



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RUBENS FEITOSA MATIAS

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE PAVIMENTO RÍGIDO E PAVIMENTO FLEXÍ-
VEL CONSIDERANDO DIMENSIONAMENTO E CUSTOS**

FORTALEZA

2022

RUBENS FEITOSA MATIAS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE RÍGIDO E PAVIMENTO FLEXÍVEL CONSIDERANDO DIMENSIONAMENTO E CUSTOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, D. Sc.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M38r Matias, Rubens Feitosa.

Revisão bibliográfica sobre pavimento rígido e pavimento flexível considerando dimensionamento e custos / Rubens Feitosa Matias. – 2022.

98 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.

1. Pavimentos rígidos. 2. Pavimentos flexíveis. 3. Dimensionamento. I. Título.

CDD 620

RUBENS FEITOSA MATIAS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE PAVIMENTO RÍGIDO E PAVIMENTO FLEXÍ-
VEL CONSIDERANDO DIMENSIONAMENTO E CUSTOS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em 06/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Engenheiro Webert Brasil Cirilo da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Francisco Rubens e Ruth.

À minha esposa, Larissa.

À minha irmã, Raquel.

AGRADECIMENTOS

À Deus, principalmente, por ter me colocado em minha família e me dado os amigos e pessoas queridas que me acompanham. Agradeço também aos meus pais, Francisco Rubens e Ruth, por todo o ensinamento que me deram.

À minha irmã, Raquel, pelo modelo de pessoa que foi para mim e pelo suporte prestado, mesmo a distância.

À minha esposa, Larissa, por ter me incentivado, compreendido e apoiado durante todos os nossos anos juntos.

Ao Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral, pela excelente orientação e exemplo.

A todos os meus amigos que, mantendo ou não contato, contribuíram de alguma maneira para minha formação como engenheiro e como pessoa.

RESUMO

O pavimento rodoviário no Brasil divide-se principalmente entre rígido e flexível, que diferem quanto aos materiais utilizados, camadas de base, tipo de custo, dimensionamento e eficiência para os diferentes tipos de tráfego. Determinar em quais situações deve-se optar por cada tipo de pavimento influencia diretamente no custo de realização e de manutenção da via e, portanto, em sua viabilidade. Este trabalho é uma revisão bibliográfica sobre estes dois tipos mais comuns de pavimento: o pavimento rígido de concreto de cimento Portland e o pavimento flexível de concreto asfáltico. Foi apresentada parte da história dos pavimentos, bem como a definição desta estrutura e dos materiais utilizados para suas camadas. Os dois tipos de pavimento foram descritos, bem como suas diversas variações e aplicações. Os métodos de dimensionamento DNER (1981) e PCA (1984) foram apresentados para a modelagem dos pavimentos flexível e rígido, respectivamente. Por fim, foi realizada uma comparação econômica entre os dois tipos de pavimento.

Palavras-chave: pavimentos rígidos; pavimentos flexíveis; dimensionamento.

ABSTRACT

Road pavement in Brazil is mainly divided between rigid and flexible, which differ in terms of materials used, base layers, type of cost, dimensioning and efficiency for different types of traffic. Determining in which situations each type of pavement should be chosen has a direct influence on the construction and maintenance cost of the road and, therefore, on its viability. This work is a literature review on these two most common types of pavement: the rigid Portland cement concrete pavement and the flexible asphalt concrete pavement. Part of the history of the pavements was presented, as well as the definition of this structure and the materials used for its layers. The two types of pavement were described, as well as their multiples variations and applications. The dimensioning methods DNER (1981) and PCA (1984) were presented for the modeling of flexible and rigid pavements, respectively. Finally, an economic comparison was made between the two types of pavement.

Keywords: rigid pavements; flexible pavements; dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz De Transportes do Brasil.....	15
Figura 2 – Via Appia Antica.....	18
Figura 3 - Esquema Estrutural das Estradas Romanas.....	19
Figura 4 – Método de MacAdam.....	21
Figura 5 – Estrada do Mar.	23
Figura 6 – Calçada de Lorena.....	24
Figura 7 – Seção Típica de Pavimento na Calçada de Lorena.....	24
Figura 8 – Caminho do Ouro.....	25
Figura 9 – Estrada União e Indústria.....	26
Figura 10 – Camadas de um Pavimento.....	28
Figura 11 – Comparação entre Camadas: Pavimento Flexível X Pavimento Rígido.	30
Figura 12- Curvas Granulométricas.	35
Figura 13 - Fórmula Estrutural dos Componentes do Asfalto.	39
Figura 14 – Esquema das Micelas de Asfalto.	40
Figura 15 – Viscosímetro de Saybolt-Furol.	42
Figura 16 – Comparativo da Consistência entre Asfalto Convencional e Asfalto Borracha. .	44
Figura 17 – Esquema da Mistura do Asfalto Espuma.....	46
Figura 18 – Ilustração do PCS.	50
Figura 19 – Ilustração do PCA.	51
Figura 20 – Ilustração do PCPRO.....	52
Figura 21 – Aplicação de Whitetopping.....	53
Figura 22 – Tipos de Revestimentos Asfálticos.....	56
Figura 23 – Comparação entre Trechos com CPA e CA.....	59
Figura 24 – Detalhe da Superfície de um Pavimento com SMA.....	59
Figura 25 – Esquema de Tratamento Superficial.	62
Figura 26 – Tipos de Eixo.	64
Figura 27 – Eixo Padrão Rodoviário.	65
Figura 28 – Fator de Equivalência de Operações por Eixo.	67
Figura 29 – Espessuras Mínimas para o Revestimento a Partir do N.	68
Figura 30 – Espessura Equivalente x N.	69
Figura 31 – Posição Crítica do Eixo conforme PCA (1966).....	71
Figura 32 – Posição Crítica do Eixo conforme PCA (1984).....	71
Figura 33 – Critério de Fadiga.	72
Figura 34 – Quadro de Dimensionamento conforme Método PCA (1984).....	74

Figura 35 – Custos associados a um Pavimento.	77
Figura 36 – 1º Pavimento Tipo: Pavimento Flexível.....	79
Figura 37 – 2º Pavimento Tipo: Pavimento Rígido.....	79
Figura 38 – 3º Pavimento Tipo: Pavimento Rígido.....	79
Figura 39 – Representação das Cargas nos Pavimentos.	87
Figura A.1 – Ábaco de Fadiga	94
Figura A.2 – Número Admissível de Repetições em Função do Fator de Erosão – com acostamento de Concreto.....	95
Figura A.3 – Número Admissível de Repetições em Função do Fator De Erosão – sem acostamento de Concreto.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do Concreto e Sua Influência nos Pavimentos Rígidos.....	32
Tabela 2 – Tipos de Rocha Usados como Fonte de Agregados.	34
Tabela 3 – Dimensões das Peneiras Nominais.....	35
Tabela 4 – Especificação para Agregados Graúdos para Concreto.....	36
Tabela 5 – Especificação Para Agregados Miúdos para Concreto.....	37
Tabela 6 – Composição do Asfalto de Fontes Diferentes.....	39
Tabela 7 – Critérios Materiais Destinado as Camadas Inferiores do Pavimento	48
Tabela 8 – Comparação entre Misturas a Quente e a Frio.....	56
Tabela 9 – Granulometria do Agregado para Concreto Asfáltico.	57
Tabela 10 – Granulometria do Agregado para Concreto Asfáltico Denso	58
Tabela 11 – Granulometria do Agregado para AAUQ.	60
Tabela 12 – Granulometria do Agregado para Pré-Misturados a Frio.	61
Tabela 13 – Fec para cada Tipo de Eixo.....	66
Tabela 14 – Valor do Coeficiente de Equivalência Estrutural por Tipo de Material.....	68
Tabela 15 – Coeficiente de Recalque X CBR (ou ISC).	73
Tabela 16 – Fatores de Segurança para as Cargas.....	75
Tabela 17 – Limites Legais de Carga e Tipos de Veículo	78
Tabela 18 – Classificação e Composição dos Tráfegos.....	78
Tabela 19 – Custos de Construção para Pavimentos Flexíveis DNER (1991)	80
Tabela 20 – Custos de Construção para Pavimentos Rígidos PCA (1984)	80
Tabela 21 – Custos Totais. Período de Projeto 10 anos	81
Tabela 22 – Custos Totais sem Manutenção e Reabilitação. Período de Projeto 10 anos...	81
Tabela 23 – Custos Totais. Período de Projeto 30 anos.	82
Tabela 24 – Custos Totais sem Manutenção e Reabilitação. Período de Projeto 30 anos...	82
Tabela 25 – Condições de Tráfego. Pavimento Flexível.	83
Tabela 26 – Condições de Tráfego. Pavimento Rígido.	84
Tabela 27 – Dimensionamento das Camadas dos Pavimentos	84
Tabela 28 – Custos de Construção para Pavimentos	84
Tabela 29 – Custos de Manutenção ano a ano.....	85
Tabela 30 – Características Comparadas dos Tipos de Pavimento.	86
Tabela A.1 – Tensão Equivalente - sem Acostamento de Concreto.....	96
Tabela A.2 – Tensão Equivalente - com acostamento de concreto.....	96
Tabela A.3 – Fator de Erosão - sem Acostamento e sem Barra de Transferência.....	97
Tabela A.4 – Fator de Erosão - sem Acostamento e com Barra de Transferência.....	97

Tabela A.5 – Fator de Erosão - com Acostamento e sem Barra de Transferência.....	98
Tabela A.6 – Fator de Erosão - com Acostamento e com Barra de Transferência.....	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos.....	17
2	HISTÓRIA DAS VIAS E DA PAVIMENTAÇÃO.....	18
2.1	História Mundial	18
2.2	História Da Pavimentação No Brasil.....	23
3	PAVIMENTO E SUAS CAMADAS	27
3.1	Definição e Função do Pavimento	27
3.2	Camadas do Pavimento.....	27
3.2.1	Subleito	28
3.2.2	Sub Base.....	29
3.2.3	Base	29
3.2.4	Revestimento	29
4	MATERIAIS CONSTITUINTES DO PAVIMENTO	31
4.1	Concreto de Cimento Portland.....	31
4.1.1	<i>Controle das Propriedades do Concreto para Pavimentação.....</i>	<i>31</i>
4.1.2	<i>Cimento Portland</i>	<i>33</i>
4.2	Agregados	33
4.3	Asfalto	38
4.3.1	<i>Definições e Composição</i>	<i>38</i>

4.3.2	<i>Tipos De Asfalto</i>	41
4.2.2.1	<i>Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)</i>	41
4.2.2.2	<i>Asfalto modificado por polímero</i>	43
4.2.2.3	<i>Asfalto-borracha</i>	43
4.2.2.4	<i>Emulsão Asfáltica</i>	44
4.2.2.5	<i>Asfalto Diluído (ADP)</i>	45
4.2.2.6	<i>Asfalto Espuma</i>	45
4.4	Solo E Materias Para Camadas De Base, Sub Base E Subleito	46
5	PAVIMENTO DE CONCRETO	49
5.1	Tipos de pavimentos de concreto de cimento Portland	49
5.1.1	<i>Pavimento de Concreto Simples (PCS)</i>	49
5.1.2	<i>Pavimento de Concreto Armado (PCA)</i>	50
5.1.3	<i>Pavimento de Concreto Compactado a Rolo (CCR)</i>	51
5.1.4	<i>Pavimento de Concreto Protendido (PCPRO)</i>	51
5.1.5	<i>Pavimento de Concreto pré-moldado (PCPM)</i>	52
5.1.6	<i>Whitetopping (WT)</i>	53
5.1.7	<i>Whitetopping Ultradelado (WTUD)</i>	53
6	PAVIMENTO ASFÁLTICO	55
6.1	Misturas Quentes	56
6.1.1	<i>Concreto Asfáltico Denso</i>	57
6.1.2	<i>Camada Porosa De Atrito</i>	58

6.1.3	<i>Matriz Pétrea Asfáltica ou Stone Matrix Asphalt</i>	59
6.1.4	<i>Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ)</i>	60
6.2	Misturas frias.....	60
6.3	Tratamentos Superficiais	61
7	DIMENSIONAMENTO	63
7.1	Tráfego	63
7.2	Pavimento Asfáltico	65
7.2.1	<i>Método DNER (1981)</i>	65
7.2.2	<i>Método MeDiNa</i>	70
7.3	Pavimento De Concreto.....	70
8	COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS RÍGIDO E FLEXÍVEL.....	76
8.1	Estudo de Biroli (2003)	77
8.2	Estudo de Cavalet, Luvizão, Nienov e Zampieri (2019).....	83
8.3	Outros estudos.....	85
8.3.1	<i>Costa (2013)</i>	85
8.3.2	<i>Dal Pra Vasata e Júnior (2013)</i>	86
8.3.3	<i>Araújo, Santos, Pinheiro e Cruz (2016)</i>	87
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	88
9.1	Conclusão	88
9.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	89
	REFERÊNCIAS.....	90

ANEXO.....	94
ANEXO A	94
ANEXO B	96

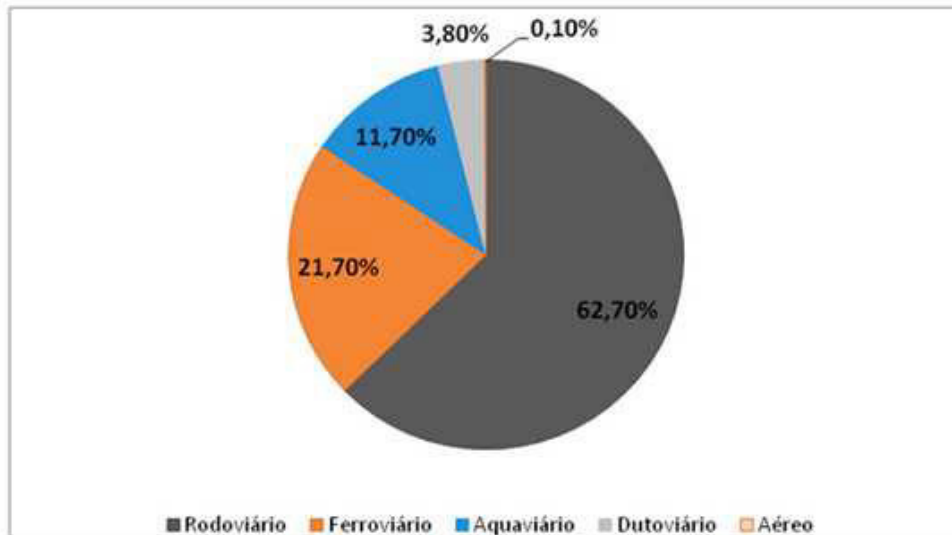
1 INTRODUÇÃO

Conforme Albano (S.I.), durante milênios, o homem só dispunha dos meios físicos e dos que a natureza fornecia para se deslocar ou transportar objetos. Posteriormente foram utilizados animais para carga e depois foi inventada a roda. Já no século XVIII, com a invenção da máquina à vapor, surgiram os primeiros meios mecânicos de transporte, marítimos e ferroviários.

De acordo com Albano (S.I.), ainda por um século, as ferrovias cresceram e se expandiram sem possibilidade de competição até o aparecimento dos veículos motores, no início do século XX. Lins e Filho (2011) afirmam que as circunstâncias às quais as vias eram expostas no passado eram mais amenas e que, com o desenvolvimento das civilizações, a intensidade de escoamento nas vias aumentou, conclui-se que a locomoção sempre apareceu como ferramenta aliada ao processo de desenvolvimento.

Entretanto, os tipos de transporte são diversos e as vias não são mais apenas por terra, existem os meios rodoviário, ferroviário, aquaviário, aéreo e entre outros. No Brasil, segundo o ILOS - Instituto de Logística e Supply Chain (2010), o modal rodoviário constou como o mais representativo, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Matriz de transportes do Brasil.



Fonte: ILOS (2010) *apud* Costa (2013)

No Brasil, há cerca de 1,3 milhões de quilômetros de vias não pavimentadas de um total de 1,72 milhões de quilômetros de vias, de acordo com o CNT - Confederação Nacional de Transportes (2019). Conforme Bezerra (2021), o crescimento do Brasil é correlacionado à expansão e melhoria do sistema rodoviário, já que é o

modal mais significativo em um país continental e com diversos setores importantes da economia interdependentes e que estão há distâncias consideráveis entre si.

O rápido crescimento da frota de veículos gera uma necessidade de reabilitação ou mesmo construção de novas vias para suportar o tráfego não previsto e tem-se o conhecimento técnico para realizar a pavimentação de parte destas vias.

Araújo *et al.* (2016) apontam que a viabilidade econômica é o principal problema para a execução e conclusão dos pavimentos, visto que tem-se o conhecimento técnico para realizar a pavimentação de parte dessas vias.

“São diversas as razões para o uso intensivo do asfalto em pavimentação. O concreto asfáltico proporciona forte união dos agregados, permite flexibilidade controlável, é impermeável, de fácil aplicação e manuseio quando aquecido. Já as vantagens da pavimentação em concreto é a grande resistência a deformações, distribuição eficaz das tensões, maior resistência à abrasão, alta aderência do pneu, ótima refletividade (ideal para condução noturna), alta taxa de segurança (menor risco de aquaplanagem, por ter melhor aderência) e alta vida útil, sendo de aproximadamente 30 anos, mais que o dobro do pavimento asfáltico. O pavimento rígido em concreto também sofrerá menos intervenções de manutenção ao longo de sua vida útil.” (ARAUJO *et al.*, 2016, p.2).

