	0/0	0/1	1/0	1/1
Custo (R\$/m ²)	95,19	87,91	81,30	76,97
Do (mm)	328,81	277,93	280,83	243,68
fcfo (MPa)	3,35	4,07	3,35	4,06
fcko (MPa)	20,00	29,38	20,00	29,25
Fp(%)	35,18	100,00	67,74	100,00
Ep(%)	100,00	36,30	100,00	24,61



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 92 – Segundo Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 3, $E_f = 55\%$ (AC/BT)

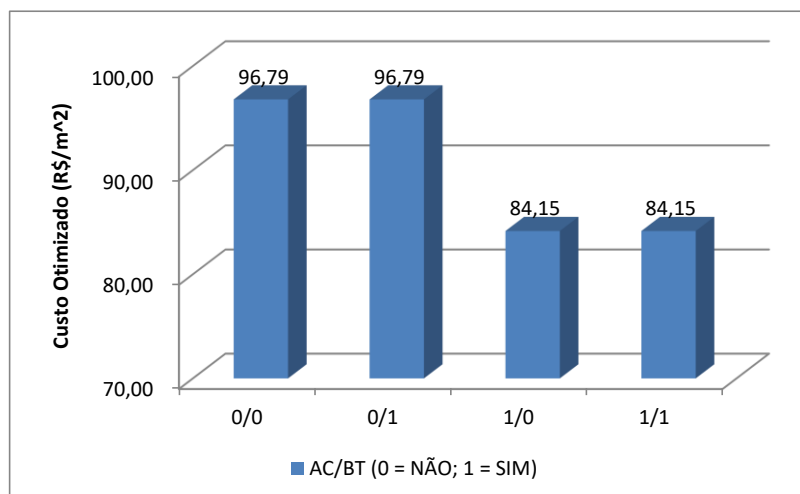
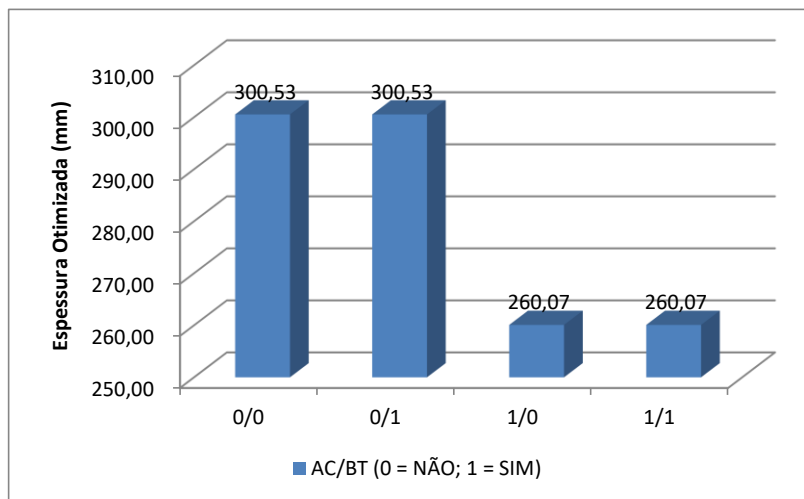
Cenário 3				
	LSF	Ef	fcf	
	1,2	55	3,4	
	AC/BT			
	0/0	0/1	1/0	1/1
Custo (R\$/m ²)	81,92	81,92	72,65	72,09
Do (mm)	255,30	255,30	236,01	221,72
fcfo (MPa)	4,15	4,15	3,89	4,22
fcko (MPa)	30,62	30,62	26,91	31,73
Fp(%)	100,00	100,00	100,00	100,00
Ep(%)	88,20	19,48	100,00	19,30



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 93 – Segundo Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado – Cenário 3, $E_f = 5\%$ (AC/BT)

Cenário 3				
	LSF	Ef	fcf	
	1,2	5	3,4	
AC/BT				
	0/0	0/1	1/0	1/1
Custo (R\$/m ²)	96,79	96,79	84,15	84,15
Do (mm)	300,53	300,53	260,07	260,07
fcfo (MPa)	4,17	4,17	4,20	4,20
fcko (MPa)	30,94	30,94	31,33	31,33
Fp(%)	100,00	100,00	100,00	100,00
Ep(%)	53,43	6,47	97,09	6,16



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

5.3.1.3 Terceiro Teste

No terceiro teste verifica-se o comportamento do projeto otimizado em função da variação progressiva de LSF, com os demais parâmetros prescritos fixos (vide Figuras 94 e 95).

Configuração de entrada

LSF sofre as seguintes variações: 1,0; 1,05; 1,10; 1,15 e 1,20, em ambos os cenários. Assim como no segundo teste, opta-se por utilizar f_{cf} de 3,4 MPa. Este teste resulta em 5 (cinco) configurações de entrada para cada cenário.

Análise dos resultados

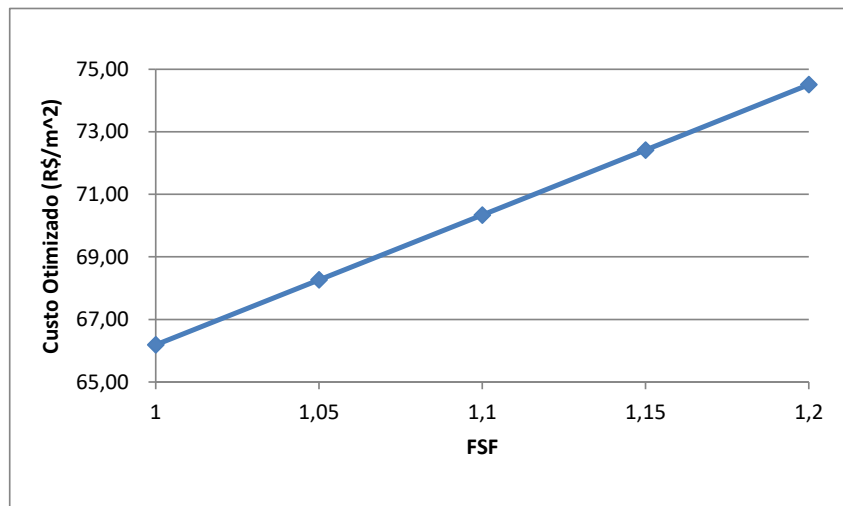
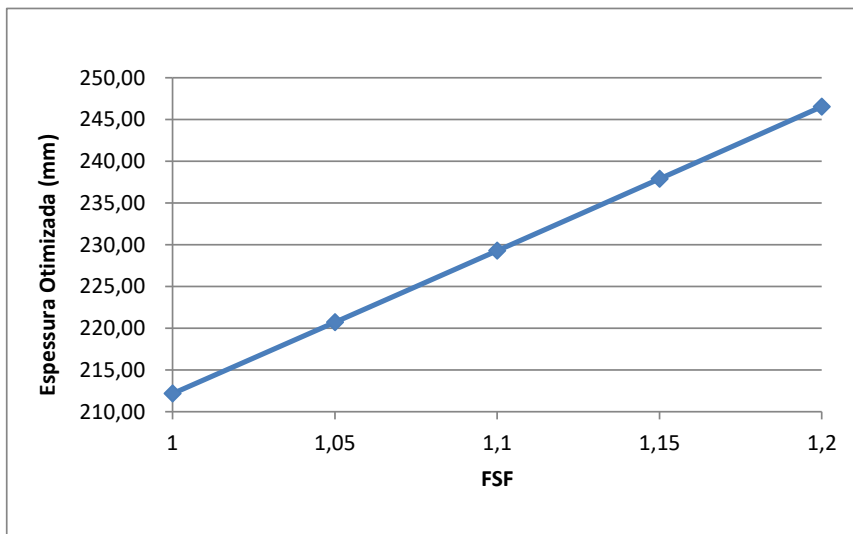
Constata-se, em ambos os cenários, que à proporção em que LSF cresce, a espessura (D) e, obviamente, o *Custo* também crescem. Em outras palavras, D e *Custo* são diretamente proporcionais ao volume de tráfego, já que LSF é um fator multiplicador deste.

A resistência f_{cf} atua no sentido de ajustar o processo de otimização. No cenário 2 ela reduz à medida em que LSF cresce, em busca da resposta otimizada. Já no cenário 3 esse fato não ocorre, pois f_{cf} permanece constante ao longo de todo processo, ou seja, não se faz necessário sua redução.

O fato de o f_{cf} permanecer ou constante ou reduzindo em quanto D cresce, deve-se à sensibilidade das fórmulas fundamentais de Westergaard (4, 5 e 6), quanto aos efeitos provocados pela variação de D (já discutido no segundo exemplo), aliados ao problema de otimização de minimização da função objetivo C_p .

Figura 94 – Terceiro Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado (LSF)

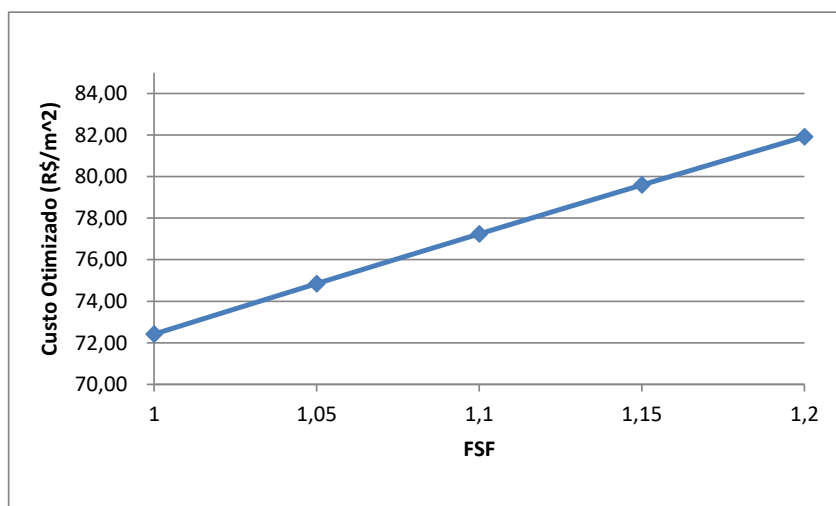
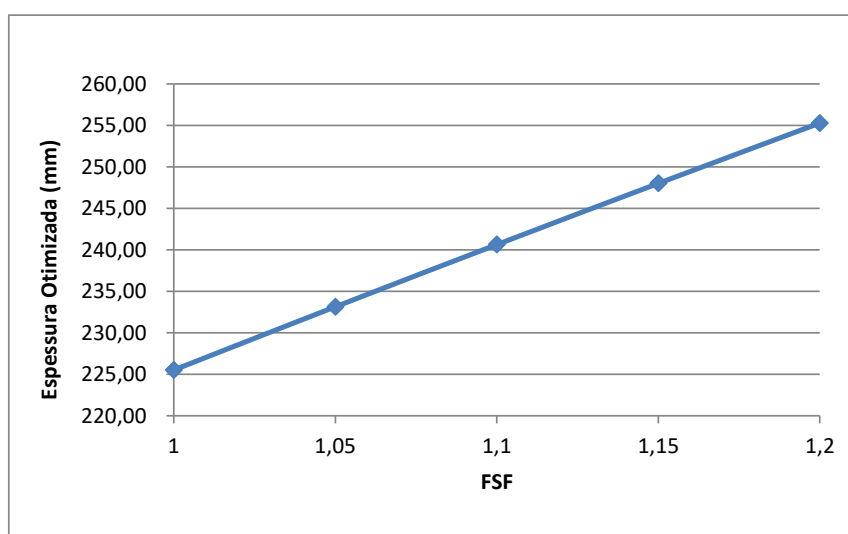
Cenário 2					
	EF	AC	BT	fcf	
	55	0	0	3,4	
LSF					
	1	1,05	1,1	1,15	1,2
Custo (R\$/m ²)	66,19	68,26	70,34	72,42	74,50
Do (mm)	212,18	220,73	229,30	237,90	246,56
fco (MPa)	3,98	3,92	3,87	3,81	3,76
fcko (MPa)	28,14	27,34	26,57	25,82	25,09
Fp(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Ep(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

Figura 95 – Terceiro Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado (LSF)

Cenário 3					
	EF	AC	BT	fcf	
	55	0	0	3,4	
LSF					
	1	1,05	1,1	1,15	1,2
Custo (R\$/m ²)	72,42	74,85	77,24	79,60	81,92
Do (mm)	225,53	233,15	240,65	248,03	255,30
fcfo (MPa)	4,15	4,15	4,15	4,15	4,15
fcko (MPa)	30,68	30,66	30,65	30,63	30,62
Fp(%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Ep(%)	83,77	84,64	85,67	86,86	88,20



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

5.3.1.4 Quarto Teste

No quarto teste verifica-se o comportamento do projeto otimizado em função da variação do E_f de uma sub-base não tratada para o E_f de uma sub-base quimicamente tratada, com os demais parâmetros prescritos fixos (vide Figura 96).

Configuração de entrada

E_f varia de 20% para 60% para os três cenários deste estudo. Assim como nos demais testes, opta-se por utilizar f_{cf} de 3,4 MPa. Este teste resulta em 2 (duas) configurações de entrada para cada cenário.

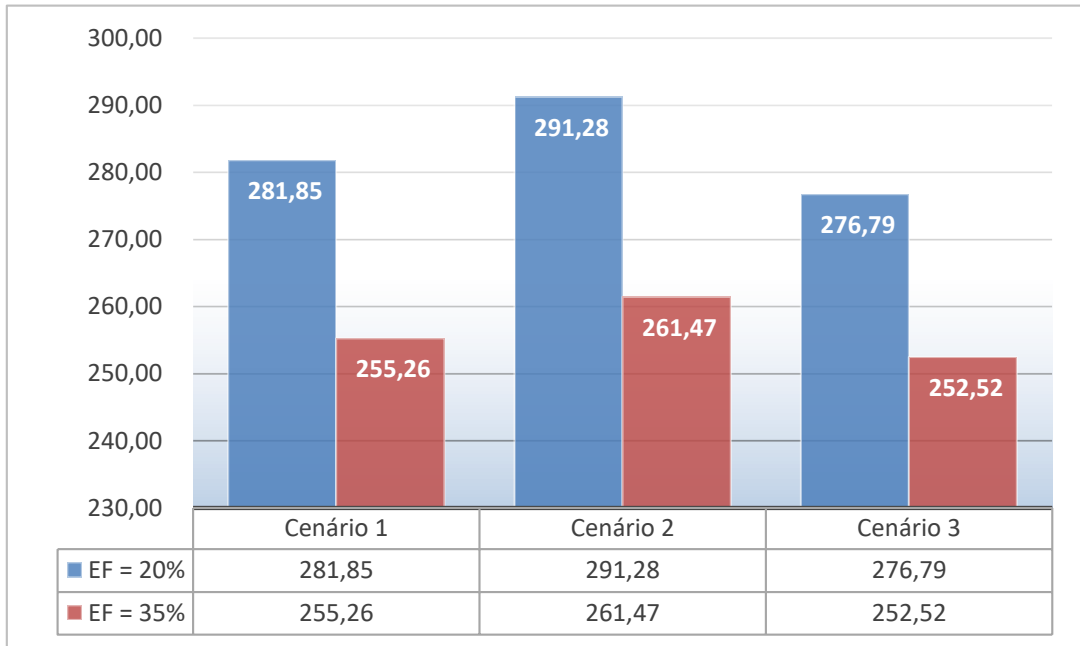
Análise dos resultados

Constata-se que o salto de E_f de 20% para 60% provoca em D uma redução expressiva, em todos os cenários. Isto porque a placa se torna menos flexível quando apoiada em uma sub-base quimicamente tratada, em cotejo com uma sub-base não tratada.

O alto valor do Módulo de reação do sistema da fundação (equivalente), proporcionado pelas camadas quimicamente tratadas como, por exemplo, CCR, diminui o raio de rigidez relativa da placa (ℓ) refletindo-se na redução da tração na flexão da placa e, conseqüentemente, na redução da espessura necessária (vide Equações 4, 5, 6 e 8).

As reduções na espessura para os cenários 1, 2 e 3 são, respectiva e aproximadamente: 27 mm (2,7 cm), 30 mm (3,0 cm) e 24 mm (2,4 cm), corroborando-se, portanto, a afirmação constante do método PCA de 1984 que sustenta a hipótese de uma redução de até 3,0 cm na espessura da placa nas supracitadas circunstâncias.

Figura 96 – Quarto Teste: Análise paramétrica do projeto otimizado (D)



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2017).

6 CONCLUSÕES

Os clássicos métodos de projeto de pavimentos rígidos produzem pavimentos seguros, mas a otimização proposta neste estudo incluiu no dimensionamento um critério de economicidade que conduziu à solução otimizada.

Além dos parâmetros considerados neste estudo, podem ser inseridos em uma análise estrutural elementos como: gerência de pavimento (manutenções preventiva e corretiva), fatores climáticos (esforços internos adicionais), entre outros.

A contribuição apresentada teve seu cerne no diálogo entre dois algoritmos computacionais, Modelo Conceitual e *austroads*, que operam de forma diversa na plataforma MATLAB, mas com a mesma filosofia: otimização estrutural.

O anunciado neste trabalho pôde ser avaliado com base nos três exemplos do Capítulo 5. No primeiro exemplo, verificou-se a acurácia do *austroads* no dimensionamento corrente de pavimentos rígidos simples. O *austroads* foi capaz de reproduzir, com precisão e exatidão, os resultados originais de um projeto da própria AUSTROADS. Vencida esta fase, sua eficácia no que tange à otimização de projeto foi comprovada no segundo exemplo.