Dadas as características próprias de cada tipo de via rodoviária, as especificidades do projeto, da região e dos materiais disponíveis, o tipo correto de pavimento, rígido ou flexível deve ser escolhido a partir das limitações do projeto como escolha ótima, do ponto de vista econômico.

1.1 Justificativa

Somado o problema da falta de pavimentação em 80% das vias, conforme supracitado, tem-se também os gastos com a manutenção das estradas já pavimentadas e a qualidade desses pavimentos.

Bernucci *et al.* (2008) estimam que sejam gastos 1 a 2 bilhões anualmente com manutenção das rodovias federais e acredita que sejam necessários 10 bilhões de reais para recuperação de toda malha viária federal. Os autores afirmam ainda que, há décadas, o investimento em infraestrutura rodoviária se encontra aquém das necessidades do país. Além disso, o setor produtivo está insatisfeito com a situação, que torna o Brasil pouco competitivo no mercado exterior. Ainda segundo Geipot (2001) *apud* Bernucci *et al.* (2008), pelo modal rodoviário, circulam 96% dos passageiros.

De acordo com o IPSOS (2018), a malha viária brasileira apresenta índice de satisfação (condições boas ou excelentes) bem abaixo da média global, apresentando 22% de satisfação para rodovias e 25% para vias locais contra as médias globais de 50% e 41%, respectivamente.

Dos cerca de 20% de rodovias brasileiras pavimentadas, a maioria é de pavimento flexível, seja pela cultura ou pelo baixo custo de implantação, comparado ao pavimento rígido. Contudo é necessária uma avaliação de que tipo de pavimentação utilizar, tanto na restauração das estradas existente, bem como na construção de novas estradas

Há, portanto, a importância de uma comparação entre os tipos de pavimentação visando escolher qual opção para tráfegos de rodovias, para um resultado ótimo para a malha rodoviária e uma melhoria tanto para o setor produtivo, como para o transporte de passageiros.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é a realização de uma revisão bibliográfica sobre pavimento rígido de concreto simples e pavimento flexível de concreto asfáltico.

Os Objetivos específicos deste trabalho são:

- Apresentar um resumo histórico da pavimentação, seu desenvolvimento e papel imprescindível na evolução das cidades e vida urbana;
- Fazer uma revisão bibliográfica sobre o pavimento, suas camadas e os seus materiais constituintes;
- Fazer uma revisão acerca dos tipos de pavimentos de concreto e de pavimento asfáltico;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os métodos de dimensionamento DNER/81 para pavimentos asfálticos e PCA/84 para pavimentos de concreto;
- Fazer um estudo comparativo de custos entre pavimento de concreto e pavimento asfáltico.

2 HISTÓRIA DAS VIAS E DA PAVIMENTAÇÃO

2.1 História Mundial

A pavimentação tem valor imprescindível à sociedade, pois historicamente acompanha o desenvolvimento da humanidade que se expandiu surgindo a necessidade de vias para facilitar o transporte entre povoados. Embora houvessem vias construídas para a construção das pirâmides no Egito em 2600-2400 a.c., Cruz (2003) *apud* Silva *et al.* (2011), discorrem que os Etruscos, povo que dominou a região que hoje é a Itália entre 800 a.c. e 350 a.c., foram os primeiros a construir caminhos com a finalidade de transporte de pessoas e cargas entre vilas. Esse conhecimento foi herdado pelos romanos, que desenvolveram um sistema de pavimentação para suas vias, nos quais utilizavam pedra natural unida por aglomerantes hidráulico ou pozolânico, para escoar mercadorias e conduzir seus exércitos com rapidez.

Conforme Cava (2019), os romanos foram os que aperfeiçoaram as estradas criando o que hoje é conhecido como pavimentação e dentre as primeiras vias pavimentadas pelos romanos tem-se a Via Appia Antica, construída em 312 a.C. e que recebeu o nome de seu criador, Áppius Claudius Caecus. Na Figura 2 abaixo, detalhe da Via Appia Antica.

Figura 2 – Via Appia Antica.

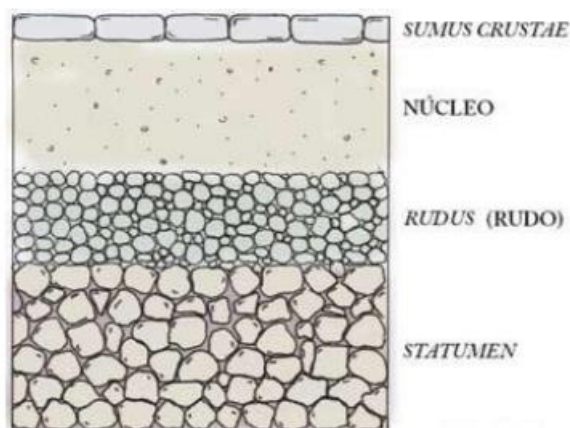


Fonte: Cava (2019)

De acordo com Corini (1947) *apud* Balbo (2007), o processo para a pavimentação das grandes estradas romanas, conforme apresentado no detalhe da Figura 3, tinha as seguintes etapas:

- Preparação do terreno natural: os terrenos eram escavados a ser encontrado material duro ou consistente.
- *Stratumen*: após compactação do solo de fundação, era executado um lastro de pedra de 10 a 30 cm, dependendo do terreno e importância da via.
- *Indus* ou *Rudus*: sobre o *stratumen* era executada uma camada de mistura de pedras, fragmentos de tijolo e ladrilhos, além de pedaços de ferro, aglomerados por uma pasta de cal, argila e pozolana. A camada tinha de 25cm a 30cm.
- *Nucleus*: camada composta de pedras de baixa granulometria misturadas com uma pasta semelhante à usada no *indus*. O material era compactado e a espessura final variava entre 30cm e 50cm.
- *Summa crusta*: em vias de grande importância, a camada de revestimento constituía-se de rochas, geralmente calcário, cortadas e justapostas.

Figura 3 - Esquema estrutural das estradas romanas.



Fonte: Maré (2011)

As vias romanas eram otimizadas ao uso, daí nota-se certa variação nas espessuras de cada camada do pavimento. Balbo (2007) menciona que os construtores a serviço de Roma eram obrigados a otimizar o uso dos materiais das regiões próximas, o que indicava que a necessidade do uso de jazidas próximas com a finalidade de extração de materiais para a pavimentação já era um conceito da arquitetura de Roma.

O sistema de transporte romano era constituído de uma enorme malha e suas vias eram, conforme Maré (2011), classificadas conforme sua importância. As principais vias do Império eram as vias Públicas do Estado (*viae publicae*) que uniam as principais cidades, também chamadas de vias pretorianas (*viae praetoriae*), vias militares (*viae militare*) ou vias consulares (*viae consular*), havia as *viae vicinales* que, partindo das vias públicas se ligavam as povoações e as vias privadas (*viae privatae*) que uniam as principais propriedades (*villae*) as *viae vicinales* das vias locais.

De acordo com Balbo (2007), a Idade Média foi um período que, devido ao isolamento social e político das regiões do continente europeu, as vias romanas foram abandonadas. Entretanto as vias Asiáticas passaram a ser mais utilizadas devido ao comércio e à influência cultural. A estrada da Seda que existia com o propósito do comércio de diversos bens, como ouro, marfim, animais e plantas exóticas, além da seda, teve seu apogeu em torno de 600 d.C. e após um declínio voltou a ser importante durante o surgimento do Império Mongol por volta de 1200 d.C., conforme Bernucci *et al* (2008).

Com o fim da Idade média, foi voltando o interesse pelo desenvolvimento de estrada. Havia inclusive leis sobre o fluxo de carruagens dentro das cidades. Carpenter e Whittington (2007) *apud* Gondim (2014) explicam que, devido às ruas estreitas de Londres, a passagem de carruagens e cavalos sempre representava perigo para pedestres e que haviam regras e punições impostas pelo Liber Albus para o trânsito de veículos e controle de velocidade. Fato é que segundo os mesmos autores, já em 1720, os atropelamentos eram a principal causa de morte em Londres, mas segundo Albano (SI), apenas em 1868 foi construído o primeiro semáforo que se tem notícia com as cores vermelho e verde.

Conforme Maré (2011), as estradas na Idade média e até o início do século XIX, eram poucas, estreitas e de terra batida, sendo no máximo ladrilhadas nos centros urbanos. Porém, na primeira metade do século XIX, passa a ser introduzido o método de Mc-Adam, apresentado na ilustração da Figura 4, que foi amplamente aceito conforme mostra a citação a seguir.

“Em finais da primeira metade do século XIX, passa a ser introduzido o método Mac-Adam na construção de todas as estradas em Portugal. Este método foi desenvolvido pelo engenheiro escocês John Loudon McAdam, por volta de 1820. Processo que recebeu o nome de Macadame, em homenagem ao seu criador e que consistia em assentar três camadas de brita, gradualmente mais pequenas, numa fundação com valas laterais para a drenagem da água da chuva. O tamanho

das britas utilizadas na primeira camada era de 3 polegadas (75 milímetros), na segunda era de 2 polegadas (50 milímetros) e na terceira e última camada eram utilizadas britas de 1 polegada (25 milímetros). Os vazios de cada camada eram preenchidos com saibro (este procedimento denominava-se ensaibramento) e cada camada era comprimida por um rolo pesado, fazendo com que as pedras se encaixassem umas nas outras. Este método necessitava de muito trabalho manual, mas resultava num pavimento forte e drenado denominado de “macadame hidráulico” (MARÉ, 2011, p.34-35).

Figura 4 – Método de MacAdam.



Fonte: Maré (2011)

De acordo com Balbo (2007), com o crescente número de veículos traçados no final do século XIX, surgiram problemas da utilização unicamente de camadas granulares, de modo que o primeiro pavimento de concreto foi feito ainda no século XIX. Balbo (2009) admite que, embora Corini (1947) afirme ter sido na cidade de Grenoble, nos Alpes franceses, nem a prefeitura da cidade sabe sobre este pavimento e fazendo com que, para o autor, o primeiro pavimento de concreto tenha sido construído na *Main Street* em Ohio no ano de 1891.

“No início de o século XX, como já foi referido anteriormente, pretendia-se construir pavimentos que apresentassem uma superfície dura e regular, constituídos por materiais com grande coesão e bastante resistentes. Nessa altura, os pavimentos eram então construídos de três formas diferentes:

- Empedrado: que consistia em camadas de pedra miúda britada ou seixo rolado, regularizadas e consolidadas com saibro e compactadas com um cilindro, assentes sobre um leito ou caixa aberta no terreno;
- Calçada: que consistia numa camada de pedras talhadas em formas regulares ou irregulares, assentes

à mão, apertadas umas contra as outras e com as juntas preenchidas com areia (pouco usado em estradas ordinárias, mas com bastante uso em estradas de pequena extensão dentro das povoações);

- Madeira, betão e asfalto: de uso exclusivamente urbano.” (MARÉ, 2011, p. 35)

“O carro a motor ainda é raro até 1907, quando é produzido o modelo “T” da Ford nos Estados Unidos da América. A sua entrada no mercado impulsiona a demanda por melhor pavimentação das vias americanas que, em 1904, contavam com apenas 7% de seus trajetos revestidos com pedras ou cascalho” (SOUTHWORTH e BEN-JOSEPH, 2003, p. 64 *apud* GONDIM, 2014, p. 215).

“Em Bruxelas, no ano de 1910, realizou-se o II Congresso Internacional de Estradas, com o objetivo de resolver os problemas decorrentes nas estradas devido à circulação dos veículos com motor. Quanto às fundações, os delegados dos Estados Unidos apresentaram quatro categorias diferentes conforme o modo de as executar, constituindo cada uma delas bases sólidas para a camada de macadame:

- Macadame assente diretamente na terra natural;
- Macadame assente em blocos de pedra, mais conhecidas por fundações Telford;
- Betão de cimento com cerca de 20 centímetros, considerada a melhor fundação;
- Materiais diversos, tais como escórias e pedra britada.” (MARÉ, 2011, p. 36)

Segundo Balbo (2007), em 1890 os pavimentos de concreto iniciaram de maneira efetiva na Alemanha e, a partir de 1909, nos Estados Unidos, país este que já produzia, desde o início do século XX, asfalto para aplicação em pavimentos.

De acordo com Maré (2011), na França, bem como em Portugal, era utilizado em 1930 o pavimento flexível de betume. Balbo (2009) explica que, nesse período, na Alemanha, estavam sendo planejados 6400km de autoestradas de concreto e que, na Suíça, a produção de pavimento de concreto seguiu firme até 1960, sendo os engenheiros da Suíça, que ficou neutra na Segunda-Guerra mundial, responsáveis por auxiliar outros países na reconstrução pós-guerra.

Balbo (2009) ainda afirma que a maior escola de pavimentação em concreto foi a americana, já que os EUA, até 1925, já possuía 70 mil km de rodovias em concreto, número muito acima, talvez de todos os países europeus ocidentais. Vale

ressaltar ainda que, nos EUA, haviam pelo menos três instituições que operavam de forma colaborativa para a produção e disseminação de especificações para a construção de rodovias: o *Bureau of Public Roads*, a *American Association of State Highway Officials* e o *Highway Research Board*.

2.2 História Da Pavimentação No Brasil

“Uma das primeiras estradas teve seu início em 1560 durante o governo de Mem de Sá. Era um caminho feito para ligar São Vicente ao Planalto Piratininga. Após 1661, em que foi recuperado, recebeu o nome de Estrada do Mar. Hoje é conhecida como Estrada Velha do Mar.” (Bernucci et al., 2008, p. 16).

Conforme os autores Bernucci *et al.* (2008), em 1789 a estrada foi recuperada e chamada calçada de Lorena que ainda hoje tem parte preservada. Na Figura 5 é apresentada uma ilustração da Estrada do Mar.

Figura 5 – Estrada do Mar.



Fonte: História das Rodovias (2004) *apud* Bernucci *et al.* (2008)

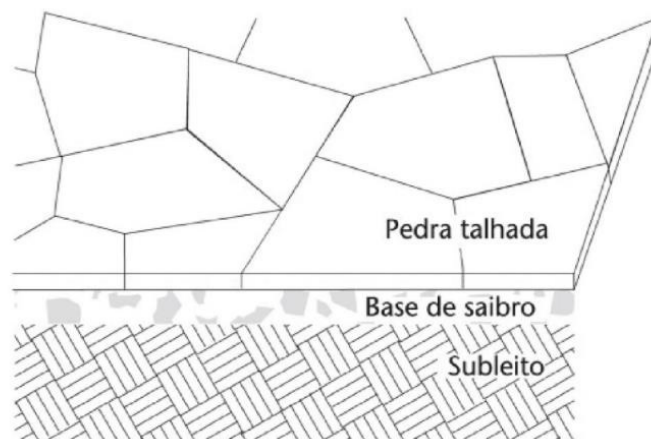
Sobre a *Calçada de Lorena*, Balbo (2007) afirma ser a primeira obra nacional a aplicar as técnicas de pavimentação romana, com pedras recortadas e justapostas de cerca de 20 cm de espessura e assentadas base de 30cm a 50cm de pedra e saibro existentes na região. A obra teria sido concluída em 1792 sob a direção do engenheiro João da Costa Ferreira. Nas Figuras 6 e 7, tem-se um detalhe da calçada de Lorena em seu estado atual e uma ilustração das camadas deste pavimento, respectivamente.

Figura 6 – Calçada de Lorena.



Fonte: Balbo (2007)

Figura 7 – Seção Típica de pavimento na calçada de Lorena.



Fonte: Balbo (2007)

Bernucci *et al* (2008) citam, na história da pavimentação brasileira, a *Estrada Real* ou *Caminho do Ouro*, que possui dois caminhos, um que liga Ouro Preto (MG) a Parati (RJ) e outro que segue do Rio de Janeiro (RJ) até Diamantina (MG), também passando por Ouro Preto. Tinha a finalidade de facilitar a ligação entre São Paulo e Rio de Janeiro. Foi aberta e calçada sobre uma trilha indígena a mando de Salvador Correia de Sá e Benevides, governador e administrador da região de Minas, que englobaria hoje Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. A Figura 8 apresenta detalhe do Caminho do Ouro em seu estado atual.

Figura 8– Caminho do Ouro.



Fonte: Ricardo Gaspar (SI), disponível em <<http://www.paraty.com.br/caminho.asp>>

Os autores também comentam que a *Estrada de Rodagem União e Indústria* foi a primeira estrada a usar macadame como base/revestimento. Na Figura 9, detalhe da *Estrada de Rodagem União e Indústria*.

“Concer (1997) apresenta um belo trabalho, a partir do livro do fotógrafo do imperador, o francês Revert Henrique Klumb (Klumb, 1872), sobre a história da *Estrada de Rodagem União e Indústria*, ligando Petrópolis (RJ) a Juiz de Fora (MG), sendo a primeira rodovia concessionada do Brasil (Figura 1.6). Idealizada pelo comendador Mariano Procópio e inaugurada por D. Pedro II em 1860 é a primeira estrada brasileira a usar macadame como base/revestimento. Até então era usual o calçamento de ruas com pedras importadas de Portugal. Com uma largura de 7m, leito ensaibrado e compactado, macadame incluindo pedra passando na peneira de 5” de malha quadrada (Prego, 2001), cuidadosamente drenada, inclusive com valetas de alvenaria, várias obras de arte, esta estrada tinha um traçado que permitia a então impressionante velocidade de 20km/h das diligências. Muito além do seu percurso de 144km, a União e Indústria representa um marco na modernização da pavimentação e do país. Sua construção envolveu o levantamento de capital em Londres e no Rio de Janeiro. Da antiga estrada ainda restam pontes e construções, incluindo o Museu Rodoviário, onde se pode aprender mais sobre a história da estrada em questão e do rodoviarismo brasileiro. A estrada original está hoje alterada e absorvida em alguns trechos pela BR-040/RJ.” (Bernucci *et al*, 2008. p. 17-18).