Utilizou-se no segundo exemplo, além daquele, mais dois projetos como prova cabal da validade do *austroads* acerca da otimização de projeto de pavimentos rígidos simples. Nele o aumento da espessura da placa, no processo de otimização, corrobora a teoria de Westergaard expressa pelas Equações 4, 5 e 6, cuja sensibilidade é regida pelo inverso do quadrado da espessura da placa, que acelera o efeito redutor da tensão se comparado com o resultado que o aumento de f_{cf} provocaria. Constatou-se que a redução do f_{cf} , no processo de otimização, deve-se ao ajuste que lhe é dado pelo algoritmo *austroads*, para concretizar a otimização com o percentual de 100% para o CRF e/ou CDE. A economicidade obtida na otimização via *austroads* é garantida tanto por F_p quanto por E_p , porque quando ambos não atingem os 100% prescritos alcançam percentuais elevados, permitindo o pavimento operar em sua plenitude, ao longo de sua vida útil. Em outras palavras, não há folga estrutural no projeto efetuado a partir do *austroads*. O ajuste combinado da espessura da placa com a resistência à tração na flexão do concreto (f_{cf}) resulta na solução mais econômica e segura, concomitantemente, corroborando a hipótese deste trabalho.

Finalmente, o terceiro exemplo possibilitou a análise paramétrica do projeto otimizado, em função de determinadas configurações de entrada. Observou-se que a rigidez do sistema de fundação apresenta uma influência inversa na espessura da placa do pavimento. O aumento

isolado da resistência do concreto à tração na flexão não implica na redução do *Custo* final da placa. Os efeitos, no projeto, de idênticas configurações de condições de contorno da placa (barra de transferência de cargas e acostamento de concreto) não são necessariamente os mesmos. Dotar a placa do pavimento rígido simples de barras de transferência de carga não implica, necessariamente, em redução de sua espessura; mas, quando isto ocorre, o efeito é mais significativo àquela assentada no subleito, podendo atingir economia de até 5 cm, corroborando afirmação do método PCA de 1984 (vide Seção 3.1.1.5). Dotar a placa do pavimento rígido simples de acostamentos de concreto implica, necessariamente, em redução de sua espessura, podendo atingir economia de até cerca 4,5 cm, dependendo das condições de projeto, corroborando afirmação do método PCA de 1984 (vide Seção 3.1.1.5). Dentre as possíveis configurações das condições de contorno da placa de pavimentos rígidos simples, a que oferece maior redução em sua espessura é aquela dotada, simultaneamente, de barras de transferência de carga e de acostamentos de concreto. A espessura D e o *Custo* são diretamente proporcionais ao volume de tráfego, já que LSF é um fator multiplicador deste. O fato de a resistência f_{cf} permanecer constante ou reduzir enquanto D cresce, deve-se à sensibilidade das fórmulas fundamentais de Westergaard, quanto aos efeitos provocados pela variação de D , aliados ao problema de otimização de minimização da função objetivo C_p . A resistência f_{cf} atua no sentido de ajustar o processo de otimização. Elevados valores do Módulo de reação do sistema da fundação (equivalente) proporcionado pelas sub-bases quimicamente tratadas, como, por exemplo, o CCR, diminuem o raio de rigidez relativa da placa (ℓ) refletindo-se na redução da tração na flexão da placa e, conseqüentemente, na redução da espessura necessária. Dotar o pavimento rígido de sub-base quimicamente tratada poderá reduzir a espessura da placa em até cerca de 3,0 cm, corroborando, portanto, a afirmação constante do método PCA de 1984 (vide Seção 3.1.1.4).

A opção por focar o objetivo deste estudo no AUSTROADS de 2010 foi motivada não só pela acessibilidade ao conteúdo matemático baseado no PCA de 1984, mas também pela sua organização estrutural.

Há uma diversidade de tópicos a ser explorada no âmbito da análise estrutural de pavimentos rígidos simples. Esse estudo propõe, além do uso de computadores a ábacos e tabelas, a otimização do projeto de pavimentos rígidos. Tal contribuição às engenharias civil e rodoviária tem como ressalva a imprescindível continuidade de pesquisas dedicadas ao tema, fomentando o avanço da ciência de pavimentos de concreto.

A esse respeito, sugere-se ampliar a definição do custo do projeto de pavimentos rígidos a ser otimizado, assumido neste trabalho como o custo do metro quadrado da placa. Novas variáveis de projeto podem ser consideradas, a exemplo da espessura da camada do material selecionado do subleito, da espessura e tipo da sub-base, largura do acostamento de concreto, etc.

Entende-se como indispensável, a realização de estudos estatísticos no âmbito da confiabilidade estrutural, para averiguar e, caso necessário, adequar o fator de segurança de carga (LSF), proposto pelo método PCA de 1984 e adotado pelo DNIT, à realidade brasileira.

Sugere-se, ainda, estudos para a suplementação do ábaco do CBR efetivo (E_f) utilizado pela AUSTROADS de 2010, compatibilizando-o à realidade brasileira de forma a abranger um maior tipo de sub-base e de espessura.

Importa a realização de estudos de viabilidades técnico-econômica, na análise estrutural de otimização da placa de pavimentos rígidos simples, do aumento da resistência característica do concreto à tração na flexão por meio de adição de fibras de aço ao concreto, ou de outros concretos especiais, como uma alternativa ao aumento do consumo de cimento Portland, para tal finalidade.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). **Fundamento da Mecânica dos Pavimentos e da Ciência dos Pavimentos Rígidos**. Projeto e Dimensionamento dos Pavimentos – Módulo 2. Disponível em: <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/Pavim_Concreto_Apres_Mod02ABCP.pdf>. Acesso em: 30 maio 2017.

ABRAHÃO, R. R. R.; BITTENCOURT, C.; TSURUTA, K.M.; RADE, R.S.L. Fadiga de Materiais – Uma Revisão Bibliográfica. **VIII Encontro Interno - XII Seminário de Iniciação Científica**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica (UFU), Uberlândia, MG, 2008.

AUSTROADS. **Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design**, 2010.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1ª Edição, 2003. Disponível em: <http://www.alvaroazevedo.com/publications/books/Livro_MEF_AA_1ed>. Acesso em: 30 maio 2017.

BALBO, J. T. **Análise Crítica dos Métodos para Dimensionamento Estrutural de Pavimentos de Concreto Simples**. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 2002.

_____. **Pavimentos de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. **Fadiga de Estruturas Soldadas**. 2ª Edição. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias**, 2016.

Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN). **Resolução nº 210 de 2006**. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.deinfra.sc.gov.br/download/aet/leis/resolucao-210.pdf>>. Acesso: 30 mai. 2017.

CAHPI. **Avaliação Deflectométrica**. Disponível em: <<http://www.cahpiconsultoria.com.br/index.php/portfolio/avaliacao-deflectometrica/>>. Acesso em: 30 maio 2017.

CARVALHO, M. D. Pavimentação com Sustentabilidade. Premissas de Projeto do Pavimento de Concreto. **VIAS CONCRETAS**. Disponível em: <<http://www.feb.unesp.br/Home/Departamentos343/EngenhariaCivil/gustavogarciamanzato/premissas-de-projeto---feb.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2017.

DIRECT INDUSTRY. **Máquina de ensaio de fadiga / de concreto / de 4 colunas / dinâmica**. Disponível em: <<http://www.directindustry.com/pt/prod/instron/product-18463-1662903.html>>. Acessado em 2017.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Manual de Pavimentos Rígidos**, Publicação IPR – 714, 2005.

Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP). **Apostila de Dimensionamento de Pavimento Rígido**: Aula 7. 2016. Disponível em: <<http://www.fatecsp.br>>. Acesso em: 30 mai. 2017.

FERREIRA, A.; ANTUNES, A.; PICADO-SANTOS, L. Probabilistic Segment-Linked Pavement Management Optimization Model. **ASCE Journal of Transportation Engineering**, v. 128, p. 568–577, 2002.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. LTC, 2009.

FOGG, J. A.; BAUS, R. L.; RAY, R. P. AASHTO. Rigid Pavement Design Equation Study. **ASCE Journal of Transportation Engineering**, v. 117, p. 124-131, 1991.

GONDIM, Y. C. **Dimensionamento de pavimentos de concreto utilizando o programa computacional KENSLABS 2004 e comparação com o método da PCA 1984**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFCG/CTRN, Campina Grande, 2009.

GOLABI, K.; KULKARNI, B. R.; WAY, G. B. A Statewide Pavement Management System. **Interfaces**, v. 12, p. 5-21, 1982.

HADI, M. N. S.; ARFIADI, Y. Optimum Rigid Pavement Design by Genetic Algorithms. **Computers and Structures**, v. 79, p. 1617-1624, 2001.

JALBAS, T. L. **Olho Técnico na Dosagem Experimental do Concreto**: Notas de Aula de Materiais, Tecnologia, Processos Gerais de Construção e Mecânica dos Solos e Experiência Profissional como engenheiro civil. Universidade Federal de Alagoas. Publicação independente e limitada, Maceió/AL, 2016.

KANG, H.; ZHANG, G. Special Function Analysis Method of Dynamic Response of Rigid Pavement Under Vehicle Load. **ASCE Proceedings**, p. 4026–4031, 2007.

KOHLER, E.; KANNEKANTI, V.; HARVEY, J. California Efforts Towards Mechanistic-Empirical Pavement Design. **ASCE Proceedings**, p. 74–85, 2006.

LARRALDE, J.; CHEN, W. Estimation of Mechanical Deterioration of Highway Rigid Pavements. **ASCE Journal of Transportation Engineering**, v. 113, p. 193-208, 1987.

LIMA JÚNIOR, E.T. **Introdução à Confiabilidade Estrutural** (Notas de Aula). Universidade Federal de Alagoas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Alagoas, Brasil, 2016.

LIRA, W. W. M. **Métodos dos Elementos Finitos** (Notas de aula). Universidade Federal de Alagoas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Alagoas, Brasil, 2016.

MACK, J.; ZOLLINGER, C. Developing Optimized Concrete Pavement Designs Using the DARWin-ME/Mechanistic Empirical Pavement Design Guide and Cost Analysis. **ASCE Proceeding**, p. 225–242, 2013.

MAIA, J. P. R. **Otimização Estrutural**: Estudo e Aplicações em Problemas Clássicos de Vigas Utilizando a Ferramenta *Solver*. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

MARQUES, S. P. C. **Placas e Cascas** (Notas de Aula). Universidade Federal de Alagoas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Alagoas, Brasil, 2014.

MASCHIO, A. **A Evolução do Pavimento de Concreto no Brasil**. Vias Concretas – Pavimentação com Sustentabilidade – 16º Encontro Técnico – DER/PR, 2012.

MBWANA, J.; TURNQUIST, M. Optimization modeling for enhanced network-level pavement management system. **Transportation Research Record** **1524**, D.C., 76–85, 1996.

ODUM-EWUAKYE, B.; ATTOH-OKINE, N. Sealing System Selection for Jointed Concrete Pavements – A review. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 591–602, 2006.

PACKARD, R. G.; TAYABJI, S. D. New PCA design procedure for concrete highway and street pavements. Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue University; 1985, p. 225-236.

RAPOSO, S.; OLIVEIRA, S.; CONCEIÇÃO, M.A.; LOPES, M.G. Desenvolvimento de um Modelo de Elementos Finitos 3D para Análise de Pavimentos Rodoviários Rígidos. In: **ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL**, 24-26 de outubro de 2012, Portugal.

RUFINO, D. M. S. **Estudo dos Procedimentos de Dimensionamento e dos Novos Programas de Análise de Tensões em Pavimentos de Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

SANTOS, J.; FERREIRA, A. Pavement Design Optimization Considering Costs and Preventive Interventions. **ASCE Journal of Transportation Engineering**, v. 138, p. 911-923, 2012.

SOLOCAP Geotecnologia-Rodoviária Ltda. **Cbr_ISC.01**. Disponível em: <http://solocap.com.br/Cbr_ISC.01.jpg>. Acesso em: 30 maio 2017.

SÜSSEKIND, J.C. **Curso de Concreto**: Concreto Armado. v. 1, p. 45, Ed. Globo, Rio de Janeiro, 1979.

TEODOZIO, T. N. **Um estudo paramétrico sobre tensões, deformações e resistência à fadiga de pavimentos asfálticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2012.

TIMM, D. Design Comparisons Using the New Mechanistic-Empirical Rigid Pavement Design Guide. In: Airfield and Highway Pavement, 2006, Atlanta. **Proceedings...** Georgia, 2006, p. 236-247.

VANDERPLAATS, G. N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: with Applications**. McGraw-Hill, 1984.

VARGAS, D. E. C.; LEMONGE, A. C. C.; BARBOSA, H. J. C.; BERNARDINO, H. S. Um Algoritmo Baseado em Evolução Diferencial para Problemas de Otimização Estrutural Multiobjetivo com Restrições. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**. v. 32, n. 2, p. 91-99, 2016.

ZOKAEI-ASHTIANI, A.; CARRASCO, C.; NAZARIAN, S. Finite Element Modeling of Slab–foundation Interaction on Rigid Pavement Applications. **Computers and Geotechnics**, v. 62, p. 118-127, 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Modelo Conceitual – custo do f_{ck}

Cotação do metro cúbico de concreto usinado em função do f_{ck} (baseado em informações fornecidas por Concreto REDIMIX do Brasil S/A, 2016)

f_{ck} (MPa) do concreto usinado	Valor (R\$)
20	290,00
25	300,00
30	320,00
35	340,00
40	360,00
45	380,00
50	410,00
55	430,00
60	450,00

APÊNDICE B – Modelo Conceitual - *rpavrig.m*

Função *rpavrig.m* que realiza tarefa de restrições de limites das variáveis de projeto do problema de otimização (a-b)

a)

```

1  function [c,ceq]=rpavrig(h,fck,cp,crb,B,b,sv,ndh1,ndh2,ndv)
2  % -----
3  % RPAVRIG.M
4  % -----
5  % Função das restrições do problema de otimização da seção de pavimento
6  % rígido via elementos finitos em estado plano de deformações.
7  % -----
8  % Parâmetros:
9  %   h   (E) - Altura da camada superior.
10 %   fck (E) - fck da camada superior.
11 %   cp  (E) - Coeficiente de Poisson da camada superior.
12 %   crb (E) - Coeficiente de recalque da base.
13 %   B   (E) - Largura total da seção.
14 %   b   (E) - Largura de aplicação do carregamento distribuído.
15 %   sv  (E) - Tensão aplicada no pavimento.
16 %   ndh1 (E) - Número de divisões horizontais 1.
17 %   ndh2 (E) - Número de divisões horizontais 2.
18 %   ndv  (E) - Número de divisões verticais.
19 %   c   (S) - Vetor das inequações não lineares de restrição.
20 %   ceq (S) - Vetor das equações não lineares de restrição.
21 % -----
22 % Universidade Federal de Alagoas - UFAL
23 % Centro de Tecnologia - CTEC
24 % Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC
25 % Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV
26 % -----
27 % Por: Eduardo de Souza Lira (edusouzalira@yahoo.com.br)
28 %      Eduardo Nobre Lages (enl@lccv.ufal.br)
29 %      João Carlos Cordeiro Barbirato (jccb@lccv.ufal.br)
30 % -----
31 % Versão: 25/04/2017
32 % -----
33
34 % Calcula o módulo de Young da camada em função do fck corrente
35 Ec=0.9*21000*sqrt(fck+35);
36
37 % Analisa o modelo corrente
38 mef=pavrig(h,Ec,cp,crb,B,b,sv,ndh1,ndh2,ndv);
39
40 % Define as tensões limites da camada em função do fck corrente
41 lims=[-fck fck/10];
42

```

b)

```

43 % Varredura nos pontos de integração dos elementos da camada
44 % superior para determinação das tensões extremas em serviço
45 - idelem=0;
46
47 - s1max=0;
48 - s3min=0;
49
50 - for i=1:ndv
51 -     for j=1:ndh1+ndh2
52 -         idelem=idelem+1;
53 -         tcurr=get(mef, 'tensoeselem', idelem);
54
55 -         for k=1:size(tcurr,1)
56 -             tp=eigs([tcurr(k,1) tcurr(k,3) 0; ...
57 -                    tcurr(k,3) tcurr(k,2) 0; ...
58 -                    0          0          tcurr(k,4)]);
59
60 -             if max(tp)>s1max
61 -                 s1max=max(tp);
62 -             end
63
64 -             if min(tp)<s3min
65 -                 s3min=min(tp);
66 -             end
67 -         end
68 -     end
69 - end
70
71 % Restrições não lineares
72 - c=[s3min/lims(1)-1 s1max/lims(2)-1];
73
74 % Restrições lineares (inexistentes)
75 - ceq=[];
76
77 - disp(['h = ' num2str(h) ' fck = ' num2str(fck)]);
78 - disp(['Sigma Principal/Limite - 1 (Compressão e Tração) = ' mat2str(c)]);
79
80 - cunt=3.02207792208E+002-3.80543530542E-001*fck+1.85425685425E-003* ...
81 -     fck^2-1.34680134680E-006*fck^3;
82 - disp(['fobj (Custo) = ' num2str(h/1000*cunt)]);
83
84 - disp(' ');

```

APÊNDICE C - Modelo Conceitual - *opavrig.m*

Função *opavrig.m* que realiza a tarefa de otimização da seção de pavimento rígido

```

7      % -----
8      % Parâmetros:
9      %   cp   (E) - Coeficiente de Poisson da camada.
10     %   crb  (E) - Coeficiente de recalque da base.
11     %   B    (E) - Largura total da seção.
12     %   b    (E) - Largura de aplicação do carregamento distribuído.
13     %   sv   (E) - Tensão aplicada no pavimento.
14     %   ndh1 (E) - Número de divisões horizontais 1.
15     %   ndh2 (E) - Número de divisões horizontais 2.
16     %   ndv  (E) - Número de divisões verticais.
17     %   ho   (S) - Altura otimizada.
18     %   fcko (S) - Fck otimizado.
19     %   Eo   (S) - Módulo de Young otimizado.
20     % -----
21     % Universidade Federal de Alagoas - UFAL
22     % Centro de Tecnologia - CTEC
23     % Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC
24     % Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV
25     % -----
26     % Por: Eduardo de Souza Lira (edusouzalira@yahoo.com.br)
27     %      Eduardo Nobre Lages (enl@lccv.ufal.br)
28     %      João Carlos Cordeiro Barbirato (jccb@lccv.ufal.br)
29     % -----
30     % Versão: 01/08/2017
31     % -----
32
33     % Define a função do custo do m^3 do concreto em função do fck
34     cunt=@(fck)3.02207792208E+002-3.80543530542E-001*fck+1.85425685425E-003* ...
35         fck^2-1.34680134680E-006*fck^3;
36
37     % Redefine algoritmo e executa função de otimização
38     options=optimset('Algorithm','sqp');
39     options=optimset('Algorithm','active-set');
40     options=optimset('Algorithm','interior-point');
41
42     vp=fmincon(@(vp)vp(1)/1000*cunt(vp(2)),[300 350],[],[],[],[],[0 0],[Inf 600], ...
43         @(vp)rpavrig(vp(1),vp(2),cp,crb,B,b,sv,ndh1,ndh2,ndv),options);
44
45     % Variáveis otimizadas de projeto
46     ho=vp(1);
47     fcko=vp(2);
48     Eo=0.9*21000*sqrt(fcko+35);

```

APÊNDICE D – *raustroads.m*

Função *raustroads* que verifica os critérios de fadiga e erosão (a-h)

a)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
1 function [c,ceq]=raustroads(D,fck,Ef,LSF,AC,BT,P,nrp)
2
3 % -----
4 % RAUSTROADS.M
5 % -----
6 % Função de cálculo dos indicadores percentuais associados ao critérios de
7 % fadiga e erosão para pavimentos rígidos segundo a AUSTROADS.
8 % -----
9 % Parâmetros:
10 % D (E) - Espessura da base do pavimento rígido (mm).
11 % fck (E) - Resistência característica do concreto à compressão aos 28
12 % dias (MPa).
13 % Ef (E) - CBR efetivo do sub-leito (%).
14 % LSF (E) - Fator de segurança de carga.
15 % AC (E) - Flag se há (1) ou não (0) acostamento de concreto.
16 % BT (E) - Flag se há (1) ou não (0) junta com barra de transferência.
17 % P (E) - Matriz de cargas por eixo, em kN, referentes às categorias
18 % SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT.
19 % nrp (E) - Matriz de número de repetições previstas de carga, já
20 % considerando a vida útil do projeto, referentes às
21 % categorias SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT.
22 % c (S) - Indicadores associados às restrições de desigualdades em
23 % relação aos critérios de fadiga e de erosão da AUSTROADS.
24 % ceq (S) - Não utilizado.
25 % -----
26 % Universidade Federal de Alagoas - UFAL
27 % Centro de Tecnologia - CTEC
28 % Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC
29 % Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV
30 % -----
31 % Por: Eduardo de Souza Lira (edusouzalira@yahoo.com.br)
32 % Eduardo Nobre Lages (enl@lccv.ufal.br)
33 % João Carlos Cordeiro Barbirato (jccb@lccv.ufal.br)
34 % -----
35 % Versão: 27/01/2017
36 % -----

```

b)

```
raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
36
37 % Resistência característica à tração na flexão do concreto (MPa), de
38 % acordo com a Eq. (6.9) - Section 6.6.3 - GUIDE TO PAVEMENT TECHNOLOGY -
39 % PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010)
40 - fcf=0.75*sqrt(fck);
41
42 % Fator F1 de ajustamento de carga por grupo de eixo (SAST, SADT, TAST,
43 % TADT, TRDT e QADT)
44 - F1=[9 18 18 36 54 72];
45
46 % Definição do fator F2 de ajustamento para efeitos de borda
47 % da laje a depender da existência ou não de acostamento
48 - if AC==1
49 -     F2=0.94;
50 - else
51 -     F2=0.06;
52 - end
53
```

c)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
52 - end
53
54 % Coeficientes a-j para cálculo do fator de erosão F3 para
55 % cada tipo de eixo (SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT)
56 - if BT==0
57     % Sem barra de transferência
58 -     if AC==0
59         % Sem acostamento
60 -         ajF3=[0.745  1.330  1.907  1.907  2.034  2.034; ...
61             533.8  537.5  448.3  448.3  440.3  440.3; ...
62             -0.2071 -0.1929 -0.1749 -0.1749 -0.2776 -0.2776; ...
63             -42419 -43035 -35827 -35827 -36194 -36194; ...
64             0.0405 0.0365 0.0382 0.0382 0.0673 0.0673; ...
65             27.27 26.44 0.64 0.64 15.77 15.77; ...
66             1547570 1586100 1291870 1291870 1315330 1315330; ...
67             -0.0044 -0.0039 -0.0060 -0.0060 -0.0084 -0.0084; ...
68             -1.4656 -1.4547 1.0741 1.0741 -1.2068 -1.2068; ...
69             -1384 -1344 50 50 -625 -625];
70 -     else
71         % Com acostamento
72 -         ajF3=[0.345  0.914  1.564  1.564  2.104  2.104; ...
73             534.6  539.8  404.1  404.1  245.4  245.4; ...
74             -0.1711 -0.1416 -0.1226 -0.1226 -0.2473 -0.2473; ...
75             -44908 -44900 -32024 -32024 -15007 -15007; ...
76             0.0347 0.0275 0.0256 0.0256 0.0469 0.0469; ...
77             20.49 16.37 -9.79 -9.79 8.86 8.86; ...
78             1676710 1654590 1150280 1150280 518916 518916; ...
79             -0.0038 -0.0032 -0.0052 -0.0052 -0.0075 -0.0075; ...
80             -1.3829 -0.9584 2.1997 2.1997 1.5517 1.5517; ...
81             -913 -765 469 469 -599 -599];
82 -     end

```


d)

```

raustroads.m x oaustrroads.m x ex1austrroads.m x ex2austrroads.m x ex3austrroads.m x +
82 -         end
83 -     else
84 -         % Com barra de transferência
85 -         if AC==0
86 -             % Sem acostamento
87 -             ajF3=[0.072  0.643  1.410  1.410  2.089  2.089; ...
88 -                 679.9  684.5  498.9  498.9  351.3  351.3; ...
89 -                 -0.0789 -0.0576 -0.1680 -0.1680 -0.3343 -0.3343; ...
90 -                 -58342 -58371 -39430 -39430 -25576 -25576; ...
91 -                 0.0179 0.0128 0.0322 0.0322 0.0723 0.0723; ...
92 -                 6.70  4.61  13.80  13.80  29.58  29.58; ...
93 -                 2139330 2131390 1437580 1437580 923081 923081; ...
94 -                 -0.0021 -0.0017 -0.0044 -0.0044 -0.0086 -0.0086; ...
95 -                 -0.5199 -0.2056 -0.0380 -0.0380 -1.6301 -1.6301; ...
96 -                 -187  -185  -697  -697  -1327  -1327];
97 -         else
98 -             % Com acostamento
99 -             ajF3=[-0.184  0.440  0.952  0.952  1.650  1.650; ...
100 -                 602.3  609.8  544.9  544.9  359.4  359.4; ...
101 -                 -0.0085 -0.0484 -0.0404 -0.0404 -0.1765 -0.1765; ...
102 -                 -50996 -52519 -47500 -47500 -28901 -28901; ...
103 -                 -0.0122 0.0017 0.0179 0.0179 0.0435 0.0435; ...
104 -                 8.99  9.62  -31.54  -31.54  -15.97  -15.97; ...
105 -                 1874370 1949350 1719950 1719950 1085800 1085800; ...
106 -                 0.0008 -0.0007 -0.0051 -0.0051 -0.0084 -0.0084; ...
107 -                 -0.4759 -0.6314 3.3789 3.3789 3.2908 3.2908; ...
108 -                 -374  -326  1675  1675  758  758];
109 -         end
110 -     end

```

e)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
110 - end
111
112 % Fator F4 de ajustamento de carga por grupo de
113 % eixo (SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT)
114 - F4=[9 18 18 36 54 54];
115
116 % Coeficientes a-j para cálculo da tensão equivalente Se para
117 % cada tipo de eixo (SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT)
118 - if AC==0
119     % Sem acostamento
120 -     ajSe=[0.118  0.560  0.118  0.219  0.089  0.089; ...
121             125.4  184.4  125.4  399.6  336.4  336.4; ...
122             -0.2396 -0.6663 -0.2396 -0.3742 -0.1340 -0.1340; ...
123             26969  44405  26969  -38  -10007  -10007; ...
124             0.0896  0.2254  0.0896  0.1680  0.0830  0.0830; ...
125             0.19  19.75  0.19  -71.09  -83.14  -83.14; ...
126             -352174 -942585 -352174 681381 1215750 1215750; ...
127             -0.0104 -0.0248 -0.0104 -0.0218 -0.0120 -0.0120; ...
128             -1.2536 -4.6657 -1.2536 3.6501 5.2724 5.2724; ...
129             -1709  -4082  -1709  2003  4400  4400];
130 - else
131     % Com acostamento
132 -     ajSe=[-0.051  0.330  -0.051  0.088  -0.145  -0.145; ...
133             26.0  206.5  26.0  301.5  258.6  258.6; ...
134             0.0899  -0.4684  0.0899  -0.1846  0.0080  0.0080; ...
135             35774  28661  35774  4418  1408  1408; ...
136             -0.0376  0.1650  -0.0376  0.0939  0.0312  0.0312; ...
137             14.57  2.82  14.57  -59.93  -61.25  -61.25; ...
138             -861548 -686510 -861548 280297 488079 488079; ...
139             0.0031  -0.0186  0.0031  -0.0128  -0.0058  -0.0058; ...
140             1.3098  -1.9606  1.3098  4.1791  4.7428  4.7428; ...
141             -4009  -2717  -4009  1768  2564  2564];
142 - end
143

```

f)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
144 % Cálculo do fator de erosão F3 e da tensão equivalente Se para cada tipo
145 % de eixo (SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT)
146 - F3=zeros(1,6);
147 - Se=zeros(1,6);
148
149 - for i=1:6
150 -     F3(i)=ajF3(1,i) + ajF3(2,i)/D + ajF3(3,i)*log(Ef) + ajF3(4,i)/D^2 + ...
151 -         ajF3(5,i)*log(Ef)^2 + ajF3(6,i)*log(Ef)/D + ajF3(7,i)/D^3 + ...
152 -         ajF3(8,i)*log(Ef)^3 + ajF3(9,i)*log(Ef)^2/D + ajF3(10,i)* ...
153 -         log(Ef)/D^2;
154
155 -     Se(i)=ajSe(1,i) + ajSe(2,i)/D + ajSe(3,i)*log(Ef) + ajSe(4,i)/D^2 + ...
156 -         ajSe(5,i)*log(Ef)^2 + ajSe(6,i)*log(Ef)/D + ajSe(7,i)/D^3 + ...
157 -         ajSe(8,i)*log(Ef)^3 + ajSe(9,i)*log(Ef)^2/D + ajSe(10,i)* ...
158 -         log(Ef)/D^2;
159 - end

```

g)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
160
161 % Avaliação do consumo de fadiga
162 - Fp=0;
163
164 - for i=1:6
165 -     for j=1:size(P,1)
166 -         if P(j,i)~=0
167 -             Sr=Se(i)/0.944/fcf*(P(j,i)*LSF/4.45/F1(i))^0.94;
168
169 -             if Sr>0.55
170 -                 Nf=exp((0.9719-Sr)/0.0828*log(10));
171 -             elseif 0.45<=Sr && Sr<=0.55
172 -                 Nf=(4.258/(Sr-0.4325))^3.268;
173 -             else
174 -                 Nf=-1;
175 -             end
176
177 -             if Nf~-=-1
178 -                 Fp=Fp+nrp(j,i)/Nf*100;
179 -             end
180 -         end
181 -     end
182 - end
183

```

h)

```
raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
184 % Avaliação do dano por erosão
185 Ep=0;
186
187 for i=1:6
188     for j=1:size(P,1)
189         if P(j,i)~=0
190             Ne=exp((14.524-6.777*max([0 (P(j,i)*LSF/4.45/F4(i))^2*10^ ...
191                 F3(i)/41.35-9])^0.103)*log(10))/F2;
192             Ep=Ep+nrp(j,i)/Ne*100;
193         end
194     end
195 end
196
197 % Cálculo dos indicadores associados às restrições de desigualdades
198 % em relação aos critérios de fadiga e de erosão da AUSTROADS
199 c=[Fp-100 Ep-100];
200
201 % Não há restrição de igualdade a ser calculada
202 ceq=[];
```

APÊNDICE E – *oaustroads.m*

Função *oaustroads* que desfere o processo de otimização (a-b)

a)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
1 function [Do, fcko, fcfo, custo, Fp, Ep]=oaustroads(Ef, LSF, AC, BT, P, nrp)
2 % -----
3 % OAUSTROADS.M
4 % -----
5 % Função de otimização do pavimento rígido via AUSTROADS.
6 % -----
7 % Parâmetros:
8 % Ef (E) - CBR efetivo do sub-leito (%).
9 % LSF (E) - Fator de segurança de carga.
10 % AC (E) - Flag se há (1) ou não (0) acostamento de concreto.
11 % BT (E) - Flag se há (1) ou não (0) junta com barra de transferência.
12 % P (E) - Matriz de cargas por eixo, em kN, referentes às categorias
13 % SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT.
14 % nrp (E) - Matriz de número de repetições previstas de carga, já
15 % considerando a vida útil do projeto, referentes às
16 % categorias SAST, SADT, TAST, TADT, TRDT e QADT.
17 % Do (S) - Altura otimizada (mm).
18 % fcko (S) - Fck otimizado (MPa).
19 % fcfo (S) - Resistência característica otimizada do concreto à tração
20 % em flexão (MPa).
21 % custo (S) - Custo otimizado (R$/m^2).
22 % Fp (S) - Fadiga total percentual do projeto otimizado.
23 % Ep (S) - Erosão total percentual do projeto otimizado.
24 % -----
25 % Universidade Federal de Alagoas - UFAL
26 % Centro de Tecnologia - CTEC
27 % Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC
28 % Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV
29 % -----