Figura 9– Estrada União e Indústria



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

No Brasil, embora houvesse vias feitas em concreto, em sua maioria as rodovias eram, no início do século, ainda em macadame, e posteriormente de pavimento flexível. Conforme Bernucci *et al.* (2008), em 1928 foi inaugurada a Rodovia Rio-São Paulo com 506 km de extensão e que, quando foi expandida em 1949, passou a se chamar Presidente Dutra.

Bernucci *et al.* (2008) também destacam que, em 1937, o presidente Getúlio Vargas criou o Departamento Nacional de Estradas e Rodagens (DNER), que o grande impulso na construção rodoviária ocorreu graças a fundação do Fundo Nacional Rodoviário (FNR) em 1946, decorrente do imposto sobre combustíveis líquidos e que a Petrobrás foi criada em 1953.

Durante o governo militar, de acordo com Bernucci *et al.* (2008), os destaques foram os projetos da Rodovia Transamazônica e da Ponte Rio-Niterói.

3 PAVIMENTO E SUAS CAMADAS

3.1 Definição e Função do Pavimento

“É um sistema de várias camadas de espessuras finitas que se assenta sobre um semiespaço infinito e exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito.” (SENÇO, 2008, p.7)

“O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente o tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios.” (BALBO, 2007, p. 39).

“Dessa forma, a pavimentação tem como meta propiciar um tráfego confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços decorrentes da ação do tráfego combinados com as condições climáticas, a um mínimo custo, ou seja, buscando, sempre que possível, o aproveitamento de materiais locais para as obras, garantindo um bom desempenho em termos de custos operacionais e de manutenção ao longo dos anos de serviço desta infraestrutura social.” (BALBO, 2007, p. 12).

Balbo (2007) explicita que ao dar uma melhor qualidade de rolamento e aderência aos pneus são diminuídos os gastos operacionais de maneira expressiva para os usuários daquela rodovia, bem como é aumentada a velocidade e, portanto, é diminuído o tempo de viagem.

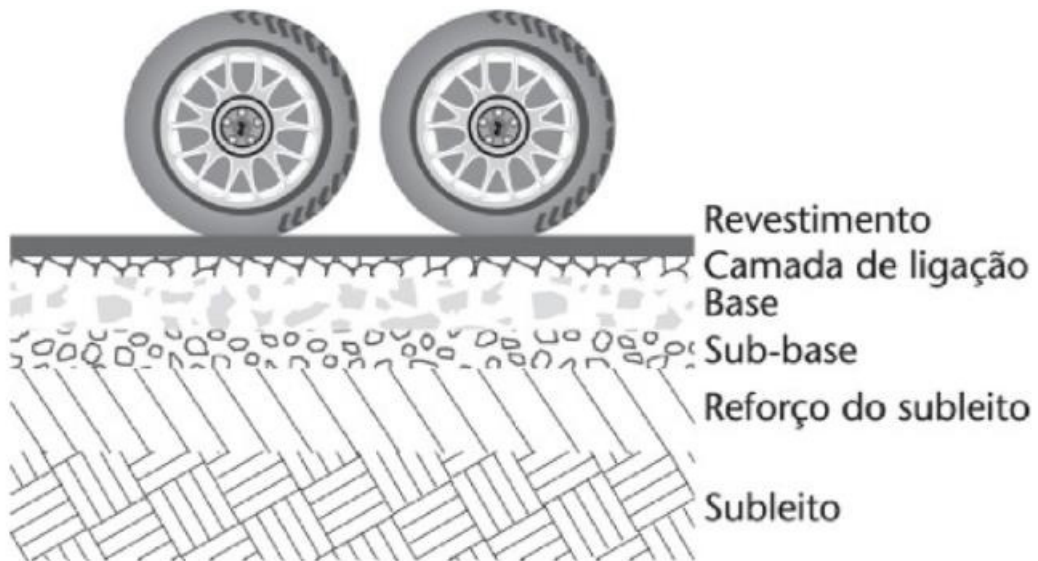
3.2 Camadas do Pavimento

As camadas existem tanto para minimizar sequencialmente o esforço, proveniente dos bulbos de tensão das cargas aplicadas no leito natural por meio de suas capacidades resistentes e suas profundidades, bem como tornar a camada de rolamento ou revestimento mais delgado.

“A estrutura do pavimento é concebida, em seu sentido puramente estrutural, para receber e transmitir esforços de maneira a aliviar pressões sobre as camadas inferiores, que geralmente são menos resistentes, embora isso não seja tomado como regra geral. Para que funcione adequadamente, todas as peças que a compõem devem trabalhar deformações compatíveis com sua natureza e capacidade portante, isto é, de modo que não ocorram processos de ruptura ou danificação de forma prematura e inadvertida nos materiais que constituem as camadas de pavimento.” (BALBO, 2007, p. 39).

Balbo (2007) explica que as cargas aplicadas pelos veículos e pelo ambiente são transitórias e, portanto, cíclicas, ou pelo menos se repetem, mesmo que em magnitudes diferentes. Tais esforços podem gerar solicitações de compressão ou tração em diferentes camadas do pavimento. Na Figura 10, apresenta-se uma ilustração com as camadas de um pavimento.

Figura 10 – Camadas de um pavimento



Fonte: Balbo (2007)

A seguir, explicações sobre cada uma das camadas.

3.2.1 Subleito

De acordo com o manual do DNIT (2006), o subleito é a fundação do pavimento, já que fica acima do leito natural do terreno.

“A principal função do subleito é absorver os esforços impostos sobre sua superfície, aliviados ao longo da profundidade (normalmente no primeiro metro). Deve-se ter cuidados com suas camadas superiores, onde os esforços solicitantes atuam com maior magnitude. O subleito poderá ser constituído de material natural escarificado e compactado, por exemplo, nos cortes do corpo estradal, ou por um material transportado e compactado, no caso dos aterros. Eventualmente, pode ser aterro sobre corte de características não adequadas.” (GONDIM, 2008, p.58-59)

O subleito, de acordo com Senço (2008), pode ser irregular em caso de estradas de terra, as quais deseja-se pavimentar e necessita de uma regularização. Pode haver inclusive a necessidade de um reforço do subleito.

A regularização do subleito “é a camada de espessura irregular, construída sobre o subleito e destinada a conformá-lo, transversal e longitudinalmente, com o projeto[...]”. (SENÇO, 2008, p.17).

Já o reforço do subleito “é uma camada de espessura constante, construída, se necessário, acima da regularização, com características tecnológicas superiores às da regularização e inferiores às da camada imediatamente superior, ou seja, a sub-base.” (SENÇO, 2008, p.18-19).

3.2.2 Sub Base

A sub-base tem função complementar, portanto, da base e é considerada separada por ser composta de um material menos nobre, devido ao fator econômico.

“É a camada complementar à base, quando, por circunstâncias técnicas e econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito. Segundo a regra geral — com exceção do pavimento de estrutura invertida — o material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológicas superiores às do material de reforço; por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base.” (SENÇO, 2008, p.19-20).

3.2.3 Base

Conforme o manual do DNIT (2006), a base é a camada que resiste e distribui os esforços provenientes dos veículos e é sobre ela que se constrói o revestimento, seja ele rígido ou flexível

“É a camada destinada a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los. Na verdade, o pavimento pode ser considerado composto de base e revestimento, sendo que a base poderá ou não ser complementada pela sub-base e pelo reforço do subleito.” (SENÇO, 2008, p. 20).

3.2.4 Revestimento

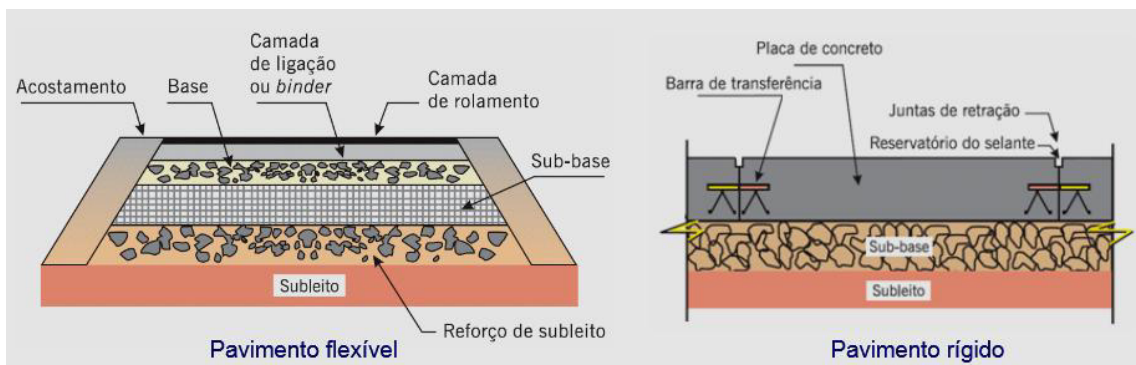
Balbo (2007) explica que uma camada de revestimento é necessária sobre a base granular, para que absorva alguns esforços que não são compatíveis com as camadas de base, de modo a desacelerar a degradação do pavimento.

“Também chamado de capa de rolamento ou, simplesmente, capa. É a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do tráfego e destinada a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste, ou seja,

aumentando a durabilidade da estrutura. No dimensionamento dos pavimentos, serão fixadas as camadas que devem ser construídas, sendo lógico que subleitos de boa qualidade exigem pavimentos menos espessos e, em consequência, poderão dispensar a construção de camadas como reforço ou sub-base.” (SENÇO, 2008, p. 20).

O critério principal de divisão dos pavimentos é, inclusive, relacionado ao tipo de revestimento aplicado sobre as camadas de base, que influenciam inclusive em quais tipos de camadas serão utilizadas e em suas espessuras, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Comparação entre camadas: pavimento flexível x pavimento rígido.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Podemos definir, então, os tipos de pavimento de acordo com seus revestimentos a seguir:

- Pavimento rígido ou de concreto, que tem como revestimento placas de concreto, armadas ou não;
- Pavimento flexível ou asfáltico, cuja camada de revestimento é de concreto asfáltico, mistura entre agregados e o ligante asfáltico.

4 MATERIAIS CONSTITUINTES DO PAVIMENTO

4.1 Concreto de Cimento Portland

Embora haja uma definição mais ampla, o concreto aqui apresentado é o concreto de cimento Portland, que tem, como componentes, cimento Portland, água, agregados graúdos e miúdos e que pode ter aditivos e adições minerais.

“O concreto, no sentido mais amplo, é qualquer produto ou massa produzido a partir do uso de um meio cimentante. Geralmente esse meio é o produto entre um cimento hidráulico e água, mas atualmente mesmo essa definição pode cobrir uma larga gama de produtos. O concreto pode ser produzido com vários tipos de cimento e também conter tanto pozolanas, como cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa, adições minerais, agregados de concreto reciclado, aditivos, polímeros e fibras.” (NEVILLE, BROOKS, 2010, p.2).

“A mistura do cimento com a água forma a pasta de cimento. Adicionando o agregado miúdo, como a areia, obtém-se a argamassa de cimento. Juntando o agregado graúdo, como a pedra britada ou seixos rolados, tem-se o concreto simples. O concreto simples caracteriza-se por sua razoável resistência à compressão, usualmente entre 20 e 40 MPa, e por uma reduzida resistência à tração, usualmente menor que 1/10 de sua resistência à compressão. Hoje em dia podem ser normalmente empregados concretos com resistências de até 50 MPa.” (FUSCO, 2008, p.13).

Embora existam muitos tipos de concreto, para a pavimentação são utilizados em grande maioria o concreto convencional não armado (CCV), concreto armado (CA), concreto de alto desempenho (CAD) e concreto compactado a rolo (CCR). Alguns concretos utilizam de agregados reciclados, fibras ou aditivos, entretanto, neste capítulo, serão detalhados o cimento Portland e agregados adequados para a utilização em concreto para pavimentação.

4.1.1 *Controle das Propriedades do Concreto para Pavimentação*

Há a necessidade de controle das propriedades, tanto em estado fresco quanto em estado endurecido, do concreto para evitar patologias ou consequências deletérias.

“Os concretos, produzidos com quaisquer ligantes hidráulicos, necessitam de controle tecnológico estrito para desempenharem satisfatoriamente seu papel como revestimento ou como bases de pavimentos. O comportamento do concreto seco e endurecido, em especial como pavimento moldado in

situ, não se restringe a questões relacionadas ao controle da resistência especificada no projeto” (BALBO, 2009, p.63).

Divide-se as propriedades do concreto aqui abordadas entre propriedades do estado fresco e propriedades do estado endurecido, conforme a Tabela 1. Vale salientar que, por tratar-se de concreto para pavimentação, as resistências citadas são resistências a tração.

Tabela 1 – Características do Concreto e sua influência nos pavimentos rígidos.

Estado do Concreto	Características	Motivo de Controle	Possíveis consequências deletérias
Fresco	Trabalhabilidade	Compatibilidade com o processo construtivo	Inúmeras imperfeições estruturais e geométricas
	Segregação/exsudação	Qualidade Superficial	Lamelação, textura inadequada
	Retração Plástica	Evitar fissuras de contração não programadas	Degradação estrutural
Endurecido	Retração de Secagem	Evitar Fissuras de retração não programadas	Ruptura precoce
	Resistência a tração	Adequação ao projeto estrutural	Estados de tensão não previstos
	Módulo de Elasticidade		
	Resistência a Fadiga		Ruptura precoce
	Porosidade/permeabilidade	Percolação de água	Empenamento higrométrico, reação álcali-agregado, corrosão de armadura
	Expansão térmica	Efeitos relacionados a cargas ambientais	Empenamento não controlado
	Abrasividade	Qualidade Superficial	Perda de qualidade Funcional

Fonte: Balbo (2009)

4.1.2 Cimento Portland

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, o cimento Portland é um pó fino de caráter aglutinante e que endurece quando em presença de água. É um material muito versátil por, no estado fresco, ser maleável e se permitir ser moldado conforme se queira e quando endurecido tornar-se rígido e com significativa resistência à compressão.

“O cimento Portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, em conjunto com uma ou mais formas de sulfato de cálcio, em proporções que variam aproximadamente de 3% a 5% em massa, e eventuais adições ativas facultativas, conforme o tipo de cimento, durante o processo de fabricação”. (BATTAGIN, BATTAGIN, 2010, p.761).

“Os componentes básicos dos cimentos são a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃). Esses componentes são aglutinados por sinterização, isto é, por aquecimento da mistura até uma fusão incipiente, sendo posteriormente moídos com uma finura adequada.” (FUSCO, 2008, p.19).

Sendo essa a constituição do cimento, durante sua hidratação. Conforme Neville e Brooks (2008), o cimento endurece devido à propriedade cimentícia dos silicatos.

4.2 Agregados

Os agregados podem ser classificados, quanto à natureza, ao tamanho e à graduação. Quanto à natureza, podemos classificá-los em naturais, artificiais ou reciclados.

Sobre os agregados naturais:

“Inclui todas as fontes de ocorrência natural e são obtidos por processos convencionais de desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. São exemplos os pedregulhos, as britas, os seixos, as areias etc. Ou seja, os agregados naturais podem ser empregados em pavimentação na forma e tamanho como se encontram na natureza, ou podem ainda passar por processamentos como a britagem.

Os agregados provenientes de rochas naturais pertencem a um de quatro tipos principais, que são ígneos, sedimentares, metamórficos ou areias e pedregulhos” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.116)

Na Tabela 2 abaixo, são apresentados alguns tipos de rochas das quais se produzem agregados naturais.

Tabela 2 - Tipos de rocha usados como fonte de agregados.

Denominação Petrológica	Descrição
Andesito	Variedade de diorito vulcânico, de granulação fina
Basalto	Rocha básica de granulação fina, usualmente vulcânica
Conglomerado	Rocha constituída de blocos arredondados ligados por cimento natural
Diorito	Rocha plutônica intermediária, constituída de plagioclásio com hornblenda, augita ou biotita
Gabro	Rocha plutônica básica de granulação grossa, constituída de plagioclásio cálcico e piroxênio, algumas vezes com olivina
Gnaisse	Rocha riscada, produzida por condição metamórfica intensa
Granito	Rocha plutônica ácida, constituída principalmente de feldspatos alcalinos e quartzo
Calcário	Rocha sedimentar, constituída principalmente de carbonato de cálcio
Quartzito	Rocha metamórfica ou sedimentar constituída quase que totalmente por grãos de quartzo
Riolito	Rocha ácida, de granulação fina, usualmente vulcânica
Sienito	Rocha plutônica intermediária, constituída de feldspatos alcalinos com plagioclásios, hornblenda, biotita ou augita
Traquito	Variedade de sienito de granulação fina, usualmente vulcânico

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Sobre os agregados artificiais:

“Os agregados artificiais são resíduos de processos industriais, tais como a escória de alto-forno e de aciaria, ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada (Cabral, 2005) e a argila expandida. O tipo de agregado artificial atualmente mais utilizado em pavimentação são os vários tipos de escórias, subprodutos da indústria do aço. Elas podem apresentar problemas de expansibilidade e heterogeneidade, requerendo tratamento adequado para utilização, porém podem apresentar alta resistência ao atrito.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.116).