```

b)

```

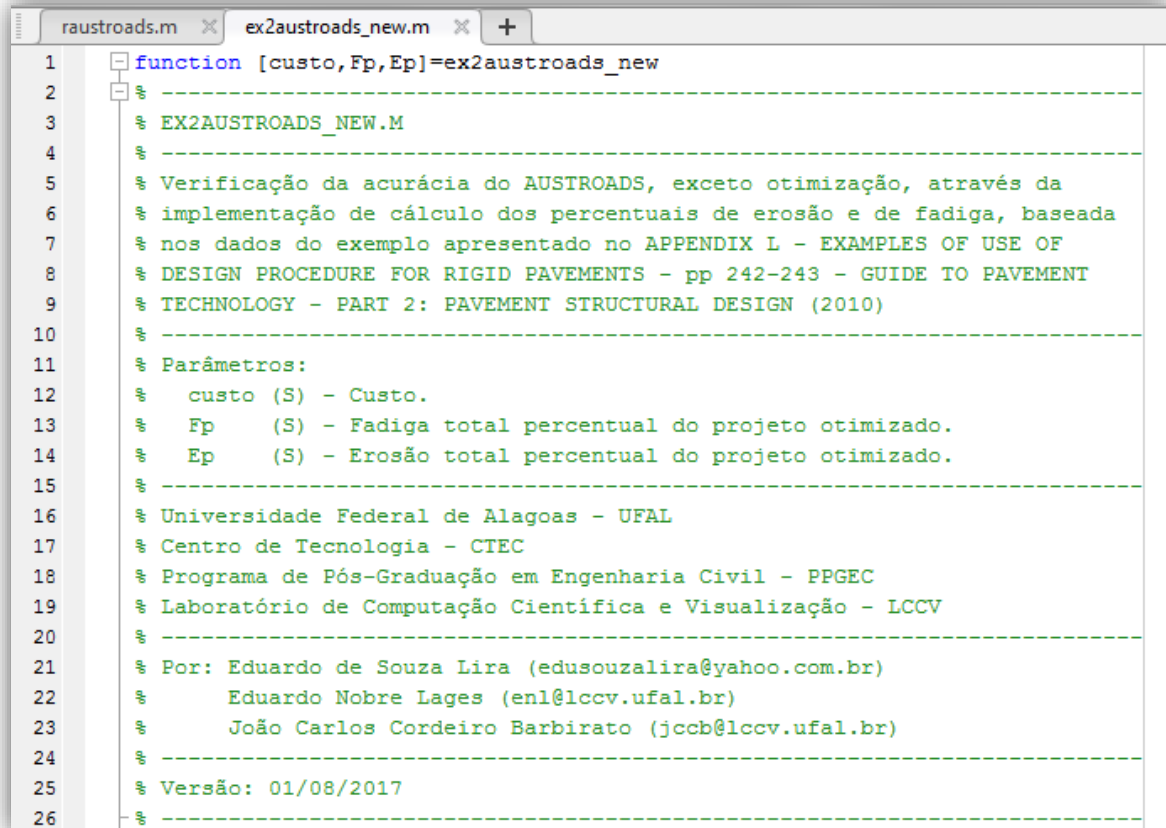
raustroads.m x  oaustroads.m* x  ex1austroads.m x  ex2austroads.m x  ex3austroads.m x  +
36
37     % Define a função do custo do m^3 do concreto em função do fck em MPa
38 -   cunt=@(fck)3.02207792208E+2-3.80543530543*fck+1.85425685425E-1*fck^2- ...
39     1.34680134680E-3*fck^3;
40
41     % Redefine algoritmo e executa função de otimização
42 -   options=optimset('Algorithm','interior-point');
43
44 -   [vp,custo]=fmincon(@(vp)vp(1)/1000*cunt(vp(2)),[250 40],[],[],[],[],[0 36], ...
45     [Inf 60],@(vp)raustroads(vp(1),vp(2),Ef,LSF,AC,BT,P,nrp),options);
46
47     % Variáveis otimizadas de projeto
48 -   Do=vp(1);
49 -   fcko=vp(2);
50
51     % Avalia fadiga total percentual e erosão total percentual do projeto
52     % otimizado
53 -   c=raustroads(Do,fcko,Ef,LSF,AC,BT,P,nrp);
54
55 -   Fp=c(1)+100;
56 -   Ep=c(2)+100;
57
58     % Cálculo da resistência característica otimizada à tração na flexão do
59     % concreto em MPa, de acordo com a Eq. (6.9) - Section 6.6.3 - GUIDE
60     % TO PAVEMENT TECHNOLOGY - PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010)
61 -   fcfo=0.75*sqrt(fcko);

```

APÊNDICE F – Exemplo 1

Verificação da acurácia do algoritmo *austroads* (exceto otimização) – AUSTROADS de 2010 (a-d)

a)



```

1  function [custo,Fp,Ep]=ex2austroads_new
2  % -----
3  % EX2AUSTROADS_NEW.M
4  % -----
5  % Verificação da acurácia do AUSTROADS, exceto otimização, através da
6  % implementação de cálculo dos percentuais de erosão e de fadiga, baseada
7  % nos dados do exemplo apresentado no APPENDIX L - EXAMPLES OF USE OF
8  % DESIGN PROCEDURE FOR RIGID PAVEMENTS - pp 242-243 - GUIDE TO PAVEMENT
9  % TECHNOLOGY - PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010)
10 % -----
11 % Parâmetros:
12 % custo (S) - Custo.
13 % Fp      (S) - Fadiga total percentual do projeto otimizado.
14 % Ep      (S) - Erosão total percentual do projeto otimizado.
15 % -----
16 % Universidade Federal de Alagoas - UFAL
17 % Centro de Tecnologia - CTEC
18 % Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC
19 % Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV
20 % -----
21 % Por: Eduardo de Souza Lira (edusouzalira@yahoo.com.br)
22 %      Eduardo Nobre Lages (enl@lccv.ufal.br)
23 %      João Carlos Cordeiro Barbirato (jccb@lccv.ufal.br)
24 % -----
25 % Versão: 01/08/2017
26 % -----

```

b)

```
raustroads.m x ex2austroads_new.m x +
28 % Espessura do pavimento
29 D=210;
30
31 % Resistência característica do concreto à tração na flexão (MPa)
32 fcf=4.5;
33
34 % CBR efetivo do sub-leito (%)
35 Ef=75;
36
37 % Fator de segurança de carga
38 LSF=1.3;
39
40 % Flag se há (1) ou não (0) acostamento de concreto
41 AC=1;
42
43 % Flag se há (1) ou não (0) junta com barra de transferência
44 BT=0;
45
46 % Matriz de cargas por eixo, em kN, referentes às categorias SAST, SADT,
47 % TAST, TADT, TRDT e QADT
48 P=[130 130 200 230 260 260; ...
49     120 120 190 220 250 250; ...
50     110 110 180 210 240 240; ...
51     100 100 170 200 230 230; ...
52     90 90 160 190 220 220; ...
53     80 80 150 180 210 210; ...
54     70 70 140 170 200 200; ...
55     60 60 130 160 190 190; ...
56     50 50 120 150 180 180; ...
57     40 40 110 140 170 170; ...
58     30 30 100 130 160 160; ...
59     20 20 90 120 150 150; ...
60     10 10 80 110 140 140; ...
61     0 0 70 100 130 130; ...
62     0 0 60 90 120 120; ...
63     0 0 0 80 110 0; ...
64     0 0 0 70 0 0; ...
65     0 0 0 60 0 0];
66
```


c)

```

raustroads.m x ex2austroads_new.m x +
67 % Matriz de número de repetições previstas de carga, já considerando a
68 % vida útil do projeto, referentes às categorias SAST, SADT, TAST, TADT,
69 % TRDT e QADT
70 - nrp=[ 2735 1864 200 1658 474 0; ...
71 2735 8847 260 3336 5358 0; ...
72 2735 31309 492 8298 14818 0; ...
73 5565 106425 831 34509 45963 0; ...
74 17088 226832 1540 88423 138469 0; ...
75 124864 353197 3038 193007 304051 0; ...
76 1022114 496600 5540 368194 499234 0; ...
77 3661188 733898 10595 592281 457794 0; ...
78 4706568 1283520 21251 831908 360942 0; ...
79 2469612 1675452 35186 676922 285285 0; ...
80 2430312 1792344 51912 608961 243608 0; ...
81 1230404 664374 57420 616627 237274 0; ...
82 44079 265337 59796 649261 198971 0; ...
83 0 0 60516 750271 186302 0; ...
84 0 0 36972 788500 195242 0; ...
85 0 0 0 1012068 219099 0; ...
86 0 0 0 1133384 0 0; ...
87 0 0 0 985340 0 0];
88
89 % Executa o procedimento de cálculo dos percentuais de fadiga e erosão do
90 % pavimento
91 - [c,~]=raustroads(D, (fcf/0.75)^2, Ef, LSF, AC, BT, P, nrp);
92
93 - Fp=c(1)+100;
94 - Ep=c(2)+100;
95
96 % Calcula custo do pavimento
97 - cunt=@(fck) 3.02207792208E+2-3.80543530543*fck+1.85425685425E-1*fck.^2- ...
98 1.34680134680E-3*fck.^3;
99
100 - custo=D/1000*cunt((fcf/0.75)^2);

```

d)



```
Command Window
>> [custo,Fp,Ep]=ex2austroads_new

custo =

    71.9644

Fp =

    125.3350

Ep =

    119.3405

fx >>
```

The image shows a MATLAB Command Window with the following content:

- Command: `>> [custo,Fp,Ep]=ex2austroads_new`
- Output for `custo`: `71.9644`
- Output for `Fp`: `125.3350`
- Output for `Ep`: `119.3405`
- Current prompt: `fx >>`

APÊNDICE G – Exemplo 2

Cenário 1, 1ª versão: Otimização via *austroads* (f_{cf} mínimo = 3,4 MPa) - Packard e Tayabji
(1985) (a-e)

a)

```

1  function [Do, fcko, fcfo, custo, Fp, Ep]=exlaustroads
2  %
3  % EX1AUSTROADS.M
4  % -----
5  % Exemplo de otimização do pavimento rígido via AUSTROADS, baseado nos
6  % dados do exemplo apresentado por Packard e Tayabji em Concrete Pavement
7  % Design and Rehabilitation - pp 225-236 - Proceedings - Third Internati-
8  % onal Conference, Purdue University, 1985.
9  % -----
10 % Parâmetros:
11 %   Do   (S) - Altura otimizada da placa de concreto (mm).
12 %   fcko (S) - Fck otimizado do concreto (MPa).
13 %   fcfo (S) - Resistência característica otimizada do concreto à tração
14 %             na flexão (MPa).
15 %   custo (S) - Custo otimizado.
16 %   Fp   (S) - Fadiga total percentual do projeto otimizado.
17 %   Ep   (S) - Erosão total percentual do projeto otimizado.
18 % -----
19 % Universidade Federal de Alagoas - UFAL
20 % Centro de Tecnologia - CTEC
21 % Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC
22 % Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV
23 % -----
24 % Por: Eduardo de Souza Lira (edusouzalira@yahoo.com.br)
25 %      Eduardo Nobre Lages (enl@lccv.ufal.br)
26 %      João Carlos Cordeiro Barbirato (jc cb@lccv.ufal.br)
27 % -----
28 % Versão: 01/08/2017
29 % -----

```

b)

```
raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
29 % -----
30 % CBR efetivo do sub-leito (%)
31 Ef=20;
32
33 % Fator de segurança de carga
34 LSF=1.2;
35
36 % Flag se há (1) ou não (0) acostamento de concreto
37 AC=0;
38
39 % Flag se há (1) ou não (0) junta com barra de transferência
40 BT=1;
41
42 % Matriz de cargas por eixo, em kN, referentes às categorias SAST, SADT,
43 % TAST, TADT, TRDT e QADT
44 P=[0 150 0 260 0 0; ...
45     0 140 0 240 0 0; ...
46     0 130 0 220 0 0; ...
47     0 120 0 200 0 0; ...
48     0 110 0 180 0 0; ...
49     0 100 0 160 0 0; ...
50     0 90 0 140 0 0; ...
51     0 80 0 120 0 0; ...
52     0 70 0 100 0 0; ...
53     0 60 0 80 0 0; ...
54     0 0 0 0 0 0; ...
55     0 0 0 0 0 0; ...
56     0 0 0 0 0 0; ...
57     0 0 0 0 0 0; ...
58     0 0 0 0 0 0; ...
59     0 0 0 0 0 0; ...
60     0 0 0 0 0 0; ...
61     0 0 0 0 0 0];
```

c)

```

raustroads.m x oaustrroads.m x ex1austrroads.m* x ex2austrroads.m x ex3austrroads.m x +
63 % Matriz de número de repetições previstas de carga, já considerando a
64 % vida útil do projeto, referentes às categorias SAST, SADT, TAST, TADT,
65 % TRDT e QADT
66 - nrp=[ 0 6310 0 21320 0 0; ...
67 0 14690 0 42870 0 0; ...
68 0 30140 0 124900 0 0; ...
69 0 64410 0 372900 0 0; ...
70 0 106900 0 885800 0 0; ...
71 0 235800 0 930700 0 0; ...
72 0 307200 0 1656000 0 0; ...
73 0 422500 0 984900 0 0; ...
74 0 586900 0 1227000 0 0; ...
75 0 1837000 0 1356000 0 0; ...
76 0 0 0 0 0 0; ...
77 0 0 0 0 0 0; ...
78 0 0 0 0 0 0; ...
79 0 0 0 0 0 0; ...
80 0 0 0 0 0 0; ...
81 0 0 0 0 0 0; ...
82 0 0 0 0 0 0; ...
83 0 0 0 0 0 0];
84
85 % Executa o procedimento de otimização do pavimento
86 - [Do, fcko, fcfo, custo, Fp, Ep]=oaustrroads(Ef, LSF, AC, BT, P, nrp);

```

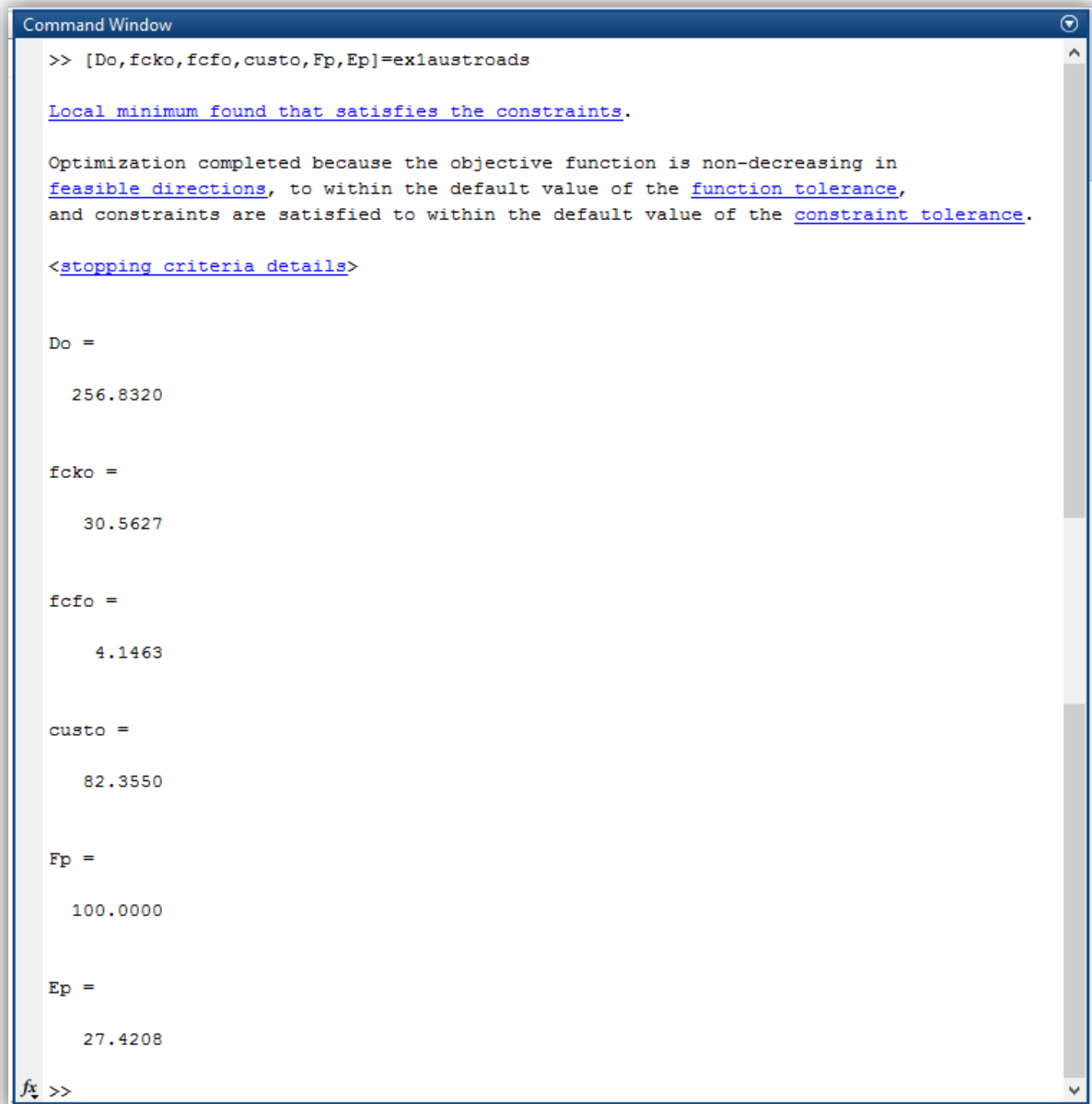
d)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
87
88 % Figura representativa da otimização do pavimento
89 - cunt=@(fck) 3.02207792208E+2-3.80543530543*fck+1.85425685425E-1*fck.^2- ...
90     1.34680134680E-3*fck.^3;
91
92 - h = linspace(1,400);
93 - fck = linspace(20,60);
94 - [H,FCK] = meshgrid(h,fck);
95
96 - C=zeros(size(H));
97 - FP=zeros(size(H));
98 - EP=zeros(size(H));
99
100 - for i=1:size(H,1)
101 -     for j=1:size(H,2)
102 -         C(i,j)=H(i,j)/1000.*cunt(FCK(i,j));
103 -         aux=raustroads(H(i,j),FCK(i,j),EF,LSF,AC,BT,P,nrp);
104 -         FP(i,j)=aux(1);
105 -         EP(i,j)=aux(2);
106 -     end
107 - end
108
109 - FP=FP+100;
110 - EP=EP+100;
111
112 - contour(H,FCK,C,'ShowText','on','linecolor','b');
113 - xlabel('Espessura (mm)');
114 - ylabel('f_c_k (MPa)');
115 - hold on
116 - contour(H,FCK,C,[custo,custo],'linewidth',2,'linecolor','b');
117
118 - contour(H,FCK,FP,[100,100],'linewidth',2,'linecolor','r');
119 - contour(H,FCK,EP,[100,100],'linewidth',2,'linecolor','g');
120
121 - plot(Do,fcko,'dk','MarkerFaceColor','k');
122
123 - legend('Custos','Custo Otimizado','Fadiga 100%','Erosão 100%','Projeto Otimizado');
124
125 - title(['Espessura otimizada = ' num2str(Do,'%1f') ' mm - f_c_k otimizado = ' ...
126     num2str(fcko,'%1f') ' MPa - Custo otimizado = R$ ' num2str(custo,'%1f') ...
127     '/m^2']);
128

```

e)



```
Command Window
>> [Do,fcko,fcfo,custo,Fp,Ep]=exlaustroads

Local minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in
feasible directions, to within the default value of the function tolerance,
and constraints are satisfied to within the default value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

Do =

    256.8320

fcko =

    30.5627

fcfo =

     4.1463

custo =

    82.3550

Fp =

   100.0000

Ep =

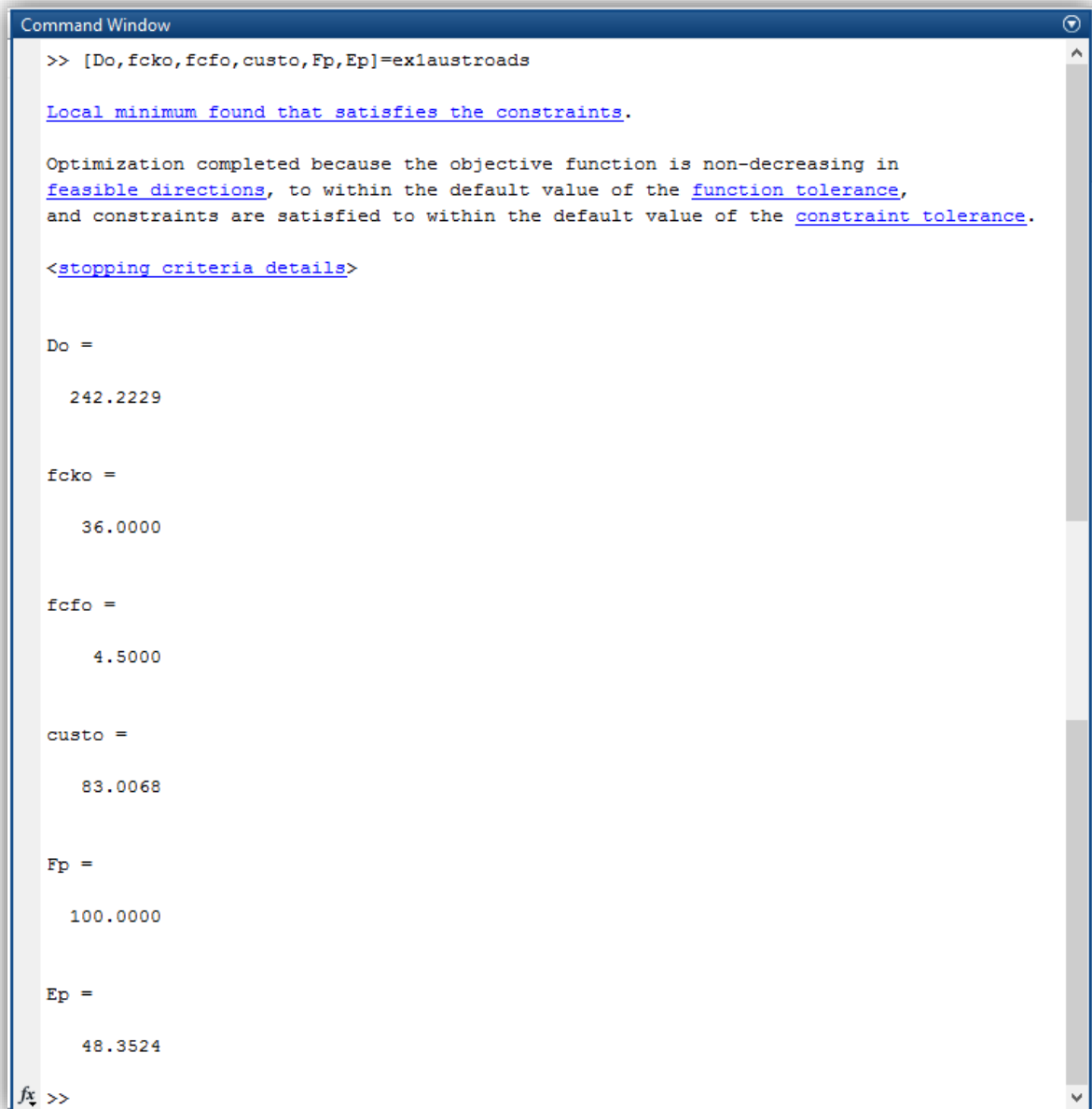
    27.4208

fx >>
```

ANEXO H – Exemplo 2

Cenário 1, 2ª versão: Otimização via *austroads* (f_{cf} mínimo = 4,5 MPa) - Packard e Tayabji
(1985) (a)

a)



```
Command Window
>> [Do,fcko,fcfo,custo,Fp,Ep]=exlaustroads

Local minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in
feasible directions, to within the default value of the function tolerance,
and constraints are satisfied to within the default value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

Do =

    242.2229

fcko =

    36.0000

fcfo =

    4.5000

custo =

    83.0068

Fp =

    100.0000

Ep =

    48.3524

fx >>
```


ANEXO I – Exemplo 2

Cenário 2, 1ª versão: Otimização via *austroads* (f_{cf} mínimo = 3,4 MPa) – AUSTROADS de 2010 (a-e)

a)

```

1  function [Do, fcko, fcfo, custo, Fp, Ep]=ex2austroads
2  %
3  % EX1AUSTROADS.M
4  %
5  % Exemplo de otimização do pavimento rígido via AUSTROADS, baseado nos
6  % dados do exemplo apresentado no APPENDIX L - EXAMPLES OF USE OF DESIGN
7  % PROCEDURE FOR RIGID PAVEMENTS - pp 242-243 - GUIDE TO PAVEMENT
8  % TECHNOLOGY - PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN (2010)
9  %
10 %
11 % Parâmetros:
12 %   Do   (S) - Altura ótima da placa de concreto (mm).
13 %   fcko (S) - Fck ótimo do concreto (MPa).
14 %   fcfo (S) - Resistência característica ótima do concreto à tração na
15 %             flexão (MPa).
16 %   custo (S) - Custo ótimo.
17 %   Fp   (S) - Fadiga total percentual do projeto ótimo.
18 %   Ep   (S) - Erosão total percentual do projeto ótimo.
19 %
20 % -----
21 % Universidade Federal de Alagoas - UFAL
22 % Centro de Tecnologia - CTEC
23 % Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC
24 % Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV
25 %
26 % Por: Eduardo de Souza Lira (edusouzalira@yahoo.com.br)
27 %      Eduardo Nobre Lages (enl@lccv.ufal.br)
28 %      João Carlos Cordeiro Barbirato (jccb@lccv.ufal.br)
29 %
30 % -----
31 % Versão: 06/05/2017
32 % -----

```

b)

```
raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
30
31 % CBR efetivo do sub-leito (%)
32 - Ef=75;
33
34 % Fator de segurança de carga
35 - LSF=1.3;
36
37 % Flag se há (1) ou não (0) acostamento de concreto
38 - AC=1;
39
40 % Flag se há (1) ou não (0) junta com barra de transferência
41 - BT=0;
42
43 % Matriz de cargas por eixo, em kN, referentes às categorias SAST, SADT,
44 % TAST, TADT, TRDT e QADT
45 - P=[130 130 200 230 260 260; ...
46     120 120 190 220 250 250; ...
47     110 110 180 210 240 240; ...
48     100 100 170 200 230 230; ...
49     90 90 160 190 220 220; ...
50     80 80 150 180 210 210; ...
51     70 70 140 170 200 200; ...
52     60 60 130 160 190 190; ...
53     50 50 120 150 180 180; ...
54     40 40 110 140 170 170; ...
55     30 30 100 130 160 160; ...
56     20 20 90 120 150 150; ...
57     10 10 80 110 140 140; ...
58     0 0 70 100 130 130; ...
59     0 0 60 90 120 120; ...
60     0 0 0 80 110 0; ...
61     0 0 0 70 0 0; ...
62     0 0 0 60 0 0];
63
```

c)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
64 % Matriz de número de repetições previstas de carga, já considerando a
65 % vida útil do projeto, referentes às categorias SAST, SADT, TAST, TADT,
66 % TRDT e QADT
67 - nrp=[ 2735 1864 200 1658 474 0; ...
68 2735 8847 260 3336 5358 0; ...
69 2735 31309 492 8298 14818 0; ...
70 5565 106425 831 34509 45963 0; ...
71 17088 226832 1540 88423 138469 0; ...
72 124864 353197 3038 193007 304051 0; ...
73 1022114 496600 5540 368194 499234 0; ...
74 3661188 733898 10595 592281 457794 0; ...
75 4706568 1283520 21251 831908 360942 0; ...
76 2469612 1675452 35186 676922 285285 0; ...
77 2430312 1792344 51912 608961 243608 0; ...
78 1230404 664374 57420 616627 237274 0; ...
79 44079 265337 59796 649261 198971 0; ...
80 0 0 60516 750271 186302 0; ...
81 0 0 36972 788500 195242 0; ...
82 0 0 0 1012068 219099 0; ...
83 0 0 0 1133384 0 0; ...
84 0 0 0 985340 0 0];
85
86 % Executa o procedimento de otimização do pavimento
87 - [Do, fcko, fcfo, custo, Fp, Ep]=oaustroads(Ef, LSF, AC, BT, P, nrp);

```

d)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
88
89 % Figura representativa da otimização do pavimento
90 - cunt=@(fck)3.02207792208E+2-3.80543530543*fck+1.85425685425E-1*fck.^2- ...
91     1.34680134680E-3*fck.^3;
92
93 - h = linspace(1,400);
94 - fck = linspace(20,60);
95 - [H,FCK] = meshgrid(h,fck);
96
97 - C=zeros(size(H));
98 - FP=zeros(size(H));
99 - EP=zeros(size(H));
100
101 - for i=1:size(H,1)
102 -     for j=1:size(H,2)
103 -         C(i,j)=H(i,j)/1000.*cunt(FCK(i,j));
104 -         aux=raustroads(H(i,j),FCK(i,j),Ef,LSF,AC,BT,P,nrp);
105 -         FP(i,j)=aux(1);
106 -         EP(i,j)=aux(2);
107 -     end
108 - end
109
110 - FP=FP+100;
111 - EP=EP+100;
112
113 - contour(H,FCK,C,'ShowText','on','linecolor','b');
114 - xlabel('Espessura (mm)');
115 - ylabel('f_c_k (MPa)');
116 - hold on
117 - contour(H,FCK,C,[custo,custo],'linewidth',2,'linecolor','b');
118
119 - contour(H,FCK,FP,[100,100],'linewidth',2,'linecolor','r');
120 - contour(H,FCK,EP,[100,100],'linewidth',2,'linecolor','g');
121
122 - plot(Do,fcko,'dk','MarkerFaceColor','k');
123
124 - legend('Custos','Custo Otimizado','Fadiga 100%','Erosão 100%','Projeto Otimizado');
125
126 - title(['Espessura otimizada = ' num2str(Do,'%1f') ' mm - f_c_k ótimo = ' ...
127     num2str(fcko,'%1f') ' MPa - Custo otimizado = R$ ' num2str(custo,'%1f') ...
128     '/m^2']);

```

e)

```
Command Window
>> [Do,fcko,fcfo,custo,Fp,Ep]=ex2austroads

Local minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in
feasible directions, to within the default value of the function tolerance,
and constraints are satisfied to within the default value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

Do =

    226.5617

fcko =

    29.4938

fcfo =

    4.0731

custo =

    71.7558

Fp =

    100.0000

Ep =

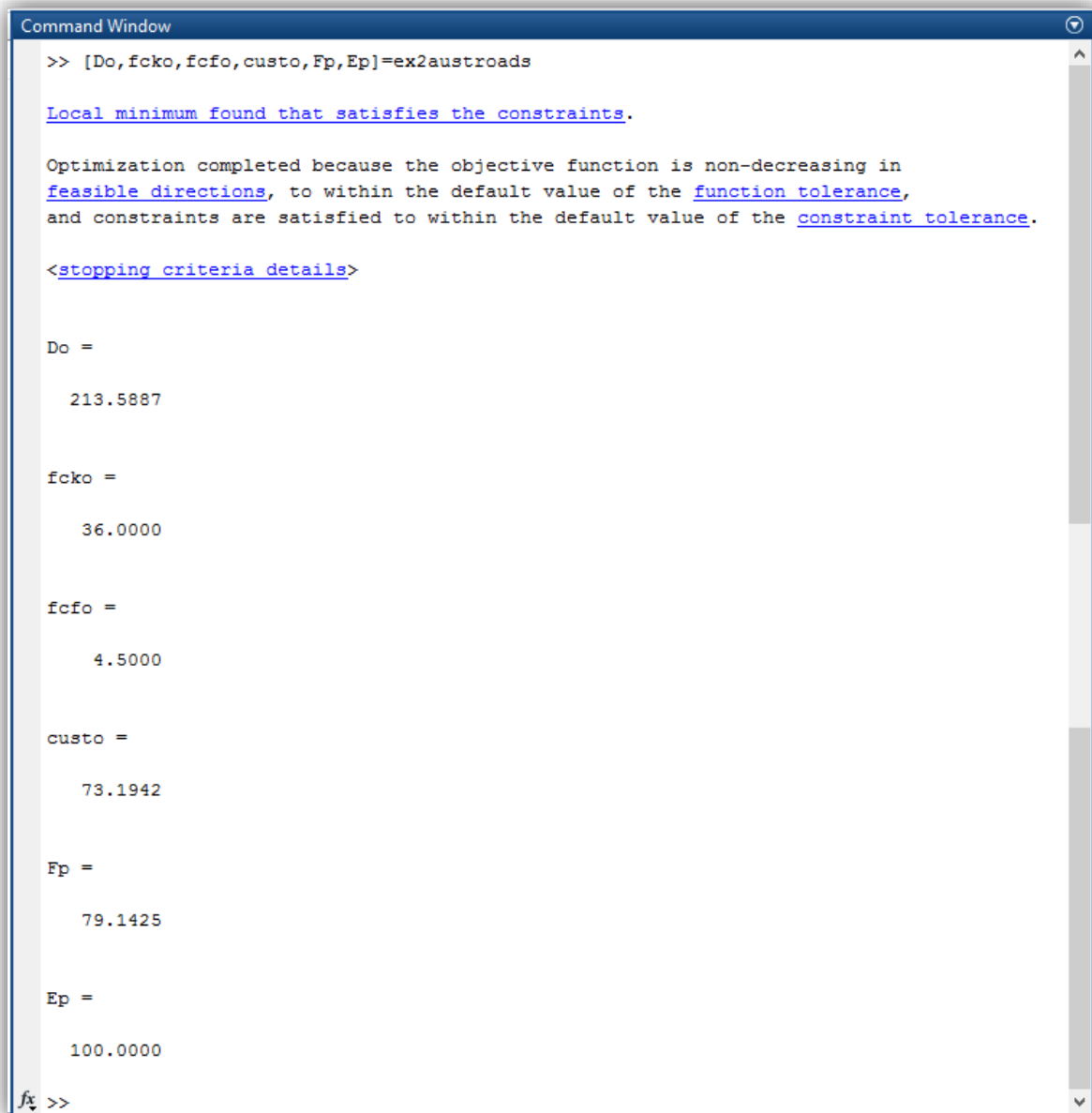
    53.1917

fx >>
```

ANEXO J – Exemplo 2

Cenário 2, 2ª versão: Otimização via *austroads* (f_{cf} mínimo = 4,5 MPa) – AUSTROADS de 2010 (a)

a)



```
Command Window
>> [Do,fcko,fcfo,custo,Fp,Ep]=ex2austroads

Local minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in
feasible directions, to within the default value of the function tolerance,
and constraints are satisfied to within the default value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

Do =

    213.5887

fcko =

    36.0000

fcfo =

     4.5000

custo =

    73.1942

Fp =

    79.1425

Ep =

    100.0000

fx >>
```

ANEXO K – Exemplo

Cenário 3, 1ª versão: Otimização via *austroads* (f_{cf} mínimo = 3,4 MPa) – DNIT (2005) (a-e)

a)

```

1  function [Do,fcko,fcfo,custo,Fp,Ep]=ex3austroads
2  % -----
3  % EX1AUSTROADS.M
4  % -----
5  % Exemplo de otimização do pavimento rígido via AUSTROADS, baseado nos
6  % dados do exemplo apresentado no Manual de Pavimentos Rígidos do Departa-
7  % mento Nacional de Infraestruturas de Transporte - MPR/DNIT, 2005
8  % (Seção 3.1.2.3, Quadro 6 - solução 2 da dissertação de Eduardo Lira)
9  % -----
10 % Parâmetros:
11 %   Do   (S) - Altura otimizada da placa de concreto (mm).
12 %   fcko (S) - Fck otimizado do concreto (MPa).
13 %   fcfo (S) - Resistência característica otimizada do concreto à tração
14 %             na flexão (MPa).
15 %   custo (S) - Custo otimizado.
16 %   Fp   (S) - Fadiga total percentual do projeto otimizado.
17 %   Ep   (S) - Erosão total percentual do projeto otimizado.
18 % -----
19 % Universidade Federal de Alagoas - UFAL
20 % Centro de Tecnologia - CTEC
21 % Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC
22 % Laboratório de Computação Científica e Visualização - LCCV
23 % -----
24 % Por: Eduardo de Souza Lira (edusouzalira@yahoo.com.br)
25 %      Eduardo Nobre Lages (enl@lccv.ufal.br)
26 %      João Carlos Cordeiro Barbirato (jccb@lccv.ufal.br)
27 % -----
28 % Versão: 01/08/2017
29 % -----
30

```

b)