Já sobre os agregados reciclados:

“Nessa categoria estão os provenientes de reuso de materiais diversos. A reciclagem de revestimentos asfálticos existentes vem crescendo significativamente em importância e em alguns países já é a fonte principal de agregados. A possibilidade de utilização de agregados reciclados vem crescendo em interesse por restrições ambientais na exploração de agregados naturais e pelo desenvolvimento de técnicas de reciclagem que possibilitam a produção de materiais reciclados dentro de determinadas especificações existentes para utilização.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.119-120).

Quanto ao tamanho, os agregados podem ser classificados em:

- Graúdo: material com dimensão maior do que 4,75mm;
- Miúdo: material com dimensão entre 4,75mm e 0,15mm;
- Filler (ou material de preenchimento): é o material passante na peneira 0,075mm, correspondente a peneira de nº 200.

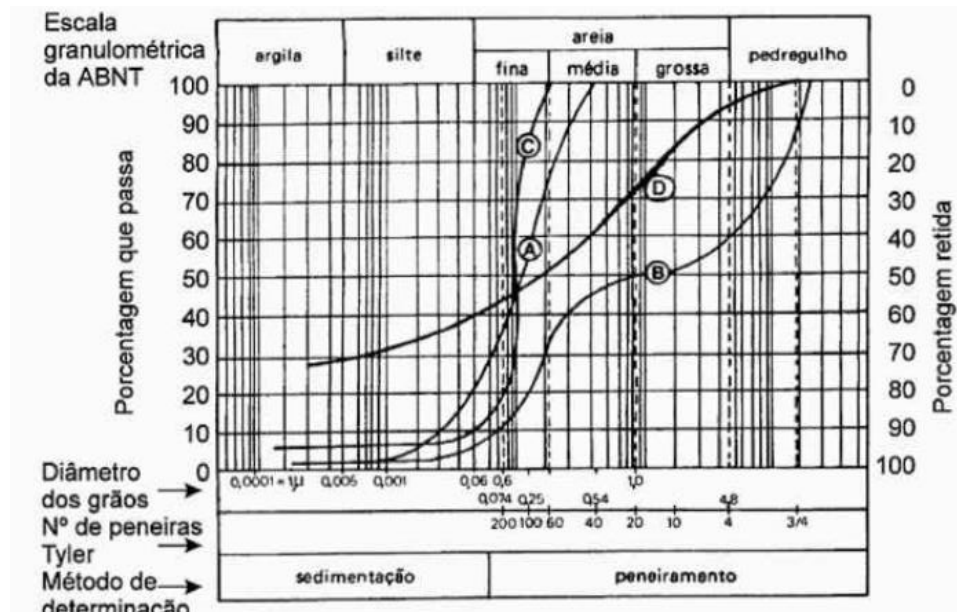
Quanto a graduação, os agregados podem ser classificados entre granulometria aberta, descontínua, uniforme e densa. Há um sistema de peneiras com diâmetros sequenciais conforme pode-se observar na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões das peneiras nominais.

Dão da Peneira		Abertura da Peneira	
Padrão	Número	Milímetros	Polegadas
75,0mm		75,0	3,0
50,0mm		50,0	2,0
37,5mm		37,5	1,5
25,0mm		25,0	1,0
19,0mm		19,0	0,75
9,5mm		9,5	0,375
4,75mm	4	4,75	0,187
2,36mm	8	2,36	0,0937
2,00mm	10	2,00	0,0789
1,18mm	16	1,18	0,0469
600µm	30	0,600	0,0234
425µm	40	0,425	0,0168
300µm	50	0,300	0,0117
150µm	100	0,150	0,0059
75µm	200	0,075	0,0029

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Figura 12- Curvas Granulométricas.



Fonte: Senço (2008)

Conforme o gráfico apresentado na Figura 12, as curvas A, B, C e D podem ser classificadas, de acordo com Senço (2008), em:

- Curva A: granulometria contínua aberta, pois há continuidade e uniformidade nas frações das graúdas até as mais finas;
- Curva B: granulometria descontínua, pois não a uniformidade na distribuição dos diâmetros;
- Curva C: granulometria uniforme, pois há predominância de uma fração, havendo verticalidade no gráfico;
- Curva D: granulometria continua densa, há presença de finos que preenchem os vazios e aumentam a densidade do agregado.

Para agregados miúdos e graúdos, a NBR 7211 (2009) determina uma faixa granulométrica aceitável nas Tabelas 4 e 5 para agregados miúdos e graúdos, respectivamente, bem como parâmetros para substâncias nocivas e durabilidade.

Tabela 4 - Especificação para agregados graúdos para concreto

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25 ^b	87 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ^b	65 ^b - 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ^b - 65 ^b	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 - 15 ^b	80 ^b – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 - 100	-	-	-	-

^a Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

^b Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: ABNT NBR 7211 (2009)

Tabela 5 - Especificação para agregados miúdos para concreto.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
NOTA 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
NOTA 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ABNT NBR 7211 (2009)

Embora a classificação de agregados para concretos asfálticos seja a mesma aqui apresentada para os agregados para produção de concreto de cimento Portland, a norma DNIT 031 (2006) norteia alguns pontos aos quais se deve observar.

O agregado graúdo deve:

- Apresentar desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50%, exceto para agregados que comprovadamente apresentem desempenho satisfatório em desgastes maiores;
- Índice de forma superior a 0,5;
- Perda de durabilidade inferior a 12%.

Os ensaios referentes a cada requisitos são DNER 035 (1995), DNIT–ME 424 (2020) e DNER 089 (1994), respectivamente.

“O agregado miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos ou outro material indicado nas Especificações Complementares. Suas partículas individuais devem ser resistentes, estando livres de torrões de argila e de substâncias nocivas. Deve apresentar equivalente de areia igual ou superior a 55%” (DNIT 031, 2006, p.4).

O equivalente de areia é um índice obtido pelo ensaio apresentado na norma DNER 054 (1997).

Em relação ao filler, a norma DNER-EM 367 (1997) define que ele deve se apresentar:

- Homogêneo, seco e livre de grumos provenientes da agregação de finos;

- Poderá ser cimento Portland, pó de pedra, pó calcário, cal hidratada, cinza volante ou outro material adequado as características especificadas para essa categoria de agregado.

4.3 Asfalto

4.3.1 Definições e Composição

Para que se defina o que é asfalto, deve-se diferenciar inicialmente os conceitos de betume, asfalto e alcatrão.

Pinto e Pinto (2015) conceituam tais materiais da seguinte forma:

- Materiais betuminosos são misturas de hidrocarbonetos pesados com propriedades aglutinantes e impermeabilizantes e que são solúveis em bissulfeto de carbono (CS_2). Os Materiais betuminosos ainda se dividem em duas categorias: asfalto e alcatrão;
- O alcatrão é obtido através da carbonização ou destilação de materiais naturais como madeira e hulha. Alcatrões não são mais utilizados hoje em dia para pavimentação por serem cancerígenos.
- O asfalto é um material aglutinante de cor variando do castanho escuro até o preto e que pode ser de fontes naturais ou destilado a partir do petróleo em torres de fracionamento, processo no qual o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é o resíduo mais pesado, obtido no fundo da torre.

“O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provem da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoelástico, impermeável a água e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água.

No Brasil utiliza-se a denominação CAP para designar esse produto semissólido a temperaturas baixas, viscoelástico a temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas, e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas em especificações que serão mostradas mais adiante.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.26).

Conforme a Tabela 6, é perceptível a variação das composições químicas em diferentes origens e, embora os teores variem, pode-se observar que os asfaltos são compostos em mais de 90% por hidrocarbonetos.

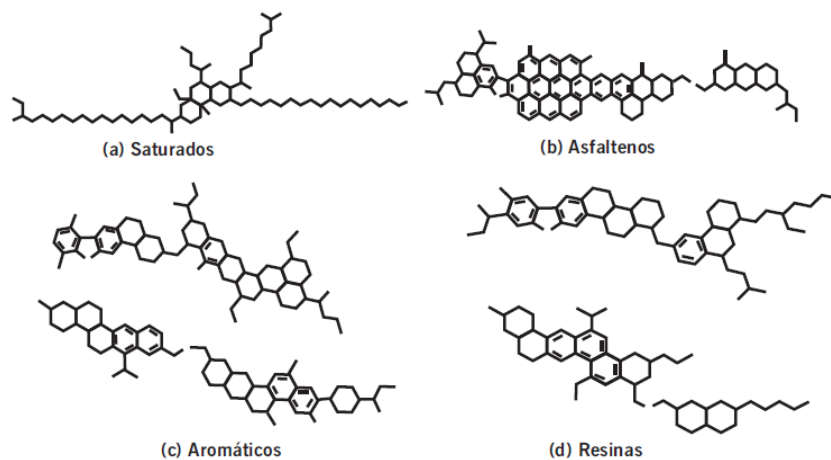
Tabela 6 - Composição do Asfalto de fontes diferentes

Origem	Mexicano	Boscan Venezuela	Califórnia Estados Unidos	Cabiúnas Brasil	Cabiúnas Brasil	Árabe Leve Oriente Médio
Refinaria	–	RLAM Bahia	–	Regap Minas Gerais	Replan São Paulo	Reduc Rio de Janeiro
Carbono %	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio %	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio %	0,3	0,8	1,1	0,9	0,9	0,5
Enxofre %	5,2	5,4	1,0	0,9	2,1	4,4
Oxigênio %	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio ppm	180	1.380	4	38	210	78
Níquel ppm	22	109	6	32	66	24

Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

Bernucci *et al.* (2008) apontam que a composição química pode ser estabelecida pelo tipo de fracionamento realizado no asfalto, que o método mais empregado atualmente, o ASTM D 4124-01 (2018), separa o asfalto em saturados, naftenoaromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos. No SARA, método europeu, as frações são relativas às letras do modelo, S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos. A Figura 13 apresenta as estruturas moleculares destes principais componentes.

Figura 13 - Fórmula estrutural dos componentes do asfalto.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

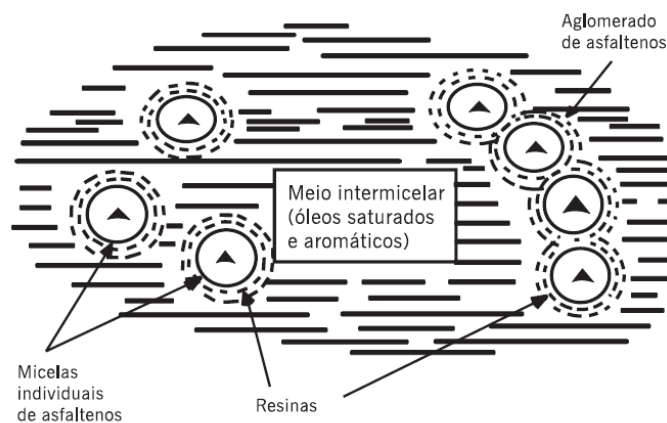
Pinto e Pinto (2015) explicam que cada uma dessas frações tem funções distintas no CAP, sendo elas:

- Saturados: fazem parte do meio dispersante e tem influência negativa na suscetibilidade térmica, tão maior seja sua quantidade mais “mole” o asfalto é.
- Aromáticos: também fazem parte do meio dispersante e agem como plastificantes, ou seja, contribuem para as propriedades físicas do CAP.
- As resinas são protetores das misturas e tem influência negativa na suscetibilidade térmica, embora contribuam na ductibilidade e dispersão dos asfaltenos.
- Asfaltenos contribuem para a suscetibilidade térmica e aumentam a viscosidade. Em geral, quanto mais asfalteno, mais duro e viscoso será o asfalto.

“A proporção de cada fração desses quatro componentes dos ligantes varia de acordo com o óleo de origem e com o processo de produção, e depois de aplicado nas obras há variação ao longo do tempo, sendo que em geral o conteúdo de asfaltenos proporcionalmente aumenta, o de resinas mais ou menos se mantem e o de aromáticos decresce, mantendo-se pouco variável o teor de saturados.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.32).

A estrutura na qual as frações do asfalto se mantêm é, como explicado na função de cada fração, a de micelas. A Figura 14 apresenta um esquema sobre como se dispõem as micelas no asfalto.

Figura 14 - Esquema das micelas de asfalto.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

4.3.2 Tipos De Asfalto

4.2.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Conforme Oda (2000), os ligantes asfálticos são classificados prioritariamente por consistência. A consistência pode ser obtida por vários ensaios. A autora ainda comenta a importância de avaliar o envelhecimento do ligante.

Serão abordados brevemente três ensaios, o de penetração, o de viscosidade e o de durabilidade, sendo estes normatizados por NBR 6576 (2007), NBR 14756 (2001) e NBR 15235 (2009), respectivamente.

➤ Penetração

Embora haja várias classificações do DNIT, a normativa DNIT-ES 031 (2006) especifica que, para o Concreto Asfáltico, devem ser utilizados CAP-30/45, CAP-50/70 e CAP-85/100.

“A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, a temperatura de 25°C. Em cada ensaio, três medidas individuais de penetração são realizadas. A média dos três valores é anotada e aceita, se a diferença entre as três medidas não exceder um limite especificado em norma. A consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.42).

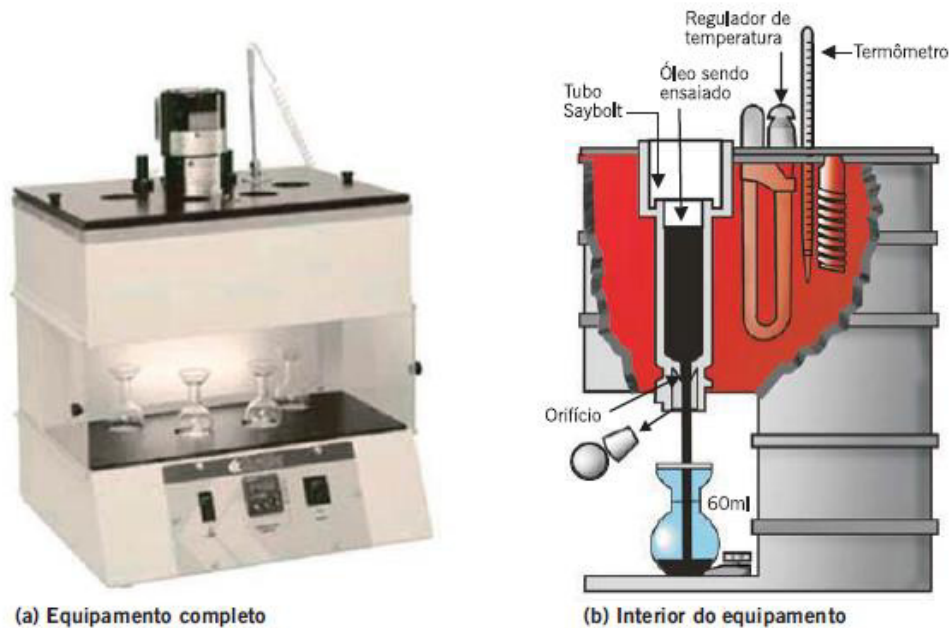
➤ Viscosidade

No Brasil, o viscosímetro mais comumente utilizado é o de Saybolt-Furol, que é normatizado pela NBR 14756 (2001). A Figura 15 detalha interior e exterior do viscosímetro de Saybolt-Furol.

“O aparelho consta, basicamente, de um tubo com formato e dimensões padronizadas, no fundo do qual fica um orifício de diâmetro $3,15 \pm 0,02$ mm. O tubo, cheio de material a ensaiar, é colocado num recipiente com óleo (banho) com o orifício fechado. Quando o material estabiliza na temperatura exigida (25 a 170°C dependendo do material e 135°C para os cimentos asfálticos), abre-se o orifício e inicia-se a contagem do tempo. Desliga-se o cronometro quando o liquido alcança, no frasco inferior, a marca de 60ml.

O valor da viscosidade é reportado em segundos Saybolt-Furol, abreviado como SSF, a uma dada temperatura de ensaio.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.46).

Figura 15 - Viscosímetro de Saybolt-Furol.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

➤ Durabilidade

O ensaio descrito na norma NBR 15235 (2009) também conhecido como RTFOT consiste em expor amostra de ligante moldada em uma camada delgada de 35g que gira continuamente enquanto exposta a uma temperatura de 163°C durante um intervalo de 85 minutos, sofrendo solicitações de jatos de ar. É importante salientar que o envelhecimento dos ligantes asfálticos se dá de várias formas, inclusive por processos anteriores ao da aplicação no pavimento.

“Ha muitos mecanismos envolvidos no envelhecimento dos ligantes asfálticos, porem dois são mais relevantes: a perda de componentes voláteis (saturados e aromáticos) e a reação química do asfalto com o oxigênio do ar. É importante se ter um parâmetro que avalie o potencial de envelhecimento de cada ligante nas várias fases de utilização: estocagem, usinagem, transporte, compactação e vida de serviço. Porém, há uma complexidade para a avaliação do envelhecimento nessas diversas fases de utilização, sendo referida mais simplesmente a avaliação de seu efeito nas características físicas, que levam ao endurecimento do ligante verificado pela diminuição da penetração e aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade. Dessa forma, o efeito do envelhecimento ou potencial do envelhecimento é avaliado como uma relação entre as características físicas de fácil medição antes e após o processo de envelhecimento ou em diversas idades.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.51-52).

4.2.2.2 Asfalto modificado por polímero

A aplicação de polímeros serve para modificar os ligantes asfálticos de modo a tornar estes aplicáveis em certas situações requeridas em projeto, seja tornando-os mais maleáveis ou melhorando a resposta ao gradiente térmico.