```
raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
31 % CBR efetivo do sub-leito (%)
32 - Ef=35;
33
34 % Fator de segurança de carga
35 - LSF=1.2;
36
37 % Flag se há (1) ou não (0) acostamento de concreto
38 - AC=0;
39
40 % Flag se há (1) ou não (0) junta com barra de transferência
41 - BT=0;
42
43 % Matriz de cargas por eixo, em kN, referentes às categorias SAST, SADT,
44 % TAST, TADT, TRDT e QADT
45 - P=[0 160 0 240 300 0 ; ...
46     0 150 0 230 280 0; ...
47     0 140 0 220 260 0; ...
48     0 130 0 210 240 0; ...
49     0 120 0 200 0 0; ...
50     0 110 0 190 0 0; ...
51     0 100 0 180 0 0; ...
52     0 90 0 170 0 0; ...
53     0 80 0 160 0 0; ...
54     0 70 0 150 0 0; ...
55     0 60 0 140 0 0; ...
56     0 50 0 130 0 0; ...
57     0 0 0 0 0 0; ...
58     0 0 0 0 0 0; ...
59     0 0 0 0 0 0; ...
60     0 0 0 0 0 0; ...
61     0 0 0 0 0 0; ...
62     0 0 0 0 0 0];
63
```


c)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
64 % Matriz de número de repetições previstas de carga, já considerando a
65 % vida útil do projeto, referentes às categorias SAST, SADT, TAST, TADT,
66 % TRDT e QADT
67 - nrp=[0 5565 0 5565 18921 0; ...
68 0 39296 0 5565 12243 0; ...
69 0 65889 0 12243 17808 0; ...
70 0 206645 0 17808 30051 0; ...
71 0 242438 0 17808 0 0; ...
72 0 282267 0 23373 0 0; ...
73 0 310404 0 30051 0 0; ...
74 0 282267 0 17808 0 0; ...
75 0 242715 0 12243 0 0; ...
76 0 238118 0 12243 0 0; ...
77 0 290488 0 5565 0 0; ...
78 0 203804 0 182532 0 0; ...
79 0 3270843 0 0 0 0; ...
80 0 0 0 0 0 0; ...
81 0 0 0 0 0 0; ...
82 0 0 0 0 0 0; ...
83 0 0 0 0 0 0; ...
84 0 0 0 0 0 0];
85
86 % Executa o procedimento de otimização do pavimento
87 - [Do, fcko, fcfo, custo, Fp, Ep]=oaustroads(Ef, LSF, AC, BT, P, nrp);

```

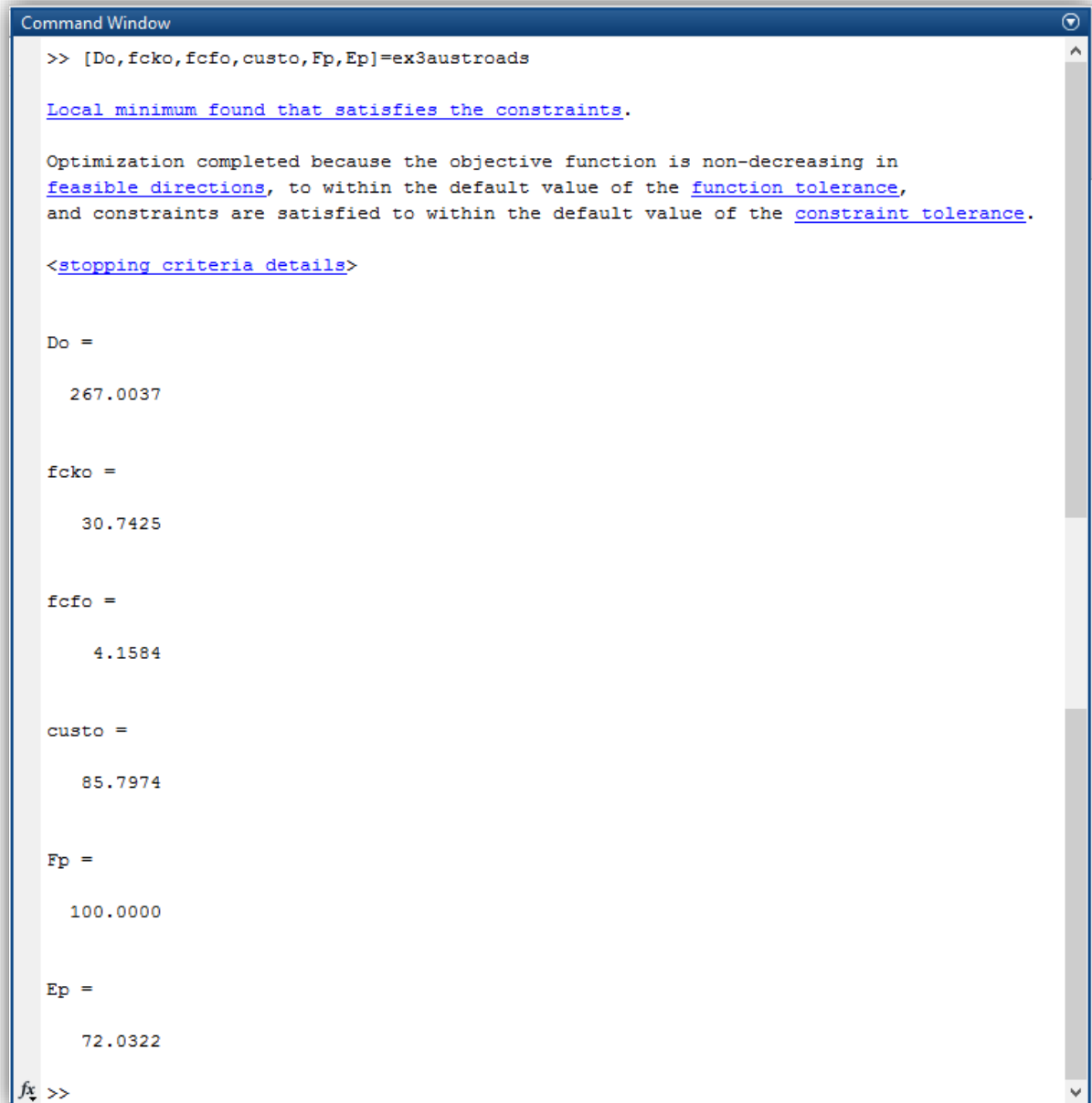
d)

```

raustroads.m x oaustroads.m x ex1austroads.m x ex2austroads.m x ex3austroads.m x +
88
89 % Figura representativa da otimização do pavimento
90 - cunt=@(fck)3.02207792208E+2-3.80543530543*fck+1.85425685425E-1*fck.^2- ...
91     1.34680134680E-3*fck.^3;
92
93 - h = linspace(1,400);
94 - fck = linspace(20,60);
95 - [H,FCK] = meshgrid(h,fck);
96
97 - C=zeros(size(H));
98 - FP=zeros(size(H));
99 - EP=zeros(size(H));
100
101 - for i=1:size(H,1)
102 -     for j=1:size(H,2)
103 -         C(i,j)=H(i,j)/1000.*cunt(FCK(i,j));
104 -         aux=raustroads(H(i,j),FCK(i,j),Ef,LSF,AC,BT,P,nrp);
105 -         FP(i,j)=aux(1);
106 -         EP(i,j)=aux(2);
107 -     end
108 - end
109
110 - FP=FP+100;
111 - EP=EP+100;
112
113 - contour(H,FCK,C,'ShowText','on','linecolor','b');
114 - xlabel('Espessura (mm)');
115 - ylabel('f_c_k (MPa)');
116 - hold on
117 - contour(H,FCK,C,[custo,custo],'linewidth',2,'linecolor','b');
118
119 - contour(H,FCK,FP,[100,100],'linewidth',2,'linecolor','r');
120 - contour(H,FCK,EP,[100,100],'linewidth',2,'linecolor','g');
121
122 - plot(Do,fcko,'dk','MarkerFaceColor','k');
123
124 - legend('Custos','Custo Otimizado','Fadiga 100%','Erosão 100%','Projeto Otimizado');
125
126 - title(['Espessura otimizada = ' num2str(Do,'%1f') ' mm - f_c_k otimizado = ' ...
127     num2str(fcko,'%1f') ' MPa - Custo otimizado = R$ ' num2str(custo,'%1f') ...
128     '/m^2']);

```

e)



```
Command Window
>> [Do,fcko,fcfo,custo,Fp,Ep]=ex3austroads

Local minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in
feasible directions, to within the default value of the function tolerance,
and constraints are satisfied to within the default value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

Do =

    267.0037

fcko =

    30.7425

fcfo =

     4.1584

custo =

    85.7974

Fp =

   100.0000

Ep =

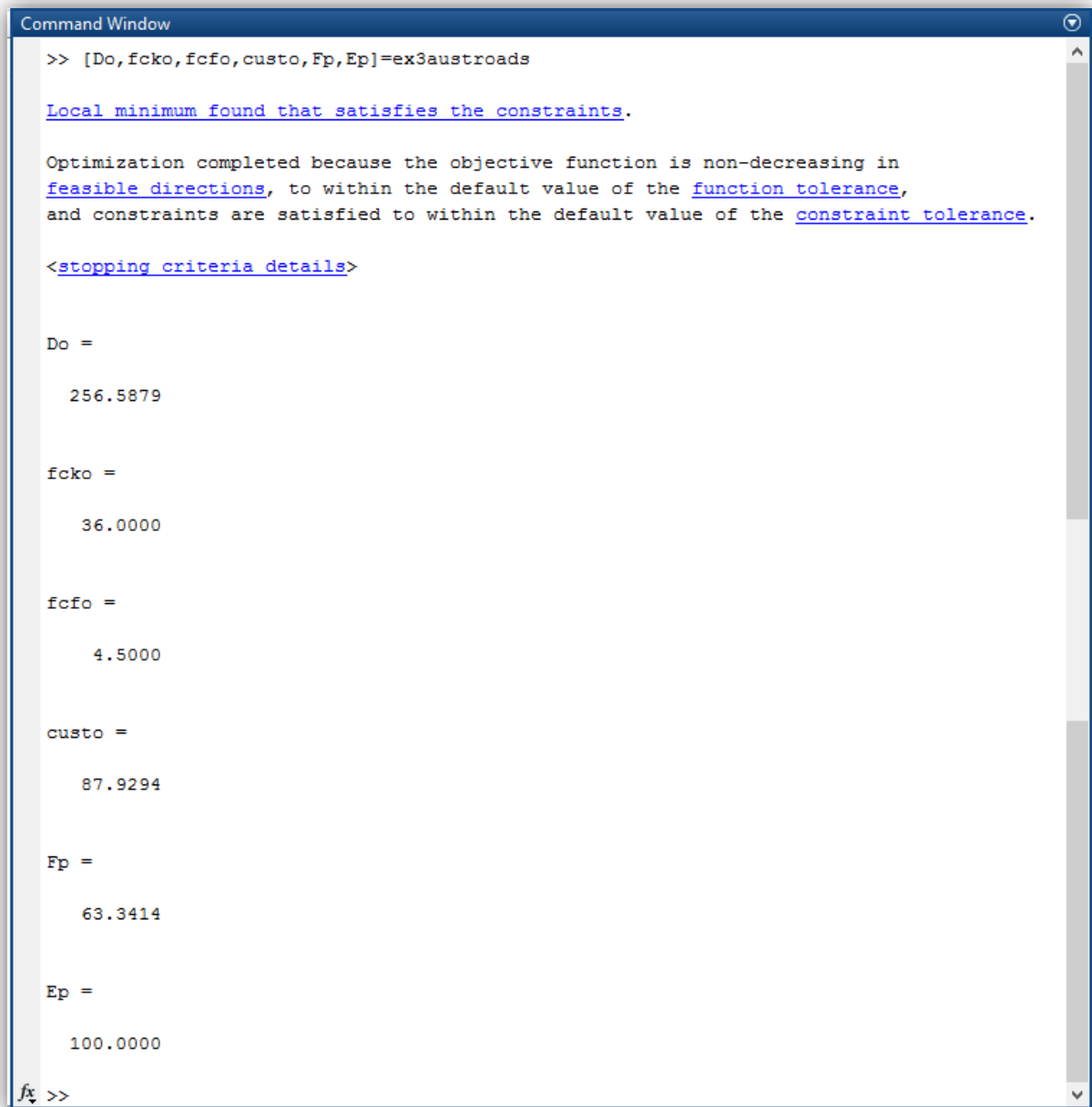
    72.0322

fx >>
```

ANEXO L – Exemplo 2

Cenário 3, 2ª versão: Otimização via *austroads* (f_{cf} mínimo = 4,5 MPa) – DNIT (2005) (a)

a)



```
Command Window
>> [Do, fcko, fcfo, custo, Fp, Ep]=ex3austroads

Local minimum found that satisfies the constraints.

Optimization completed because the objective function is non-decreasing in
feasible directions, to within the default value of the function tolerance,
and constraints are satisfied to within the default value of the constraint tolerance.

<stopping criteria details>

Do =

    256.5879

fcko =

    36.0000

fcfo =

     4.5000

custo =

    87.9294

Fp =

    63.3414

Ep =

    100.0000

fx >>
```

ANEXOS

ANEXO A – Exemplo de cálculo de eixos totais por classe de carga (20 anos)

EXEMPLO DE CÁLCULO DE EIXOS TOTAIS POR CLASSE DE CARGA (20 ANOS)							
Faixa da Carga (tf)	Ônibus (T = 723)		Caminhões de 2 eixos (T = 460)		Caminhões de mais de 2 eixos (T = 1113)		Total de Eixos Solicitantes
	Eixos por 1000 veículos	Nº de Eixos	Eixos por 1000 veículos	Nº de Eixos	Eixos por 1000 veículos	Nº de Eixos	
Eixos Simples							
< 5	1348	974.604	1452	667.920	1463	1.628.319	3.270.843
5 - 6	130	93.990	50	23.000	78	86.814	203.804
6 - 7	174	124.802	65	29.900	122	135.786	290.488
7 - 8	130	93.920	57	26.220	106	117.978	238.118
8 - 9	87	62.901	57	26.220	138	153.594	242.715
9 - 10	87	62.901	77	35.420	191	212.583	310.904
10 - 11	43	31.089	96	44.160	186	207.018	282.267
11 - 12			77	35.420	186	207.018	242.438
12 - 13			50	23.000	165	183.645	206.645
13 - 14			15	6.900	53	58.989	65.889
14 - 15			8	3.680	32	35.616	39.296
15 - 16					5	5.565	5.565
Eixos Tandem Duplos							
< 13					164	182.532	182.532
13 - 14					5	5.565	5.565
14 - 15					11	12.243	12.243
15 - 16					11	12.243	12.243
16 - 17					16	17.808	17.808
17 - 18					27	30.051	30.051
18 - 19					21	23.373	23.373
19 - 20					16	17.808	17.808
20 - 21					16	17.808	17.808
21 - 22					11	12.243	12.243
22 - 23					5	5.565	5.565
23 - 24					5	5.565	5.565
Eixos Tandem Triplos							
< 24					27	30.051	30.051
24 - 26					16	17.808	17.808
26 - 28					11	12.243	12.243
28 - 30					17	18.921	18.921

Fonte: DNIT (2005).

ANEXO B – Cálculo da espessura de pavimento de concreto – método PCA/1984

Espessura-tentativa (cm)	25,0		
Sub-base de brita tratada com cimento, espessura (cm)	12,0		
Ksb (MPa/m)	100		
Fator de segurança de cargas (Fsc)	1,2		
Resistência característica à tração na flexão (Mpa)	4,8		
Período do projeto (anos)	20	Sim	Não
Acostamento de concreto			X
Juntas com barras de transferência			X

Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x Fsc (tf)	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSIÃO	
			Nº de repetições admissíveis	Consumo de fadiga (%)	Nº de repetições admissíveis	Danos por erosão (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Eixo Simples					(8) Tensão Equivalente	1,14
					(9) Fator de Fadiga	0,238
					(10) Fator de Erosão	2,72
< 5	6,0	3.270.843	ilimitado	-	ilimitado	-
5 - 6	7,2	203.804	ilimitado	-	ilimitado	-
6 - 7	8,4	290.488	ilimitado	-	ilimitado	-
7 - 8	9,6	238.118	ilimitado	-	20.000.000	1,19
8 - 9	10,8	242.715	ilimitado	-	8.000.000	3,03
9 - 10	12,0	310.404	ilimitado	-	4.000.000	7,76
10 - 11	13,2	282.267	ilimitado	-	2.400.000	11,76
11 - 12	14,4	242.438	ilimitado	-	1.400.000	17,32
12 - 13	15,6	206.645	ilimitado	-	900.000	22,96
13 - 14	16,8	65.889	2.000.000	3,29	550.000	11,98
14 - 15	18,0	39.296	400.000	9,82	390.000	10,08
15 - 16	19,2	5.565	140.000	3,98	240.000	2,32
Eixos Tandem Duplos					(11) Tensão Equivalente	0,99
					(12) Fator de Fadiga	0,206
					(13) Fator de Erosão	2,89
< 13	15,6	182.532	ilimitado	-	18.000.000	1,01
13 - 14	16,8	5.565	ilimitado	-	8.000.000	0,07
14 - 15	18,0	12.243	ilimitado	-	7.000.000	0,17
15 - 16	19,2	12.243	ilimitado	-	4.000.000	0,31
16 - 17	20,4	17.808	ilimitado	-	2.900.000	0,61
17 - 18	21,6	30.051	ilimitado	-	1.900.000	1,58
18 - 19	22,8	23.373	ilimitado	-	1.500.000	1,56
19 - 20	24,0	17.808	ilimitado	-	1.300.000	1,37
20 - 21	25,2	17.808	ilimitado	-	900.000	1,98
21 - 22	26,4	12.243	ilimitado	-	610.000	2,01
22 - 23	27,6	5.565	ilimitado	-	510.000	1,09
23 - 24	28,8	5.565	ilimitado	-	410.000	1,36
Eixos Tandem Triplos					(14) Tensão Equivalente	0,73
					(15) Fator de Fadiga	0,151
					(16) Fator de Erosão	2,92
< 24	9,6	30.051	ilimitado	-	3.500.000	0,86
24 - 26	10,4	17.808	ilimitado	-	2.100.000	0,85
26 - 28	11,2	12.243	ilimitado	-	1.500.000	0,82
28 - 30	12,0	18.921	ilimitado	-	900.000	2,10
TOTAL (%)				17,09	TOTAL (%)	106,15

Fonte: DNIT (2005).