“Para a maioria das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais tem bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. No entanto, para condições de volume de veículos comerciais e peso por eixo crescente, ano a ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessário o uso de modificadores das propriedades dos asfaltos. Entre esses, citam-se asfaltos naturais, gilsonita ou asfaltita, mas especialmente polímeros de vários tipos que melhoram o desempenho do ligante.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.59).

Mano (1985,1991) e Leite (1999) *apud* Bernucci *et al.* (2008) classificam os polímeros nas seguintes categorias:

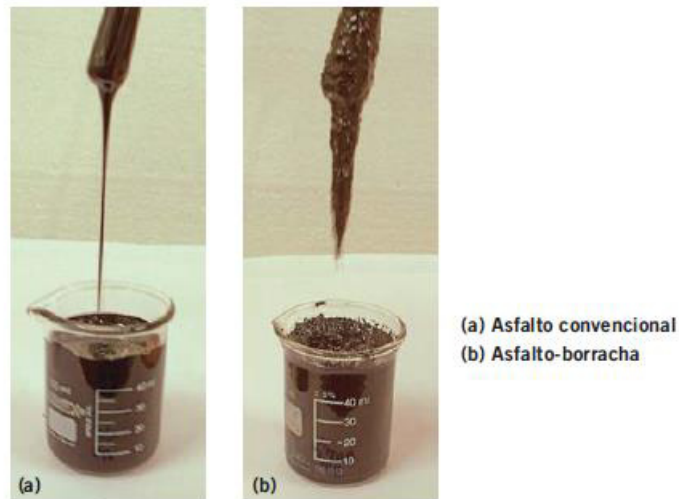
- Termorrígidos: não se fundem, apenas sofrem degradação acima de uma temperatura limite. Por exemplo: resina epóxi e poliéster;
- Termoplásticos: se fundem e se tornam reversivelmente maleáveis quando aquecidos. Por exemplo: Polietileno e PVC;
- Elastômeros: Se decompõem antes de amolecer quando aquecidos, mas diferente dos termorrígidos são elásticos. Por exemplo: SBR;
- Elastômeros termoplásticos: Em baixas temperaturas são elásticos, mas em alta temperatura são termoplásticos. Por exemplo: SBS e EVA.

“O grupo de polímeros termoplásticos normalmente usados em modificação de CAP consiste de copolímeros em bloco de estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-isopreno-estireno (SIS), estireno-etileno-butadieno-estireno (SEBS), acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e acetato de vinila (EVA).” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.64-65)

4.2.2.3 Asfalto-borracha

Conforme Pinto e Pinto (2015), a borracha de pneu contribui para a melhoria da durabilidade do asfalto, incorporando agentes antioxidantes, retardando o envelhecimento do asfalto e diminuindo a suscetibilidade térmica do revestimento asfáltico. Há também uma mudança na consistência ao adicionar borracha de pneu, como exemplificado na Figura 16.

Figura 16 - Comparativo da consistência entre asfalto convencional e asfalto borracha.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

“Uma forma alternativa de se incorporar os benefícios de um polímero ao ligante asfáltico, e ao mesmo tempo reduzir problemas ambientais, e utilizar a borracha de pneus inservíveis em misturas asfálticas. Os pneus inservíveis são problemas para a sociedade e sua utilização em pavimentação tem sido uma das técnicas mais utilizadas em todo o mundo porque se emprega grande volume desse resíduo com melhorias para as misturas asfálticas sob vários aspectos.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.75)

4.2.2.4 Emulsão Asfáltica

Com a finalidade de o CAP possua uma área de abrangência maior é possível que se faça uma emulsão do ligante asfáltico com água, desde que em temperaturas controladas.

“O produto especial chamado de agente emulsionante ou emulsificante e uma substancia que reduz a tensão superficial, o que permite que os glóbulos de asfalto permaneçam em suspensão na água por algum tempo, evitando a aproximação entre as partículas e sua posterior coalescência (junção de partes que se encontravam separadas). A proporção típica entre óleo e água e de 60 para 40%. O tempo de permanência da separação entre os glóbulos de asfalto pode ser de semanas até meses, dependendo da formulação da emulsão.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.81).

4.2.2.5 Asfalto Diluído (ADP)

Bernucci *et al.* (2008) explicam que é necessária uma viscosidade de 0,2 Pa.s, para que haja um cobrimento adequado dos agregados pelo CAP. Esse valor de viscosidade só é atingido aquecendo a mistura ligante/agregado, o que afetaria a viscosidade de trabalho na hora da aplicação do CAP. A fim de evitar isso, o ideal é adicionar um diluente volátil ao asfalto e essa mistura se deu o nome de asfalto diluído.

De acordo com Pinto e Pinto (2015), ADP, asfalto diluído ou *cut-back* é uma diluição do CAP em solventes voláteis, como supracitado e são divididos em 3 categorias, quanto à cura, que é a evaporação do solvente no qual se dilui o CAP:

- Asfalto diluído do tipo cura rápida – CR (CAP+ gasolina ou nafta)
- Asfalto diluído do tipo cura média – CM (CAP+ querosene)
- Asfalto diluído do tipo cura lenta – CL (CAP+ óleo diesel)

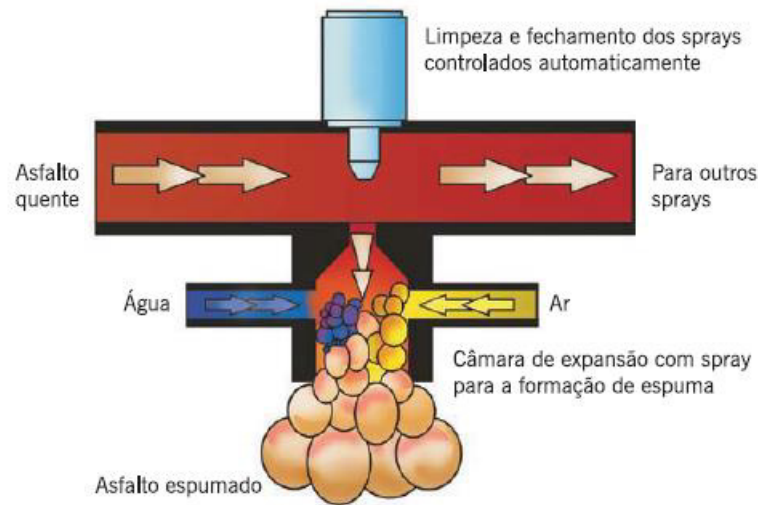
4.2.2.6 Asfalto Espuma

Ao adicionar água e ar ao ligante aquecido, devido o choque térmico, há uma expansão no volume do CAP no formato de espuma. A Figura 17 esquematiza esse processo de mistura.

“Essa técnica de espumação especial do asfalto consiste em se promover o aumento de volume do CAP por choque térmico pela injeção de um pequeno volume de água a temperatura ambiente, em um asfalto aquecido, em condições controladas, dentro de uma câmara especialmente desenvolvida para isso.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.97-98).

“A taxa de expansão e a relação entre o volume máximo do CAP em estado de “espuma” e o volume de CAP remanescente, após a espuma estar completamente assentada. A meia-vida é o tempo em segundos necessário para uma espuma regredir do seu volume máximo até a metade desse volume.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 98).

Figura 17 - Esquema da mistura do asfalto espuma.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

4.4 Solo E Materias Para Camadas De Base, Sub Base E Subleito

Bernucci *et al.* (2008) explicam que, para os materiais das camadas inferiores do pavimento (que estão abaixo do revestimento), há critérios muito bem definidos e os materiais são averiguados quanto às suas características de natureza para que possam ser empregados. Os materiais devem, de maneira geral, apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e permeáveis o bastante para serem compatíveis com a função que irão exercer na estrutura.

Os autores supracitados ainda apontam que a classificação da granulometria é semelhante à dos agregados vistos anteriormente, mas há um uso maior de materiais com frações significativas de finos, que são limitadas tradicionalmente devido a plasticidade, deformabilidade e expansão volumétrica que esses materiais apresentam. Entretanto, essa classificação tradicional dos finos não se encaixa em solos lateríticos tropicais, que são classificados conforme a metodologia MCT.

“Com o desenvolvimento dos países de clima tropical, notoriamente com a construção de obras geotécnicas de vulto, como estradas, barragens, aterros etc., observou-se uma incongruência entre as propriedades esperadas dos solos finos e as que realmente eles exibiam. Conceitos de geologia e pedologia passaram a ser importantes para a geotecnia no sentido de se compreender o mecanismo diferenciador na formação dos solos existentes nas regiões tropicais e sua influência no comportamento geotécnico. Já em 1947, o professor Milton Vargas, grande geotécnico brasileiro, alertou o professor

Casagrande, engenheiro de renome internacional da Mecânica dos Solos e responsável pela concepção da Classificação Unificada de Solos, do problema da classificação em relação aos solos tropicais lateríticos; propôs uma classe exclusiva de argilas K para as caulínicas, importante argilomineral presente nos solos lateríticos, por estas exibirem comportamento diferenciado dos demais solos.” (BERNUCCI et al., 2008, p.340).

Os autores ainda afirmam que é importante separar os materiais finos não lateríticos dos lateríticos, pois estes apresentam elevada resistência, baixa deformabilidade e baixa expansibilidade, essas propriedades podem ser mensuradas em um dos ensaios mais importantes, que é o Índice de Suporte Califórnia ou CBR.

Como aponta Balbo (2007), os estudos para o desenvolvimento do CBR começaram a partir da década de 20 nos EUA pelo engenheiro O. J. Porter do *California Division of Highways*, mas o ensaio e aplicação sistemática do CBR na pavimentação foram a partir do fim da Segunda Guerra mundial.

No Brasil, o ensaio CBR é normatizado pela DNIT-ME 172 (2016), que classifica os materiais para base, sub base e subleito em forma de percentual, tendo como 100% o valor da resistência de materiais considerados ideais na época em que o ensaio começou a ser estabelecido.

“O ensaio de CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo-de-prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada.

O valor dessa relação, expressa em percentagem, permite determinar, por meio de equações empíricas, a espessura de pavimento flexível necessária, em função do tráfego.” (DNIT, 2006, p.37)

Bernucci *et al.* (2008) resumem o ensaio nos seguintes passos:

- Moldagem do corpo-de-prova: solo ou material passado na peneira $3/4''$, compactado na massa específica e umidade de projeto, em um molde cilíndrico de 150mm de diâmetro e 125mm de altura, provido de um anel complementar de extensão com 50mm de altura;
- Imersão do corpo-de-prova: imerge-se o cilindro com a amostra compactada dentro, em um depósito cheio d'água, durante quatro dias. Durante todo o período de imersão, é empregada uma sobrecarga-padrão de 10lbs sobre o corpo-de-prova, que corresponde a 2,5 polegadas de espessura de pavimento sobre o material. Fazem-se leituras por meio de um extensômetro, a cada 24 horas,

calculando-se a expansão axial do material em relação à altura inicial do corpo-de-prova;

- Penetração do corpo-de-prova: feita com o auxílio do puncionamento na face superior da amostra por um pistão com aproximadamente 50mm de diâmetro, sob uma velocidade de penetração de 1,25mm/min. Anotam-se, ou registram-se no caso de equipamento automatizado, as pressões do pistão e os deslocamentos correspondentes, de forma a possibilitar a plotagem de uma curva pressão-penetração, na qual se definem os valores de pressão correspondentes a 2,54mm ($P_{0,1''}$) e 5,08mm ($P_{0,2''}$). Estas curvas de pressão-penetração devem possuir um primeiro trecho praticamente retilíneo, característico de fase elástica, seguido de um trecho curvo, característico de fase plástica.

Os critérios estabelecidos pelo DNIT para os valores de CBR de materiais utilizados para camadas de base são apresentados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Critérios para materiais destinado as camadas inferiores do pavimento

Camada	Condições e restrições
Materiais do subleito	Devem apresentar uma expansão máxima, medida no ensaio CBR, de 2%, e um CBR $\geq 2\%$.
Materiais para reforço do subleito	Devem apresentar CBR maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$.
Materiais para sub-base	Devem apresentar CBR $\geq 20\%$, Índice de Grupo (IG) = 0 e expansão $\leq 1\%$.
Materiais para base	Devem apresentar CBR $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$, Limite de Liquidez (LL) $\leq 25\%$ e Índice de Plasticidade (IP) $\leq 6\%$.

Fonte: DNIT (2006) *apud* Souza (2019)

5 PAVIMENTO DE CONCRETO

De acordo com Balbo (2009), pavimento de concreto é uma estrutura na qual a camada de revestimento é formada por placas de concreto moldadas *in situ*. As placas são unidas ou por barra de transferência tanto longitudinal, quanto transversalmente a fim de promover a transferência de esforços entre placas. Oliveira (2000) aponta, entretanto, que os pavimentos de concreto com barras de transferência são mais utilizados no Brasil, sendo os pavimentos sem barras de transferência destinados a áreas pouco solicitadas e com baixo fluxo.

Sabe-se ainda que vários tipos de concreto podem ser utilizados para a construção de pavimentos rígidos.

“Os pavimentos de concreto-cimento são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento Portland. Nesses pavimentos a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço[...]”. “É usual designar-se a subcamada desse pavimento como sub-base, uma vez que a qualidade do material dessa camada equivale à sub-base de pavimentos asfálticos.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p.9).

“O pavimento rígido, por causa da sua alta rigidez e alto módulo de elasticidade, tende a distribuir a carga aplicada sobre uma ampla área do solo, dessa maneira, a maior parte das solicitações é suportada pela própria placa de concreto. No projeto de pavimentos rígidos o fator mais importante é a resistência estrutural do concreto; portanto, teoricamente, pequenas variações na resistência do subleito têm pouca influência sobre a capacidade estrutural do pavimento. Na prática, tem-se observado que, variações localizadas no suporte do subleito têm provocado recalques diferenciais no pavimento. Assim, é prática internacionalmente consagrada a utilização de uma camada delgada de sub-base, com a função principal de proporcionar suporte uniforme e de evitar o bombeamento dos finos do subleito.” (MOURA, 1999, p.1).

5.1 Tipos de pavimentos de concreto de cimento Portland

5.1.1 Pavimento de Concreto Simples (PCS)

O pavimento de concreto simples é constituído de placas de concreto não armadas e separadas, geralmente, por juntas de dilatação e que transferem as cargas por meio de barras de transferência, constituídas de aço.

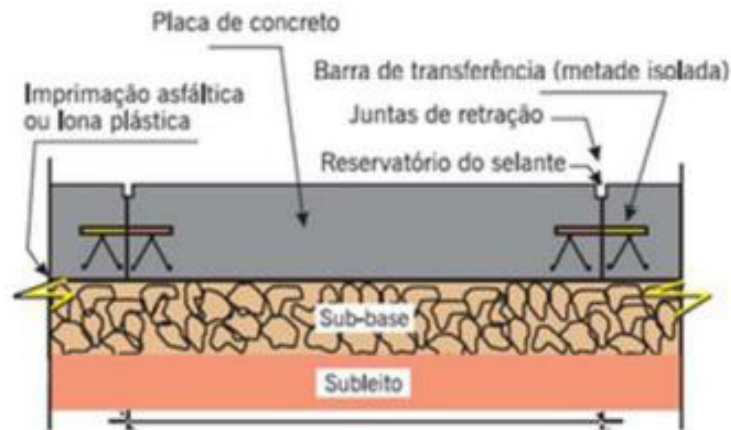
“É o pavimento constituído de placas de concreto de cimento Portland apoiados sobre a fundação, nos quais os esforços, tanto o de compressão quanto o de tração, são resistidos pelo

concreto. As placas são separadas por juntas moldadas ou serradas, que controlam a fissuração devida à retração, ao empenamento e a dilatação térmica” (OLIVEIRA, 2000, p. 5).

O pavimento de concreto simples atua, portanto, resistindo à tração e à compressão e o aço que é empregado nele é devido às barras de transferência entre placas e às barras de ligação entre placa e acostamento.

Balbo (2009) explica que os valores de resistência à tração variam entre 3,1MPa e 5,0 MPa, sendo 4,5MPa um valor usual para o concreto utilizado nesse tipo de pavimento. O mesmo autor ainda aponta que as resistências a compressão precisam ser de a partir de 32 Mpa e que o PCS funciona em regime elástico. Na Figura 18, estão detalhadas as camadas de um PCS.

Figura 18 - Ilustração do PCS.



Fonte: Silva (2018)

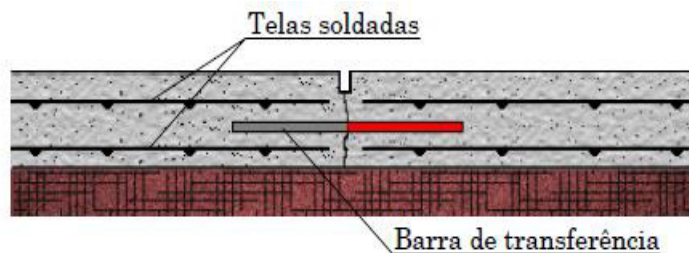
5.1.2 Pavimento de Concreto Armado (PCA)

“Esse tipo de pavimento de concreto é formado por placas armadas na parte inferior, onde se desenvolvem as maiores tensões de tração. O aço tem a função de resistir a essas tensões, diminuindo, assim, a espessura do concreto.” (OLIVEIRA, 2000, p. 12)

Vale salientar que armaduras colocadas acima da linha média de seção não conferem ao pavimento a classificação como PCA, pois armaduras negativas, em geral, são colocadas ali para combater a retração. Balbo (2009) afirma, entretanto, que a utilização de armaduras na face superior dos pavimentos de concreto vem sendo paulatinamente abandonada.

Devido as suas características, as placas de PCA são reduzidas e há um maior espaçamento entre as juntas em relação ao PCS, havendo uma redução do custo relativo ao consumo de concreto, mas um aumento do custo devido à presença da armadura. A Figura 19 apresenta as camadas de um PCA.

Figura 19 - Ilustração do PCA.



Fonte: Oliveira (2000)

Um outro tipo de pavimento armador é o PCAC, ou Pavimento de Concreto com armadura continuada, em que a armadura tem a função de manter as faces unidas após o processo de fissuração, conforme Cava (2019).

5.1.3 Pavimento de Concreto Compactado a Rolo (CCR)

“O concreto rolado ou CCR – Concreto Compactado a Rolo constitui um material seco, de consistência dura, com baixo consumo de cimento, de trabalhabilidade tal que possa ser compactado com rolos compressores. O teor de cimento, muito menor que nos concretos tradicionais, é, portanto, mais econômico. Associando o baixo consumo de cimento a pouca quantidade de água, consegue-se reduzir consideravelmente a retração.” (OLIVEIRA, 2000, p. 14)

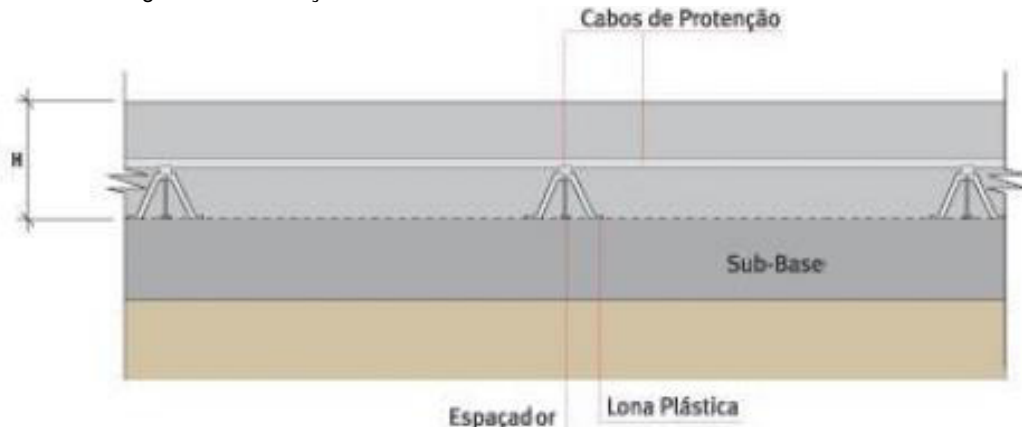
Oliveira (2008) ainda aponta que a aplicação do CCR na pavimentação no Brasil é como camada de rolamento, base para revestimento de pavimento de concreto asfáltico e sub base para pavimentos rígidos.

5.1.4 Pavimento de Concreto Protendido (PCPRO)

“A concepção de um pavimento de concreto protendido (PCPRO) pode abarcar a presença simultânea de armaduras convencionais e de cordoalhas protendidas, ou apenas estas últimas. Nesse caso, realizada uma protensão prévia ou posterior das barras de aço, criam-se esforços de compressão na estrutura antes mesmo de sua solicitação por cargas externas. Durante a atuação dos carregamentos exteriores, por veículos ou por efeitos ambientais, apenas ocorre tração no concreto protendido quando o esforço prévio de compressão é superado, o que permite uma redução apreciável na espessura da placa pela tolerância de maiores momentos fletores.” (BALBO, 2009, p.360)

Balbo (2009) aponta, entretanto, que existem dificuldade na aplicação de PCPRO como método de ancoragem, travamento entre placas após esforço de protensão e detalhamento de juntas frias entre placas. A Figura 20 apresenta os cabos de protensão dentro do PCPRO.

Figura 20 - Ilustração do PCPRO.



Fonte: Cândido (2014) *apud* Silva (2018)

Segundo Schimd (1996) *apud* Oliveira (2000), as placas protendidas são impermeáveis e sem trincas, já que grande parte da tração atuante tem que vencer a compressão pré-estabelecida. Há a possibilidade também de juntas serem muito mais espaçadas do que nos tipos de pavimento rígido anteriormente citados.

5.1.5 Pavimento de Concreto pré-moldado (PCPM)

Segundo Cristiano e Maia (2014), as placas pré-moldadas garantem controle e precisão, pois são feitas sob medida e garantem maior controle sobre a produção e, conseqüentemente, melhores condições de cura, resistências mais elevadas e maior homogeneidade para o concreto.

“Outra questão importante nessas placas pré-moldadas é a necessidade de armadura. Elas serão alçadas, estocadas, transportadas etc., o que requer grande resistência em relação ao seu peso próprio.” (BALBO, 2009, p.43)

Balbo (2009) afirma que as placas pré-moldadas podem ser protendidas, sendo que a protensão deve ser aplicada na fabricação das placas. Nota-se que deve haver cuidado com o detalhamento da estrutura, pois, além da armadura necessária para o transporte e a armadura de protensão, o concreto possuirá também barras de transferência e ligação.

5.1.6 Whitetopping (WT)

A terminologia *Whitetopping*, conforme Balbo (2009), é devido à diferença visual entre as coberturas de concreto sobre os antigos pavimentos asfálticos.

“Consiste em uma nova camada de revestimento de um antigo pavimento seja ele asfáltico ou concreto, em que poderá ser PCS, PCA, PCAC, PCPRO ou PCPM, de acordo com a necessidade construtiva da situação.” (CRISTIANO E MAIA, 2014, p. 26).

Segundo Balbo (2009), a restauração da superfície dos pavimentos com camadas de concreto durante a década de 70 expandiu-se. “O *whitetopping* (WT), literalmente ‘cobertura branca’, pode ser um revestimento do tipo PCS ou PCA, moldado diretamente sobre o pavimento pré-existente.” (BALBO, 2009, p.37).

Figura 21 – Aplicação de Whitetopping.



Fonte: Cristiano e Maia (2014)

Com relação ao WT, Balbo (2009) ainda explana que pequenas espessuras, cerca de 50 mm, em trechos altamente solicitados, já foram utilizados e o pavimento teve muitas fissuras e infiltrações. Em geral, a literatura aponta espessuras maiores de 100 mm para vias com tráfego mais intenso ou cargas mais expressivas. A Figura 21 apresenta a aplicação de um revestimento do tipo WT.

5.1.7 Whitetopping Ultradelgado (WTUD)

Conforme Balbo (2009), o termo “ultradelgado” é uma tradução do original em inglês *ultra-thin*.

Balbo (2009) define o WTUD como placas de concreto moldadas com menos de 100 mm de espessura e com pouco espaçamento entre as juntas.

“A moldagem do concreto em pequena espessura sobre o revestimento asfáltico preexistente poderá ser executada por meio de duas alternativas básicas: no sistema sobreposto e no sistema encaixado (*overlay* e *inlay*, respectivamente) [...]” (BALBO, 2009, p.40).

6 PAVIMENTO ASFÁLTICO

O pavimento asfáltico é assim chamado por possuir a camada de revestimento de concreto asfáltico, possuindo várias camadas, pois este tipo de pavimento distribui os esforços para as camadas inferiores, diferentemente do pavimento rígido. De acordo com Araújo *et al.* (2016), o pavimento flexível se caracteriza por não romper e é constituído por materiais betuminosos, sendo estes os diversos tipos de concretos asfálticos.

“Pavimentos flexíveis são aqueles em que as deformações, até um certo limite, não levam ao rompimento. São dimensionados normalmente a compressão e a tração na flexão, provocada pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, que levam a estruturas a deformações permanentes, e ao rompimento por fadiga.” (SENÇO, 2008, p. 23).

“Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico pode ser composto por camada de rolamento – em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de *binder*, embora essa designação possa levar a uma certa confusão, uma vez que esse termo é utilizado na língua inglesa para designar o ligante asfáltico.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 9).

O concreto asfáltico, de acordo com Pinto e Pinto (2015), possui inúmeras classificações, podendo ser por mistura, em que qual os materiais são previamente misturados a quente antes da aplicação ou a frio, conforme mostrado na Tabela 8; ou por penetração, que constitui de camadas sucessivas de ligante e agregados.

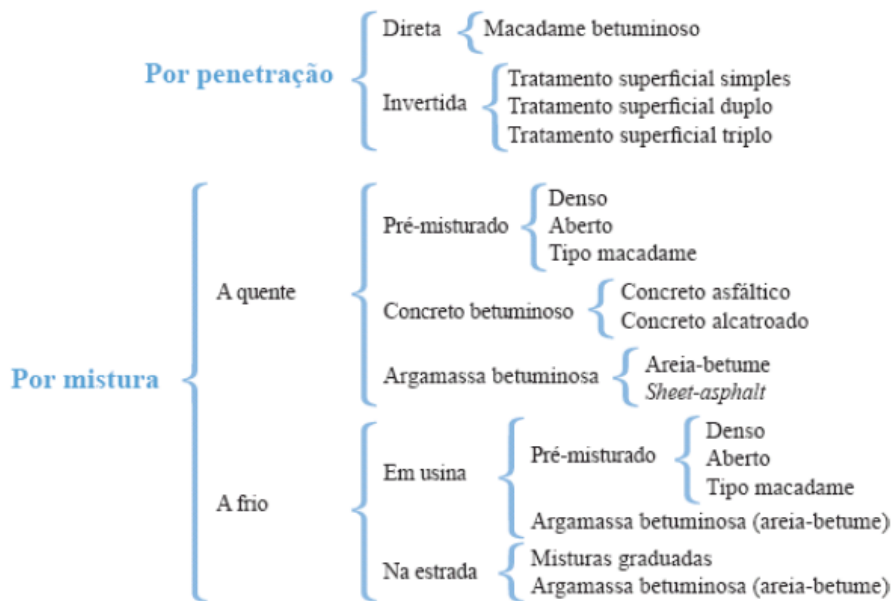
Na Figura 22, há um esquema apresentando os diferentes tipos de pavimento asfáltico e a Tabela 8 apresenta algumas vantagens e desvantagens das misturas a quente e a frio.

Tabela 8 – Comparação entre misturas a quente e a frio.

Misturas a quente	
Vantagens	Desvantagens
<p>São mais duráveis.</p> <p>São menos sensíveis à ação das cargas.</p> <p>São mais indicadas para tráfego intenso ou pesado.</p> <p>São menos sujeitas ao desgaste.</p>	<p>Exigem aquecimento do agregado.</p> <p>Exigem instalações complexas para a fabricação.</p> <p>Exigem equipamento especial para o espalhamento.</p> <p>Não permitem estocagem.</p> <p>São caras.</p>
Misturas a frio	
Vantagens	Desvantagens
<p>Fácil fabricação.</p> <p>Não exigem aquecimento do agregado.</p> <p>São fabricadas em instalações simples e pouco custosas.</p> <p>Permitem espalhamento com Patrol.</p> <p>Permitem estocagem.</p>	<p>São susceptíveis a maior desgaste.</p> <p>São mais sensíveis às cargas.</p> <p>Exigem cura da mistura.</p>

Fonte: Pinto e Pinto (2015)

Figura 22 – Tipos de Revestimentos Asfálticos.



Fonte: Pinto e Pinto (2015)

6.1 Misturas Quentes

Bernucci *et al.* (2008) apontam que as misturas a quente são divididas em 3 categorias, quanto aos agregados utilizados

- Graduação densa: possui curva granulométrica contínua e bem graduada, com poucos vazios. Por exemplo: Concreto Asfáltico Denso (CA);

- Graduação aberta: curva granulométrica uniforme com quase todos os agregados com um mesmo diâmetro e muitos vazios interconectados. Por exemplo: camada porosa de atrito (CPA);
- Graduação descontínua: curva granulométrica com quantidade dominante de grãos com maiores dimensões, completados por alguma quantidade de finos. Por exemplo: matriz pétreo asfáltica ou *stone matrix asphalt* (SMA)

Ainda quanto a granulometria das misturas a quente, conforme DNIT–ES 031 (2006), as faixas granulométricas para camada de rolamento ou camada de ligação são as que estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 – Granulometria do agregado para Concreto Asfáltico.

Peneira de malha quadrada		Faixas			
Série ASTM	Abertura (mm)	Porcentagem em massa, passando			
		A	B	C	Tolerância
2"	50,8	100	–	–	–
1 ½"	38,1	95–100	100	–	±7%
1"	25,4	75–100	95–100	–	±7%
¾"	19,1	60–90	80–100	100	±7%
½"	12,7	–	–	80–100	±7%
3/8"	9,5	35–65	45–80	70–90	±7%
Nº 4	4,8	25–50	28–60	44–72	±5%
Nº 10	2,0	20–40	20–45	22–50	±5%
Nº 40	0,42	10–30	10–32	8–26	±5%
Nº 80	0,18	5–20	8–20	4–16	±5%
Nº 200	0,075	1–8	3–8	2–10	±2%
Teor de asfalto, %		4,0 a 7,0	4,5 a 7,5	4,5 a 9,0	±0,3%
Tipo de camada de revestimento asfáltico		Camada de ligação	Camada de ligação ou rolamento	Camada de rolamento	

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

6.1.1 Concreto Asfáltico Denso

De acordo com Pinto e Pinto (2015), o concreto asfáltico denso é uma mistura a quente de ótima qualidade, bem graduado e pode ser convencional com CAP e agregados aquecidos, conforme DNIT 031–ES (2006) ou com asfalto modificado por polímeros e ainda por asfalto-borracha.

“Graças ao arranjo de partículas com graduação bem-graduada, a quantidade de ligante asfáltico requerido para cobrir as partículas e ajudar a preencher os vazios não pode ser muito elevada, pois a mistura necessita contar ainda com vazios com ar após a compactação em torno de 3 a 5%, no caso de camada de rolamento (camada em contato direto com os pneus dos veículos) e de 4 a 6% para camadas intermediárias ou de ligação (camada subjacente a de rolamento).” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 162).

6.1.2 Camada Porosa De Atrito

O CPA é uma mistura a quente com granulometria aberta e, por isso, apresenta vazios interconectados e daí vem sua capacidade drenante. Como a granulometria do CPA difere do CA, há uma norma que caracteriza os limites da curva para o CPA, DNER-ES 386 (1999). A seguir, a Tabela 10 apresenta as faixas granulométricas para CPA conforme DNER-ES 386 (1999).

“As misturas asfálticas abertas do tipo CPA – camada porosa de atrito – mantem uma grande porcentagem de vazios com ar não preenchidos graças as pequenas quantidades de filer, de agregado miúdo e de ligante asfáltico. Essas misturas asfálticas a quente possuem normalmente entre 18 e 25% de vazios co ar” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 165).

“Esse revestimento é responsável pela coleta da água de chuva para o seu interior e é capaz de promover uma rápida percolação da mesma devido a sua elevada permeabilidade, até a água alcançar as sarjetas. A característica importante dessa mistura asfáltica e que ela causa: redução da espessura da lâmina d’água na superfície de rolamento e conseqüentemente das distancias de frenagem; redução do spray proveniente do borrifo de água pelos pneus dos veículos, aumentando assim a distância de visibilidade; e redução da reflexão da luz dos faróis noturnos. Todos esses aspectos conjuntos são responsáveis pela redução do número de acidentes em dias de chuva. Outro fator importante e a redução de ruído ao rolamento, amenizando esse desconforto ambiental em áreas nas proximidades de vias com revestimentos drenantes. Esta camada drenante é executada sobre uma camada de mistura densa e estrutural.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 165).

Tabela 10 – Granulometria do agregado para Concreto Asfáltico Denso

Peneira de malha quadrada		Faixas					
		Porcentagem em massa, passando					
ABNT	Abertura mm	I	II	III	IV	V	Tolerância
¾"	19,0	–	–	–	–	100	–
½"	12,5	100	100	100	100	70–100	±7
3/8"	9,5	80–100	70–100	80–90	70–90	50–80	±7
Nº 4	4,8	20–40	20–40	40–50	15–30	18–30	±5
Nº 10	2,0	12–20	5–20	10–18	10–22	10–22	±5
Nº 40	0,42	8–14	–	6–12	6–13	6–13	±5
Nº 80	0,18	–	2–8	–	–	–	±3
Nº 200	0,075	3–5	0–4	3–6	3–6	3–6	±2
Ligante modificado por polímero, %		4,0–6,0					±0,3
Espessura da camada acabada, cm		3,0		≤ 4,0			
Volume de vazios, %		18–25					
Ensaio Cântabro, % máx.		25					
Resistência à tração por compressão diametral, a 25°C, MPa, mín.		0,55					

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Na Figura 23, é possível notar a diferença entre as capacidades drenantes do CPA e do CA em diferentes trechos de uma via.

Figura 23 – Comparação entre trechos com CPA e CA.



(a) Trecho em CA seguido por trecho em CPA



(b) Trecho em CPA na Bahia

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

6.1.3 Matriz Pétreo Asfáltica ou Stone Matrix Asphalt

“O SMA é um revestimento asfáltico, usinado a quente, concebido para maximizar o contato entre os agregados graúdos, aumentando a interação grão/grão; a mistura se caracteriza por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos e, devido a essa particular graduação, forma-se um grande volume de vazios entre os agregados graúdos. Esses vazios, por sua vez, são preenchidos por um mastique asfáltico, constituído pela mistura da fração areia, filer, ligante asfáltico e fibras.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 168).