ANEXO C – Tensão Equivalente para Eixos Simples e Tandem Duplo (MPa) - PSAC
(pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)																				
	20			40			60			80			100			150			180		
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD			
12	4,30	3,56	3,78	3,01	3,51	2,81	2,68	3,31	2,68	3,17	2,57	2,91	2,43	2,74	2,35						
13	3,84	2,33	3,38	2,73	3,14	2,53	2,40	2,97	2,40	2,84	2,30	2,61	2,16	2,46	2,08						
14	3,46	2,96	3,05	2,49	2,83	2,29	2,16	2,68	2,16	2,56	2,08	2,37	1,94	2,23	1,85						
15	3,14	2,72	2,27	2,29	2,57	2,09	1,97	2,44	1,97	2,33	1,88	2,16	1,75	2,04	1,67						
16	2,87	2,52	2,53	2,12	2,35	1,93	1,81	2,23	1,81	2,13	1,73	1,97	1,60	1,87	1,52						
17	2,63	2,35	2,33	1,97	2,16	1,79	1,67	2,05	1,67	1,96	1,60	1,81	1,47	1,72	1,39						
18	2,43	2,20	2,15	1,84	1,99	1,66	1,55	1,89	1,55	1,81	1,48	1,68	1,36	1,59	1,28						
19	2,25	2,07	1,99	1,72	1,85	1,56	1,45	1,75	1,45	1,68	1,38	1,56	1,26	1,48	1,19						
20	2,10	1,95	1,85	1,62	1,72	1,46	1,36	1,64	1,36	1,56	1,29	1,45	1,18	1,38	1,11						
21	1,96	1,85	1,73	1,53	1,61	1,38	1,29	1,52	1,29	1,46	1,22	1,36	1,11	1,28	1,04						
22	1,83	1,75	1,62	1,45	1,50	1,31	1,22	1,42	1,22	1,37	1,15	1,28	1,05	1,20	0,98						
23	1,72	1,67	1,52	1,38	1,41	1,24	1,15	1,33	1,15	1,28	1,09	1,20	0,99	1,13	0,92						
24	1,62	1,59	1,43	1,31	1,33	1,18	1,10	1,25	1,10	1,21	1,04	1,13	0,94	1,07	0,88						
25	1,53	1,52	1,35	1,25	1,26	1,12	1,05	1,19	1,05	1,14	0,99	1,07	0,89	1,01	0,83						
26	1,45	1,45	1,28	1,20	1,19	1,07	1,00	1,13	1,00	1,08	0,94	1,01	0,85	0,95	0,80						
27	1,83	1,39	1,21	1,15	1,13	1,03	0,95	1,07	0,95	1,03	0,90	0,95	0,81	0,90	0,76						
28	1,31	1,34	1,15	1,10	1,07	0,99	0,91	1,02	0,91	0,98	0,86	0,90	0,78	0,86	0,73						
29	1,25	1,29	1,10	1,06	1,02	0,95	0,88	0,97	0,88	0,93	0,83	0,86	0,75	0,82	0,69						
30	1,19	1,24	1,05	1,02	0,97	0,91	0,85	0,92	0,85	0,89	0,80	0,82	0,72	0,78	0,66						
31	1,13	1,20	1,00	0,99	0,93	0,88	0,81	0,88	0,81	0,84	0,77	0,78	0,69	0,74	0,64						
32	1,09	1,16	0,96	0,95	0,89	0,85	0,78	0,84	0,78	0,80	0,74	0,75	0,67	0,71	0,62						
33	1,04	1,12	0,92	0,92	0,85	0,82	0,80	0,80	0,76	0,77	0,71	0,72	0,64	0,68	0,60						
34	1,00	1,08	0,88	0,89	0,81	0,79	0,77	0,77	0,73	0,73	0,69	0,69	0,62	0,66	0,58						

ES: Eixos Simples

ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT (2005).

ANEXO D – Tensão Equivalente para Eixos Tandem Triplos (MPa) - PSAC
(pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)					
	20	40	60	80	140	180
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	2,60	2,30	2,20	2,14	2,08	2,07
13	2,35	2,04	1,93	1,87	1,80	1,78
14	2,15	1,83	1,72	1,65	1,58	1,55
15	1,99	1,67	1,55	1,48	1,40	1,37
16	1,85	1,54	1,41	1,34	1,25	1,23
17	1,73	1,43	1,30	1,23	1,14	1,11
18	1,62	1,34	1,21	1,14	1,04	1,01
19	1,53	1,26	1,13	1,06	0,96	0,92
20	1,45	1,19	1,07	0,99	0,89	0,85
21	1,37	1,13	1,01	0,93	0,83	0,79
22	1,30	1,07	0,95	0,88	0,78	0,74
23	1,24	1,02	0,91	0,84	0,73	0,70
24	1,18	0,97	0,87	0,80	0,69	0,66
25	1,13	0,93	0,83	0,76	0,66	0,62
26	1,07	0,89	0,79	0,73	0,63	0,59
27	1,02	0,86	0,76	0,70	0,60	0,57
28	0,98	0,82	0,73	0,67	0,58	0,54
29	0,93	0,79	0,71	0,65	0,55	0,52
30	0,89	0,76	0,68	0,63	0,53	0,50
31	0,85	0,73	0,66	0,60	0,51	0,48
32	0,81	0,70	0,63	0,58	0,50	0,46
33	0,77	0,68	0,61	0,56	0,48	0,45
34	0,73	0,65	0,59	0,55	0,46	0,43

ETT: Eixos Tandem Triplos

Fonte: DNIT (2005).

ANEXO E – Fator de Erosão para Eixos Simples e Tandem Duplos - JSBT e PSAC

(Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto)

Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)																				
	20			40			60			80			100			150			200		
	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD	ES	ETD			
12	2,72	3,82	3,69	3,74	3,67	3,69	3,65	3,67	3,65	3,67	3,65	3,67	3,64	3,65	3,63	3,61	3,59	3,58			
13	3,62	3,75	3,59	3,66	3,57	3,61	3,55	3,59	3,55	3,59	3,54	3,57	3,54	3,57	3,52	3,52	3,49	3,49			
14	3,53	3,68	3,50	3,59	3,48	3,53	3,46	3,51	3,46	3,51	3,45	3,49	3,45	3,49	3,43	3,44	3,40	3,41			
15	3,45	3,61	3,41	3,52	3,39	3,46	3,37	3,44	3,37	3,44	3,36	3,42	3,36	3,42	3,34	3,37	3,31	3,34			
16	3,37	3,55	3,33	3,46	3,31	3,40	3,29	3,37	3,29	3,37	3,28	3,35	3,28	3,35	3,26	3,30	3,23	3,26			
17	3,30	3,50	3,26	3,40	3,23	3,34	3,21	3,31	3,21	3,31	3,20	3,29	3,20	3,29	3,18	3,23	3,16	3,20			
18	3,23	3,44	3,18	3,34	3,16	3,28	3,14	3,25	3,14	3,25	3,13	3,23	3,13	3,23	3,11	3,17	3,09	3,13			
19	3,17	3,39	3,12	3,29	3,09	3,23	3,07	3,19	3,07	3,19	3,06	3,17	3,04	3,17	3,04	3,11	3,02	3,07			
20	3,11	3,35	3,05	3,24	3,03	3,17	3,01	3,14	3,01	3,14	3,00	3,12	2,98	3,05	2,96	3,02	2,96	3,02			
21	3,05	3,30	2,99	3,19	2,97	3,13	2,95	3,09	2,95	3,09	2,94	3,07	2,92	3,00	2,90	2,96	2,90	2,96			
22	3,00	3,26	2,94	3,15	2,91	3,08	2,89	3,04	2,89	3,04	2,88	3,02	2,86	2,85	2,84	2,91	2,84	2,91			
23	2,94	3,22	2,88	3,11	2,85	3,03	2,83	2,99	2,83	2,99	2,82	2,97	2,80	2,90	2,78	2,86	2,78	2,86			
24	2,90	3,18	2,84	3,07	2,80	2,99	2,78	2,95	2,78	2,95	2,77	2,93	2,75	2,86	2,73	2,82	2,73	2,82			
25	2,86	3,14	2,78	3,03	2,76	2,96	2,73	2,91	2,73	2,91	2,72	2,89	2,70	2,82	2,68	2,78	2,68	2,78			
26	2,81	3,11	2,75	2,99	2,71	2,92	2,69	2,88	2,69	2,88	2,68	2,86	2,65	2,71	2,63	2,74	2,63	2,74			
27	2,77	3,08	2,70	2,96	2,67	2,89	2,64	2,84	2,64	2,84	2,63	2,82	2,61	2,75	2,59	2,71	2,59	2,71			
28	2,73	3,05	2,66	2,93	2,62	2,85	2,60	2,81	2,60	2,81	2,59	2,79	2,56	2,71	2,54	2,67	2,54	2,67			
29	2,70	3,02	2,62	2,90	2,58	2,82	2,56	2,78	2,56	2,78	2,55	2,75	2,52	2,68	2,50	2,64	2,50	2,64			
30	2,66	2,99	2,59	2,86	2,54	2,79	2,51	2,75	2,51	2,75	2,50	2,72	2,48	2,64	2,46	2,60	2,46	2,60			
31	2,63	2,96	2,55	2,83	2,50	2,76	2,48	2,72	2,48	2,72	2,47	2,69	2,44	2,61	2,42	2,57	2,42	2,57			
32	2,59	2,93	2,51	2,81	2,47	2,73	2,44	2,69	2,44	2,69	2,43	2,66	2,40	2,58	2,38	2,54	2,38	2,54			
33	2,56	2,90	2,48	2,78	2,43	2,70	2,40	2,66	2,40	2,66	2,39	2,63	2,36	2,55	2,34	2,51	2,34	2,51			
34	2,53	2,88	2,45	2,75	2,40	2,67	2,37	2,63	2,37	2,63	2,36	2,60	2,32	2,52	2,30	2,48	2,30	2,48			

ES: Eixos Simples
ETD: Eixos Tandem Duplos

Fonte: DNIT (2005).

ANEXO F – Fator de Erosão para Eixos Tandem Triplos - JSBT e PSAC (Junta sem barras de transferência e pavimento sem acostamento de concreto)

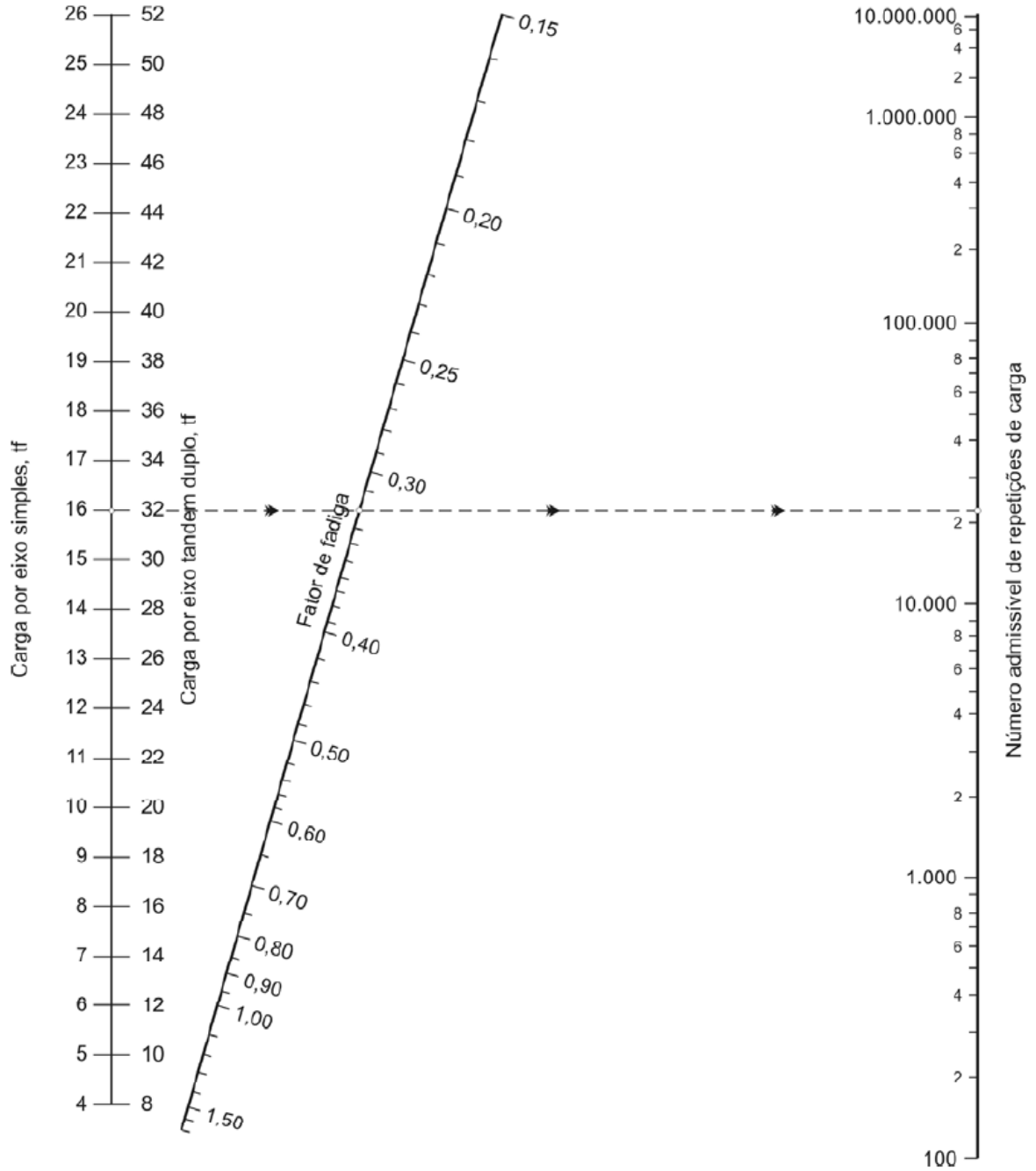
Espessura da Placa (cm)	k - Coeficiente de recalque (MPa/m)						
	20	40	60	80	140	180	
	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT	ETT
12	3,85	3,75	3,70	3,66	3,57	3,53	
13	3,77	3,68	3,62	3,58	3,50	3,45	
14	3,70	3,60	3,55	3,51	3,42	3,38	
15	3,64	3,54	3,48	3,44	3,36	3,32	
16	3,58	3,47	3,42	3,38	3,29	3,25	
17	3,52	3,42	3,36	3,32	3,23	3,19	
18	3,47	3,36	3,30	3,26	3,18	3,14	
19	3,42	3,31	3,25	3,21	3,13	3,09	
20	3,37	3,26	3,20	3,16	3,08	3,04	
21	3,33	3,22	3,16	3,11	3,03	2,99	
22	3,29	3,18	3,11	3,07	2,99	2,95	
23	3,25	3,13	3,07	3,03	2,94	2,91	
24	3,21	3,10	3,03	2,99	2,90	2,86	
25	3,17	3,06	2,99	2,95	2,87	2,83	
26	3,14	3,02	2,96	2,91	2,83	2,79	
27	3,10	2,99	2,92	2,88	2,79	2,75	
28	3,07	2,96	2,89	2,85	2,76	2,72	
29	3,04	2,92	2,86	2,81	2,73	2,69	
30	3,01	2,89	2,83	2,78	2,69	2,65	
31	2,98	2,87	2,80	2,75	2,66	2,62	
32	2,96	2,84	2,77	2,72	2,63	2,59	
33	2,93	2,81	2,74	2,70	2,61	2,57	
34	2,91	2,81	2,72	2,67	2,58	2,54	