“Devido a graduação e alta concentração de agregados graúdos, tem-se macrotextura superficialmente rugosa, formando pequenos “canais” entre os agregados graúdos, responsáveis por uma eficiente drenabilidade superficial e aumento de aderência pneu-pavimento em dias de chuva.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 169-170).

Na Figura 24, a seguir, tem-se detalhe do SMA.

Figura 24 – Detalhe da superfície de um pavimento com SMA.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

6.1.4 Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ)

Conforme Bernucci *et al.* (2008), existem também as argamassas asfálticas. Em regiões que não se tem agregados graúdos disponíveis o DNIT permite que o asfalto seja feito com agregado miúdo, em geral areia, ligante e filler se necessário. A norma DNIT 032 (2005) prevê um uso maior de ligante, devido a maior superfície de contato dos grãos, por causa do menor diâmetro. A seguir, a Tabela 11 apresenta as faixas granulométricas para AAUQ, conforme DNIT 032 (2005). O DNIT também prevê a possibilidade de uso de asfalto modificado por polímero na DNER-ES 387 (1999).

Tabela 11 – Granulometria do agregado para AAUQ.

Peneiras		Faixas		
		Porcentagem em massa, passando		
ABNT	Abertura (mm)	A 4,75mm	B 2,0mm	Tolerância
3/8"	9,5	100	–	–
Nº 4	4,8	80–100	100	±5%
Nº 10	2,0	60–95	90–100	±4%
Nº 40	0,42	16–52	40–90	±4%
Nº 80	0,18	4–15	10–47	±3%
Nº 200	0,075	2–10	0–7	±2%
Emprego		Revestimento	Revestimento	
Teor de asfalto, % sobre o total da mistura		6,0–12,0	7,0–12,0	±0,3%
Volume de vazios, %		3,0–8,0		
Relação betume/vazios, %		65–82		
Estabilidade, kN, mín.		30		
Fluência, mm		2,0–4,0		

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

6.2 Misturas frias

“Os pré-misturados a frio (PMF) consistem em misturas usinadas de agregados graúdos, miúdos e de enchimento, misturados com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) à temperatura ambiente” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 183).

Segundo Bernucci *et al.* (2008), o PMF pode ser utilizado para vias de baixo tráfego e também é classificado, quanto à granulometria de seu agregado, podendo ser denso, com poucos vazios; ou aberto, com elevado volume de vazios.

Conforme já visto, o volume de vazios influencia, não alterada a quantidade de ligante, na permeabilidade, e Bernucci *et al.* (2008), apontam sobre a permeabilidade que, com menos de 12% de vazios, o PMF pode ser utilizado como revestimento, caso contrário é necessária uma capa selante, se for camada de rolamento. A seguir a Tabela 12 apresenta as faixas granulométricas para CPA conforme DNER-ES 153 (2010).

Tabela 12 – Granulometria do agregado para pré-misturados a frio.

Peneiras		Faixas				
		Porcentagem em massa, passando				
ABNT	Abertura (mm)	A	B	C	D	Tolerância
1"	25,4	100	–	100	–	±7,0%
¾"	19,0	75–100	100	95–100	100	±7,0%
½"	12,5	–	75–100	–	95–100	±7,0%
3/8"	9,5	30–60	35–70	40–70	45–80	±7,0%
Nº 4	4,8	10–35	15–40	20–40	25–45	±5,0%
Nº 10	2,0	5–20	10–25	10–25	15–30	±5,0%
Nº 200	0,075	0–5	0–5	0–8	0–8	±2,0%
Teor de asfalto, % sobre o total da mistura		4,0–6,0				±0,3%
Volume de vazios, %		5–30				
Estabilidade, kN, mín.		25 (compactação de 75 golpes por face) 15 (compactação de 50 golpes por face)				
Fluência, mm		2,0–4,5				

Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

6.3 Tratamentos Superficiais

“Os chamados tratamentos superficiais consistem em aplicação de ligantes asfálticos e agregados sem mistura previa, na pista, com posterior compactação que promove o recobrimento parcial e a adesão entre agregados e ligantes.” (BERNUCCI *et al.*, 2008, p. 191).

Consiste em aplicações sucessivas de ligante e agregados tantas vezes quantas for descrito pelo tipo de tratamento.

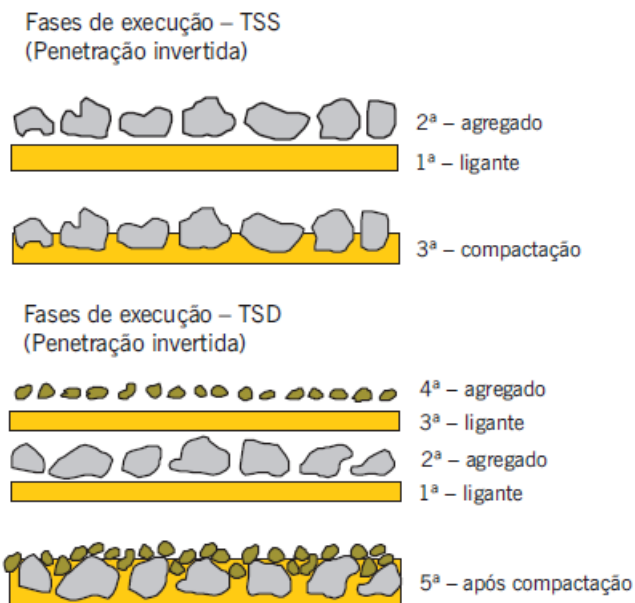
- Tratamento Superficial Simples (TSS) – uma camada de ligante aplicada sobre a imprimação, seguida de uma camada de agregados, sendo unidos depois por compactação;
- Tratamento Superficial Duplo (TSD) – mais uma camada de ligante e outra de agregados após as camadas aplicadas no TSS, seguidas de compactação;
- Tratamento Superficial Triplo (TST) – outras duas camadas, uma de ligante e outra de agregados, respectivamente, sobre as camadas dos tratamentos anteriores. Por fim, compacta-se todas as camadas.

Os autores Bernucci *et al.* (2008) afirmam que as funções do tratamento superficial são:

- Oferecer uma camada de rolamento fina, mas resistente ao desgaste;
- Impermeabilizar e proteger a estrutura viária;
- Proporcionar uma camada de rolamento antiderrapante e de alta flexibilidade.

Na Figura 25, detalha-se como são dispostas as camadas de aplicação para os TSS e TSD.

Figura 25 – Esquema de tratamento superficial.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

7 DIMENSIONAMENTO

7.1 Tráfego

Como há uma heterogeneidade entre os veículos e suas solicitações exercidas sobre a via, os modelos de dimensionamento consideram essas diferenças, seja discretizando em tipos de veículo, caso do dimensionamento de pavimentos rígidos, ou fazendo uma equivalência dos diferentes veículos que passam na rodovia e comparando isso a um eixo padrão, como no dimensionamento dos pavimentos flexíveis.






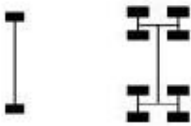



“A principal ação de solicitação do pavimento rodoviário origina-se das forças exercidas pelas rodas dos veículos comerciais, podendo-se desprezar as ações ocasionadas por veículos leves, ou de passeio. Através das rodas pneumáticas as cargas dos veículos são transmitidas ao pavimento. Desta forma, para efetuar o dimensionamento do pavimento, é de fundamental importância o tráfego de veículos comerciais, tais como caminhões e ônibus. Entretanto, ao elaborar o projeto geométrico da via, leva-se em consideração tanto o tráfego de veículos comerciais quanto o tráfego de carros de passeio” (MARQUES, 2013 *apud* COSTA, 2013, p.10).

“O tráfego rodoviário, assim como os demais parâmetros a serem considerados no projeto estrutural de um pavimento, é muito variado quanto ao tipo de veículos e cargas transportadas (MEDINA e MOTTA, 2005). A modelagem do tráfego é complexa, pois envolve contagem de veículos, distribuição do peso sobre os eixos, velocidade de passagem, variação lateral em relação ao eixo da rodovia, geometria dos eixos, pressão dos pneus, etc.” (FRANCO, 2007, p.150)

Conforme Franco (2007), existem fatores que dificultam a elaboração do dimensionamento adequado, como a previsão do crescimento do tráfego, transgressões da carga máxima permitida, diferença na velocidade dos veículos e grande heterogeneidade dos eixos que compõem a frota.

As rodas aplicam, sobre a via, o peso dos veículos e estão dispostas em eixos que são caracterizados no Manual do Estudo de Tráfego do DNIT (2006), de acordo com a distribuição das rodas neles. A Figura 26 abaixo ilustra os diferentes tipos de eixos e suas configurações.

Figura 26 - Tipos de Eixo.

Tipo de eixo	Limite legal (por eixo)	Configuração
Simples – rodas simples Ex.: caminhões leves 	6,0 t	
Simples – rodas duplas Ex.: caminhões médios 	10,0 t	
Tandem duplo Ex.: caminhões pesados 	17,0 t	
Tandem triplo Ex.: semi-reboque  Usual: Tandem duplo modificado com eixo retrátil à frente ou atrás. Outras combinações Ex.: reboques e semi-reboques 	25,5 t	

Fonte: DNIT (2006) *apud* Costa (2013)

Um dos tipos são os eixos simples, podendo ser definidos como um conjunto de rodas acopladas em um mesmo eixo e podem ser subclassificados em:

- Eixo Simples de Rodas Simples: duas rodas, uma de cada extremidade do eixo;
- Eixo Simples de Rodas Duplas: quatro rodas, duas em cada extremidade do eixo.

Outros tipos são os eixos tandem, podendo ser definidos como um conjunto de eixos consecutivos, espaçados de 100cm a 240cm e ligados entre si por um sistema de suspensão que distribui entre eles mesma carga e são sub classificados em:

- Eixo Tandem Duplo: Dois eixos e com duas rodas ligadas as extremidades de cada eixo, sendo oito rodas no total;
- Eixo Tandem Triplo: Três eixos com duas rodas ligadas as extremidades de cada eixo, sendo 12 rodas no total.

7.2 Pavimento Asfáltico

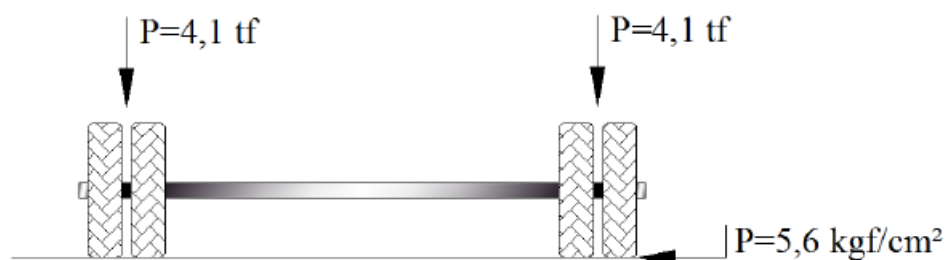
7.2.1 Método DNER (1981)

O método DNER (1981) a ser apresentado surgiu, conforme Coutinho (2011), da evolução de um método criado pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza, baseando-se na metodologia CBR. O modelo de 1961 foi reformulado por seu criador em 1966 e daí foi ligeiramente modificado para chegar no método DNER (1981), que é utilizado atualmente para o dimensionamento do pavimento asfáltico.

Para a pavimentação asfáltica, como supracitado, faz-se a equivalência das cargas dos eixos para um eixo padrão, conforme ilustrado na Figura 27, e o método de dimensionamento de Souza de 1981 apresentado pelo DNIT estabelece um eixo padrão que reduz os outros carregamentos de eixos variados por meio de um Fator de Equivalência de Cargas (FEC).

“O método de dimensionamento de Souza (1981), exposto pelo DNIT (2006), possui sua formulação teórica embasada nos estudos de Turnbull *et al.* (1962), os quais transformam os efeitos de um carregamento qualquer para o efeito de um eixo simples de roda dupla com uma carga de 80 kN, considerado como padrão. Assim, o estudo de tráfego é baseado no conceito de número equivalente de passagens de um eixo padrão durante a vida de serviço do pavimento.” (BEZERRA, 2021, p. 17)

Figura 27 – Eixo Padrão Rodoviário.



Fonte: Costa (2013)

Utiliza-se o FEC, que pode ser obtido na Tabela 13, para o cálculo do Fator de Carga (FC) ou fator de equivalência de operações, que é, conforme Balbo (2007), a quantidade de passagens do eixo médio equivalentes ao eixo padrão e pode ser obtido por meio da equação 1:

$$FC = \sum (FEC_j \times P_j) \quad \text{Eq. (1)}$$

onde,

FEC: Fator de Equivalência de Carga;

P_j: porcentagem de eixos em relação ao total de eixos (%).

Tabela 13 – FEC para cada tipo de eixo.

Tipo de Eixo	Faixas de Carga (tf)	Equações (P em tf)
Simples	0 – 8	$FEC = 2,0782 \times 10^{-4} \times p^{4,0175}$
	≥ 8	$FEC = 1,8320 \times 10^{-6} \times p^{6,2542}$
Tandem Duplo	0 – 11	$FEC = 1,5920 \times 10^{-4} \times p^{3,4720}$
	≥ 11	$FEC = 1,5280 \times 10^{-6} \times p^{5,4840}$
Tandem Triplo	0 – 18	$FEC = 8,0359 \times 10^{-5} \times p^{3,3549}$
	≥ 18	$FEC = 1,3229 \times 10^{-7} \times p^{5,5789}$

Fonte: DNIT (2006) *apud* Bezerra (2021)

Também se utiliza o FEC para o cálculo do Fator de Eixo (FE) que, segundo Marques (2013) *apud* Costa (2013).

“É um número que representa a quantidade total de eixos dos veículos previstos que solicitarão a via. É um coeficiente que, multiplicado pelo volume total de tráfego comercial que solicita o pavimento durante o período de projeto determinado, fornece uma estimativa para o número total de eixos que solicitarão o pavimento neste mesmo período. Este fator é determinado através da contagem e do somatório de todos os eixos dos veículos estimados, sendo assim, necessário conhecer a composição do tráfego. Apesar de estar relacionado aos eixos, este fator apenas os quantifica”

Assim sendo, o Fator de Eixo é estabelecido pela equação 2 e varia, conforme o tipo de eixo, de acordo com o gráfico da Figura 28.

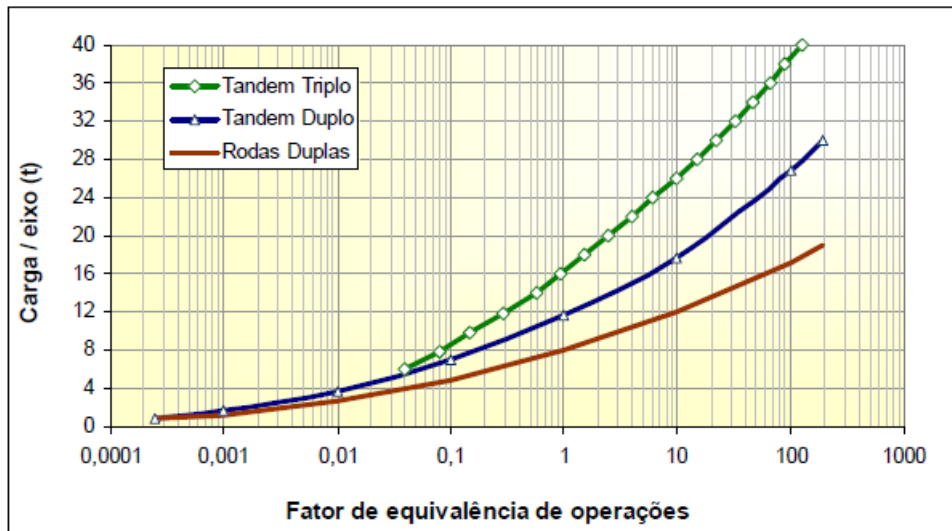
$$FE = \sum (FEC_j \times O_j) \quad \text{Eq. (2)}$$

onde,

FEC: Fator de Equivalência de Carga;

O_j: operações de um eixo.

Figura 28 – Fator de equivalência de operações por eixo.



Fonte: DNIT (2006) *apud* Franco (2007)

O produto entre FE e FC é o Fator de Veículo (FV) que, segundo Bezerra (2021), é um valor que, multiplicado pela frota de projeto, resulta no número de eixos equivalentes ao eixo padrão (N) como apresentado na equação 3:

$$N = \frac{365 \times VMD \times \left[\left(1 + \frac{t}{100} \right)^P - 1 \right]}{t/100} \times FV \quad \text{Eq. (3)}$$

onde,

VMD: volume médio diário;

t: taxa de crescimento anual (%);

P: tempo (anos);

FV: Fator de Veículo.

O dimensionamento da via se dá a partir do número N e dos parâmetros dos materiais utilizados para o solo por meio das equações a seguir, apresentadas na Figura 29.

Figura 29 – Espessuras mínimas para o Revestimento a partir do N.