ETT: Eixos Tandem Triplos

ETT: Eixos Tandem Triplos

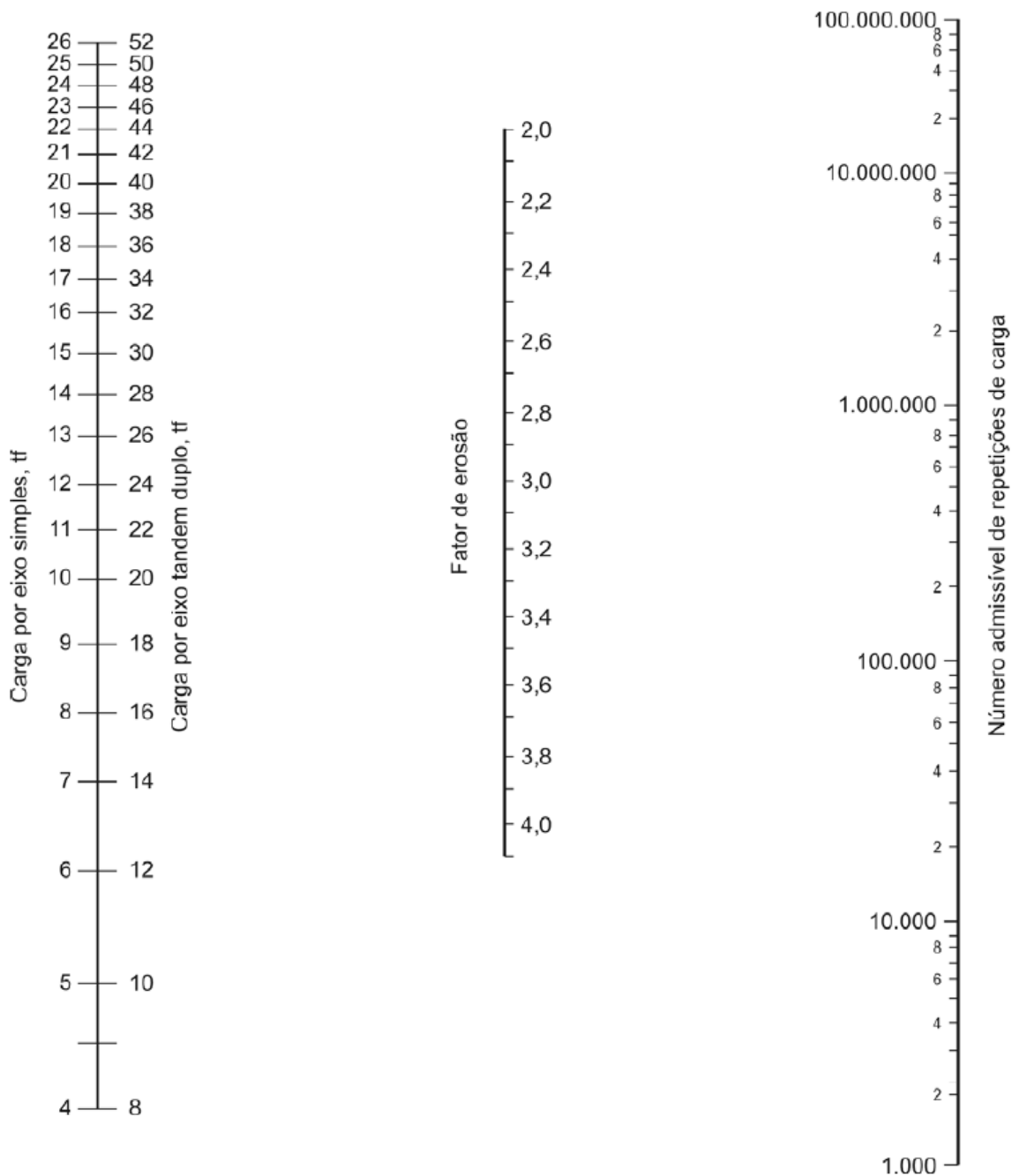
Fonte: DNIT (2005).

ANEXO G – Número de repetições admissíveis em função do fator de fadiga (com ou sem acostamento de concreto) (Análise de fadiga)



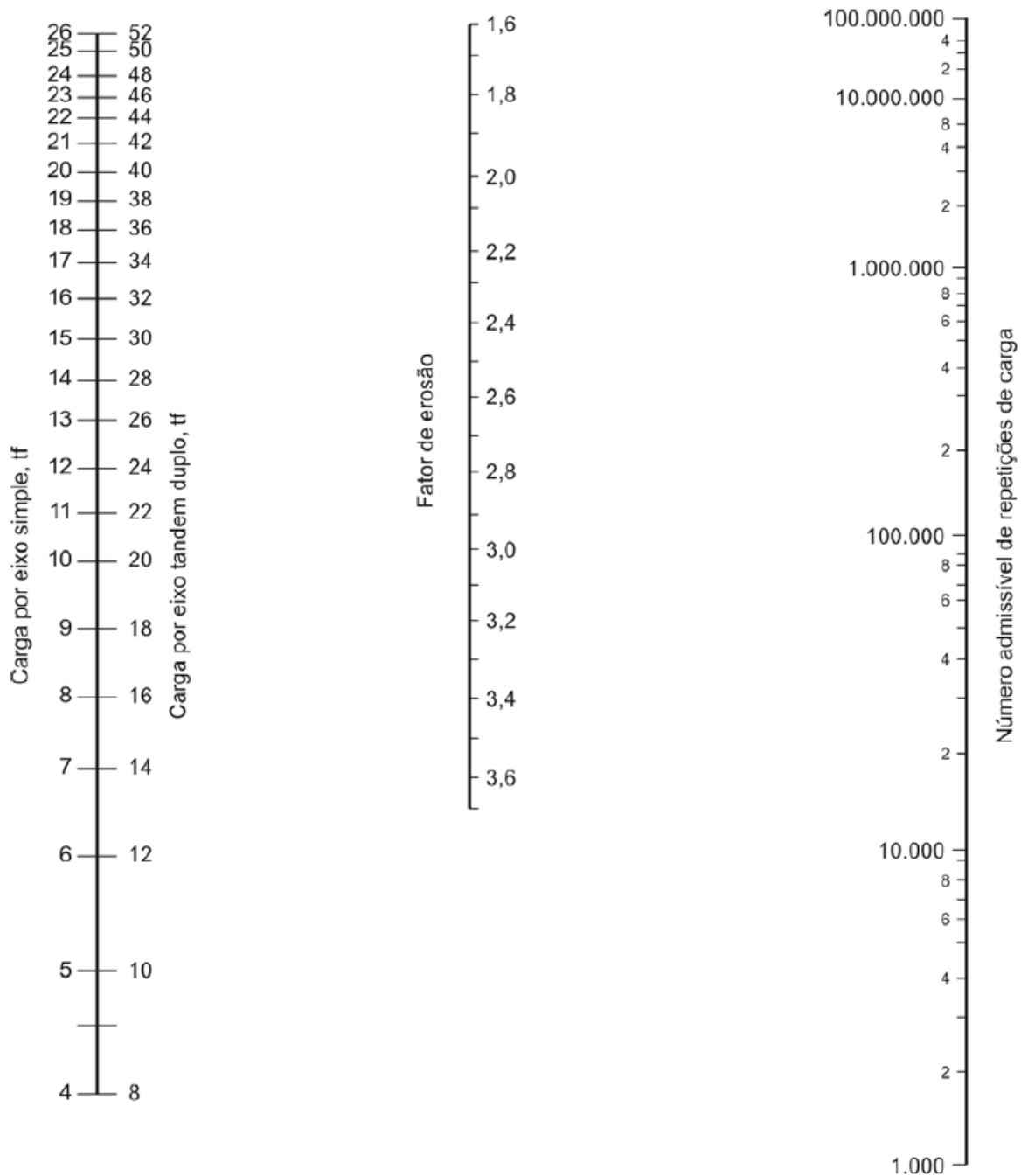
Fonte: DNIT (2005).

ANEXO H - Número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão (sem acostamento de concreto) (Análise de erosão)



Fonte: DNIT (2005).

ANEXO I – Número admissível de repetições de carga com base no fator de erosão
(com acostamento de concreto) (Análise de erosão)



Fonte: DNIT (2005).

ANEXO J – Exemplo de projeto de pavimento rígido pelo PCA de 1984 (Packard e Tayabji, 1985)

Calculation of Pavement Thickness

Project Design 1A, four-lane Interstate, rural

Trial thickness 9.5 in. Doweled joints: yes no

Subbase-subgrade k 130 pci Concrete shoulder: yes no

Modulus of rupture, MR 650 psi Design period 20 years

Load safety factor, LSF 1.2 4-in. untreated subbase

Axle load, kips	Multiplied by LSF <u>1.2</u>	Expected repetitions	Fatigue analysis		Erosion analysis	
			Allowable repetitions	Fatigue, percent	Allowable repetitions	Damage, percent
1	2	3	4	5	6	7

8. Equivalent stress 206 10. Erosion factor 2.59

Single Axles 9. Stress ratio factor 0.317

<u>30</u>	<u>36.0</u>	<u>6,310</u>	<u>27,000</u>	<u>23.3</u>	<u>1,500,000</u>	<u>0.4</u>
<u>28</u>	<u>33.6</u>	<u>14,690</u>	<u>77,000</u>	<u>19.1</u>	<u>2,200,000</u>	<u>0.7</u>
<u>26</u>	<u>31.2</u>	<u>30,140</u>	<u>230,000</u>	<u>13.1</u>	<u>3,500,000</u>	<u>0.9</u>
<u>24</u>	<u>28.8</u>	<u>64,410</u>	<u>1,200,000</u>	<u>5.4</u>	<u>5,900,000</u>	<u>1.1</u>
<u>22</u>	<u>26.4</u>	<u>106,900</u>	<u>Unlimited</u>	<u>0</u>	<u>11,000,000</u>	<u>1.0</u>
<u>20</u>	<u>24.0</u>	<u>235,800</u>	<u>"</u>	<u>0</u>	<u>23,000,000</u>	<u>1.0</u>
<u>18</u>	<u>21.6</u>	<u>307,200</u>	<u>"</u>	<u>0</u>	<u>64,000,000</u>	<u>0.5</u>
<u>16</u>	<u>19.2</u>	<u>422,500</u>			<u>Unlimited</u>	<u>0</u>
<u>14</u>	<u>16.8</u>	<u>586,900</u>			<u>"</u>	<u>0</u>
<u>12</u>	<u>14.4</u>	<u>1,837,000</u>			<u>"</u>	<u>0</u>

11. Equivalent stress 192 13. Erosion factor 2.79

Tandem Axles 12. Stress ratio factor 0.295

<u>52</u>	<u>62.4</u>	<u>21,320</u>	<u>1,100,000</u>	<u>1.9</u>	<u>920,000</u>	<u>2.3</u>	
<u>48</u>	<u>57.6</u>	<u>42,870</u>	<u>Unlimited</u>	<u>0</u>	<u>1,500,000</u>	<u>2.9</u>	
<u>44</u>	<u>52.8</u>	<u>124,900</u>	<u>"</u>	<u>0</u>	<u>2,500,000</u>	<u>5.0</u>	
<u>40</u>	<u>48.0</u>	<u>372,900</u>	<u>"</u>	<u>0</u>	<u>4,600,000</u>	<u>8.1</u>	
<u>36</u>	<u>43.2</u>	<u>885,800</u>			<u>9,500,000</u>	<u>9.3</u>	
<u>32</u>	<u>38.4</u>	<u>930,700</u>			<u>24,000,000</u>	<u>3.9</u>	
<u>28</u>	<u>33.6</u>	<u>1,656,000</u>			<u>92,000,000</u>	<u>1.8</u>	
<u>24</u>	<u>28.8</u>	<u>984,900</u>			<u>Unlimited</u>	<u>0</u>	
<u>20</u>	<u>24.0</u>	<u>1,227,000</u>			<u>"</u>	<u>0</u>	
<u>16</u>	<u>19.2</u>	<u>1,356,000</u>					
Total				<u>62.8</u>	Total		<u>38.9</u>

Fonte: Packard e Tayabji (1985).

ANEXO K – Exemplo de projeto de pavimento rígido pelo AUSTROADS de 2010

GUIDE TO PAVEMENT TECHNOLOGY PART 2: PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN

Table L.2 (Page 1 of 3)
RIGID PAVEMENT BASE THICKNESS DESIGN CALCULATION

Project: Plain concrete pavement design example

Fonte:

Traffic load distribution	Table F.3 Urban	Characteristic (28-day) flexural strength f_{ct}	4.5 MPa
CRC/dowelled joints	FALSE	Subgrade CBR	5 %
Concrete shoulder	TRUE	Subbase thickness	150 mm
Design period	40 years	Subbase type	LMC
Design traffic	40,000,000 HV axle groups	Effective subgrade CBR	75 %
Load Safety Factor L_{SF}	1.30	Trial base thickness	210 mm

SINGLE AXLE/SINGLE TYRE (SAST)

Equivalent stress 0.75 Erosion factor 1.86

Axle group load (kN)	Design load (kN)	Expected repetitions	Fatigue analysis		Erosion analysis	
			Allowable repetitions	Damage (%)	Allowable repetitions	Damage (%)
130	169.0	2,735	2,974	91.96	162,052	1.69
120	156.0	2,735	11,812	23.15	269,239	1.02

QUAD-AXLE/DUAL TYRES (QADT)

Equivalent stress 0.73 Erosion factor 2.45

Axle group load (kN)	Design load (kN)	Expected repetitions	Fatigue analysis		Erosion analysis	
			Allowable repetitions	Damage (%)	Allowable repetitions	Damage (%)
300	390.0	0	Unlimited	0.00	1,114,927	0.00
290	377.0	0	Unlimited	0.00	1,475,874	0.00
280	364.0	0	Unlimited	0.00	2,011,238	0.00
270	351.0	0	Unlimited	0.00	2,845,859	0.00
260	338.0	0	Unlimited	0.00	4,236,980	0.00
250	325.0	0	Unlimited	0.00	6,786,246	0.00
240	312.0	0	Unlimited	0.00	12,191,794	0.00
230	299.0	0	Unlimited	0.00	27,021,679	0.00
220	286.0	0	Unlimited	0.00	101,961,571	0.00
210	273.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00
200	260.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00
190	247.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00
180	234.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00
170	221.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00
160	208.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00
150	195.0	0	Unlimited	0.00	Unlimited	0.00
			Total fatigue %	125.4	Total erosion %	119.3

ANEXO L – Exemplo de projeto de pavimento rígido pelo PCA de 1984 (DNIT, 2005)

Espessura-tentativa (cm)	25,0		
Sub-base de brita tratada com cimento, espessura (cm)	12,0		
Ksb (MPa/m)	100		
Fator de segurança de cargas (Fsc)	1,2		
Resistência característica à tração na flexão (Mpa)	4,8		
Período do projeto (anos)	20	Sim	Não
Acostamento de concreto			X
Juntas com barras de transferência			X

Cargas por eixo (tf)	Cargas por eixo x Fsc (tf)	Nº de repetições previstas	ANÁLISE DE FADIGA		ANÁLISE DE EROSIÃO	
			Nº de repetições admissíveis	Consumo de fadiga (%)	Nº de repetições admissíveis	Danos por erosão (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Eixo Simples			(8) Tensão Equivalente			1,14
			(9) Fator de Fadiga			0,238
			(10) Fator de Erosão			2,72
< 5	6,0	3.270.843	ilimitado	-	ilimitado	-
5 - 6	7,2	203.804	ilimitado	-	ilimitado	-
6 - 7	8,4	290.488	ilimitado	-	ilimitado	-
7 - 8	9,6	238.118	ilimitado	-	20.000.000	1,19
8 - 9	10,8	242.715	ilimitado	-	8.000.000	3,03
9 - 10	12,0	310.404	ilimitado	-	4.000.000	7,76
10 - 11	13,2	282.267	ilimitado	-	2.400.000	11,76
11 - 12	14,4	242.438	ilimitado	-	1.400.000	17,32
12 - 13	15,6	206.645	ilimitado	-	900.000	22,96
13 - 14	16,8	65.889	2.000.000	3,29	550.000	11,98
14 - 15	18,0	39.296	400.000	9,82	390.000	10,08
15 - 16	19,2	5.565	140.000	3,98	240.000	2,32
Eixos Tandem Duplos			(11) Tensão Equivalente			0,99
			(12) Fator de Fadiga			0,206
			(13) Fator de Erosão			2,89
< 13	15,6	182.532	ilimitado	-	18.000.000	1,01
13 - 14	16,8	5.565	ilimitado	-	8.000.000	0,07
14 - 15	18,0	12.243	ilimitado	-	7.000.000	0,17
15 - 16	19,2	12.243	ilimitado	-	4.000.000	0,31
16 - 17	20,4	17.808	ilimitado	-	2.900.000	0,61
17 - 18	21,6	30.051	ilimitado	-	1.900.000	1,58
18 - 19	22,8	23.373	ilimitado	-	1.500.000	1,56
19 - 20	24,0	17.808	ilimitado	-	1.300.000	1,37
20 - 21	25,2	17.808	ilimitado	-	900.000	1,98
21 - 22	26,4	12.243	ilimitado	-	610.000	2,01
22 - 23	27,6	5.565	ilimitado	-	510.000	1,09
23 - 24	28,8	5.565	ilimitado	-	410.000	1,36
Eixos Tandem Triplos			(14) Tensão Equivalente			0,73
			(15) Fator de Fadiga			0,151
			(16) Fator de Erosão			2,92
< 24	9,6	30.051	ilimitado	-	3.500.000	0,86
24 - 26	10,4	17.808	ilimitado	-	2.100.000	0,85
26 - 28	11,2	12.243	ilimitado	-	1.500.000	0,82
28 - 30	12,0	18.921	ilimitado	-	900.000	2,10
TOTAL (%)				17,09	TOTAL (%)	106,15

Fonte: DNIT (2005).