N	Espessura mínima de revestimento betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 < N \leq 5 \cdot 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \cdot 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \cdot 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \cdot 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

R	Kr	REVESTIMENTO	R	H20	Hm
B	Kb	BASE		Hn	
h20	Ks	SUB-BASE			
hn	Kref	REFORÇO DO SUBLEITO			

$$K_r \cdot R + K_b \cdot B \geq H_{20}$$

$$K_r \cdot R + K_b \cdot B + K_s \cdot h_{20} \geq H_n$$

$$K_r \cdot R + K_b \cdot B + K_s \cdot h_{20} + K_{ref} \cdot h_n \geq H_m$$

Fonte: DNIT (2006) *apud* Costa (2013)

Os valores de “k” apresentados nas equações são os coeficientes estruturais dos materiais e são classificados pelo tipo de material, de acordo com a Tabela 14 a seguir, disponibilizada pelo DNIT (2006).

Ao invés do ábaco apresentado na Figura 30, Balbo (2007) *apud* Bezerra (2021) apresenta a equação 5 como alternativa para o cálculo das alturas equivalentes

$$Heq = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad \text{Eq. (5)}$$

onde,

Heq: espessura equivalente (cm);

N: número de repetições de carga

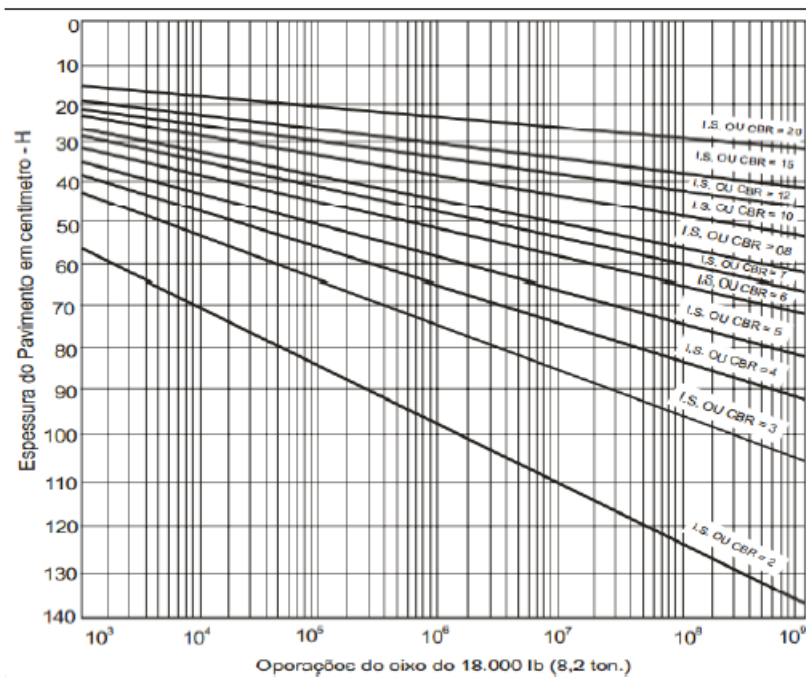
CBR: índice de suporte Califórnia (%)

Tabela 14– Valor do Coeficiente de equivalência estrutural por tipo de material

Componentes dos pavimentos	Coefficiente de equivalência estrutural (K)
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento por penetração	1,20
Base granular	1,00
Sub-base granular	0,77(1,00)
Reforço do subleito	0,71 (1,00)
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 Kg/cm ²	1,70
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 Kg/cm ² e 28 Kg/cm ²	1,40
Solo-cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 Kg/cm ² e 21 Kg/cm ²	1,20
Bases de Solo-Cal	1,20

Fonte: DNIT (2006) *apud* Costa (2013)

Figura 30 – Espessura equivalente x N.



Fonte: DNIT (2006) *apud* Costa (2013)

Quanto a um modelo de fadiga, não é apresentado no método de dimensionamento DNER, 81, mas Brown *et al.* (1997) *apud* Balbo (2007), apresenta a equação 6 como uma forma de analisar a fadiga em pavimentos asfálticos, relacionando o número de repetições crítico que levaria à ruptura com a deformação específica de tração máxima ϵt .

$$N_f = 8,9 \cdot 10^{-13} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon t}\right)^{4,9} \quad \text{Eq. (6)}$$

onde,

N_f : número de repetições crítico;

ϵt : deformação específica de tração máxima.

Bezerra (2021) afirma que o método DNER (1981) superdimensiona as camadas de base e sub base e que isso, além de um ônus financeiro, também é prejudicial para a vida útil do pavimento. Além disso, o mesmo autor também comenta sobre o Fator climático que é padronizado, apesar das dimensões continentais do país. Outra crítica ao método apresentada por Bezerra (2021) é não considerar um CBR superior a 20% no ábaco da Figura 30 citada anteriormente.

7.2.2 Método MeDiNa

O método MeDiNa é, conforme o Franco e Motta (2018), um programa computacional que, alimentado por um amplo conjunto de informações do projeto e dos materiais, dimensiona pavimentos e é um método mecanístico-empírico.

São informações necessárias para alimentar este software as propriedades do subleito obtidas por ensaios laboratoriais. Além dessas, os materiais utilizados para todas as camadas de base do pavimento também precisam ser precisamente conhecidos. Por fim, é necessário saber o nível de tráfego da via e, portanto, o valor do número N, o número equivalente de eixos.

O DNIT (2018) ressalta que os resultados obtidos pelo software MeDiNa serão tão precisos quanto forem os dados que o alimentaram e, portanto, a precisão das informações é de suma importância para uma utilização adequada desta ferramenta.

7.3 Pavimento De Concreto

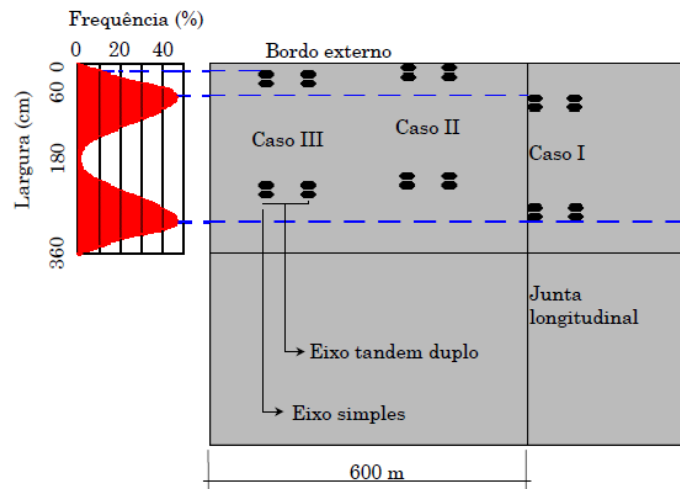
Os métodos de dimensionamento para pavimento rígido desenvolvidos pela *Portland Cement Association* – PCA em 1966 e 1984 foram e são bastante utilizados para o dimensionamento de pavimentos de concreto de cimento Portland no Brasil.

O modelo de dimensionamento para pavimentos rígidos abordado neste texto é o PCA (1984) e que, conforme o DNIT (2005), introduz diversos tópicos em relação ao método PCA (1966), tais como:

- Tipo e grau de transferência nas juntas transversais;
- Os efeitos da existência ou não do acostamento de concreto;
- Ação de eixos tandem triplos;
- Introduz um modelo de ruína por erosão da fundação do pavimento.

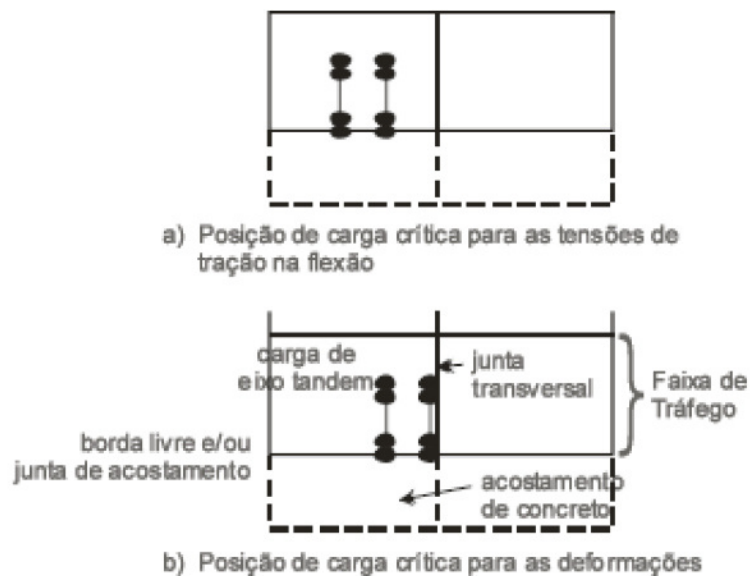
O modelo de dimensionamento PCA/84 baseou-se no modelo PCA/66 anterior fazendo reajustes, quanto à existência de barras de transferência e sua influência na posição em que ocorriam os esforços críticos nas placas, conforme Balbo (2007). As Figuras 31 e 32 representam da mudança a posição crítica de solicitação decorrente da consideração das transferências de carga entre placas.

Figura 31 – Posição Crítica do Eixo conforme PCA (1966).



Fonte: Oliveira (2000)

Figura 32 – Posição Crítica do Eixo conforme PCA (1984)



Fonte: DNIT (2005) *apud* Silva (2018)

DNIT (2005) *apud* Silva (2018) ainda aponta algumas considerações adicionais do modelo:

- Os efeitos da existência ou não de acostamento de concreto;
- Contribuição das sub bases de concreto pobre ou solo melhorado;
- Ação de eixos tandem triplos.

O modelo apresenta critérios de fadiga para a ruptura do pavimento e Oliveira (2000), comenta que são 3 os critérios para ruptura no PCA, 84:

- Fadiga;
- Erosão;
- Escalonamento.

Quanto ao modelo de fadiga, “utiliza o conceito de dano acumulado, segundo a regra de Miner, sendo o consumo total máximo da fadiga de 100%” (OLIVEIRA, 2000, p. 83).

Oliveira (2000) explica que a fadiga é uma fração da resistência à tração a ser suportada por uma quantidade de ciclos, representada por R_T no gráfico apresentado na Figura 33 e na equação 7, a seguir:

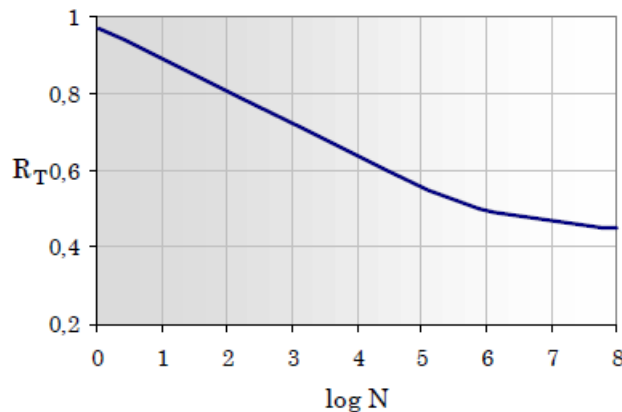
$$R_T = \sigma / \sigma_{adm} \quad \text{Eq. (7)}$$

onde,

σ é a tensão solicitante;

σ_{adm} é a tensão admissível do material.

Figura 33 – Critério de Fadiga.



Fonte: Oliveira (2000)

Devido a essa necessidade de diferenciação entre os tipos de cargas aplicadas, que diferente do modelo de dimensionamento para pavimentos asfálticos, o PCA (1984) discretiza os diferentes tipos de eixo, calculando as solicitações exercidas por cada um separadamente. De tal modo, é necessário que se realize a acumulação do número de passagens de cada tipo de eixo anualmente. Bezerra (2021) apresenta a equação 8 a seguir para o cálculo anual, para cada tipo de carga, baseando-se na taxa de crescimento anual prevista.

$$V_n = V_0 \times (1+a)^n \quad \text{Eq. (8)}$$

onde,

V_n : volume de tráfego no ano “n”;
 V_0 : volume de tráfego no ano base;
 a: taxa de crescimento anual;
 n: número de anos decorridos.

O PCA (1984) considera que a resposta estrutural da fundação é tal qual a de um sistema de molas e utiliza o coeficiente de recalque “k” como base para o cálculo das tensões. Oliveira (2000), define o coeficiente de recalque como a representação da capacidade de reação do subleito ou do sistema base/sub base e que o valor de “k” pode ser obtido ainda por correlação com o CBR, conforme representado na Tabela 15.

Tabela 15 - Coeficiente de recalque x CBR (ou ISC).

Valor de suporte do subleito		Coeficiente de recalque no topo do sistema (MPa/m), para espessuras de base iguais a (cm)			
ISC (%)	K (MPa/m)	10	15	20	30
2	16	19	22	27	33
3	24	27	31	37	45
4	30	34	38	44	54
5	34	38	42	49	59
6	38	42	46	53	65
7	41	45	50	56	69
8	44	48	53	60	72
9	47	52	56	63	76
10	49	54	58	65	79
11	51	56	60	67	81
12	53	58	62	69	84
13	54	59	63	70	85
14	56	61	65	72	87
15	57	62	66	73	88
16	59	64	68	75	91
17	60	65	69	76	92
18	61	66	70	77	93
19	62	67	71	78	94
20	63	68	72	79	96

Fonte: Pitta (1996) *apud* Bezerra (2021)

Devido à necessidade do uso de múltiplos ábacos para a realização do dimensionamento pelo método PCA (1984), esses ábacos estão apresentados no Anexo presente neste trabalho.

Estabelecida a resistência à tração na flexão ou tensão admissível, usualmente entre 4,5MPa e 5,0MPa, conforme Balbo (2009), resta estabelecer os parâmetros de erosão e escalonamento, que podem ser obtidos pelos ábacos, disponíveis pelo DNIT (2005), nas Figuras A.1, A.2 e A.3 do Anexo.

O método consiste em, estabelecidos os parâmetros da via; bem como dos materiais a serem utilizados, determinar por tentativa uma espessura para a placa de concreto a ser utilizada como revestimento.

Oliveira (2000) disponibiliza o quadro da Figura 34 que explica o dimensionamento de um pavimento de concreto simples por meio dos parâmetros estabelecidos e de uma espessura de tentativa.

Figura 34 – Quadro de dimensionamento conforme método PCA (1984).

Projeto:	<u>Nome do projeto</u>		
Espessura tentativa:	<u>Valor da espessura tentativa (cm)</u>		
k:	<u>Valor de k no todo da fundação (MPa/m)</u>		
F _{sc} :	<u>Coefficiente de segurança adotado para o projeto</u>		
M _R :	<u>Valor do módulo de resistência da concreto (MPa)</u>		
Juntas com barras de transferência	sim	_____	não _____
Acostamento de concreto	sim	_____	não _____
Período de Projeto	<u>Período de projeto para o qual foi estimado o N_{sol}</u>		

Peso por eixo (tf)	Peso por eixo . F _{sc} (tf)	N _{sol}	Análise de Fadiga		Análise de Erosão	
			N _{adm}	Consumo de fadiga (%)	N _{adm}	Dano por erosão (%)
(1)	(2) = (1) . F _{sc}	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) = (6) / (5)

Eixos simples

- 8- Tensão equivalente: _____
 9- Fator de fadiga: _____
 10- Fator de erosão: _____

--	--	--	--	--	--	--

Eixos tandem duplos

- 11- Tensão equivalente: _____
 12- Fator de fadiga: _____
 13- Fator de erosão: _____

--	--	--	--	--	--	--

Eixos tandem triplos

- 14- Tensão equivalente: _____
 15- Fator de fadiga: _____
 16- Fator de erosão: _____

--	--	--	--	--	--	--

C _{total} :		D _{total} :	
----------------------	--	----------------------	--

Fonte: Oliveira (2000)

sendo que,

$$f_{fad} = \sigma_{eq} / M_R \quad \text{Eq. (9)}$$

$$(9) = (8) / M_R \quad \text{Eq. (10)}$$

$$(12) = (11) / M_R \quad \text{Eq. (11)}$$

$$(15) = (14) / M_R \quad \text{Eq. (12)}$$

onde,

F_{sc} = fator de segurança

f_{fad} é o fator de fadiga

σ_{eq} é a tensão equivalente determinada nas Tabelas A.1 e A.2, que se encontram no apêndice deste estudo.

O fator de segurança é decorrente das diferentes considerações sobre as cargas entre autores e da variabilidade da porcentagem de eixos padrão que passam na posição crítica. Na Tabela 16, há os valores usuais para F_{sc} utilizados para cada tipo de tráfego.

Tabela 16 – Fatores de Segurança para as cargas.

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 necessitam de um desempenho acima do normal	Até 1,5

Fonte: DNIT (2005) *apud* Bezerra (2021)

O número admissível de repetições a fadiga é obtido no ábaco da Figura A.1 por meio da entrada do fator de fadiga e da carga por eixo. A tensão equivalente é obtida nas Tabelas A.1 e A.2 que se diferenciam pela presença ou não de acostamento de concreto

O número admissível por erosão está nos ábacos, presentes no Anexo, nas Figuras A.2 e A.3, que tem como entrada os fatores de erosão, disponíveis nas Tabelas A.3 a A.6, também presentes no Anexo.

Sobre as críticas ao modelo de dimensionamento há, conforme Bezerra (2021), a desconsideração, quanto ao fator ambiental, principalmente ao fator térmico que influencia no empenamento das placas de concreto, gerando tensões não previstas. Balbo (2009) explica que os realizadores do método não consideraram o empenamento térmico por alegarem não haver dados conclusivos na época sobre este fenômeno.

8 COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTOS RÍGIDO E FLEXÍVEL

Tendo a vasta gama de possibilidades para pavimentos e a importância de um projeto adequado, deve-se entender as diferenças entre a aplicação da pavimentação rígida ou flexível para determinada via. Neste capítulo, serão abordados, majoritariamente, os fatores econômicos que diferem nestes dois tipos de pavimento.

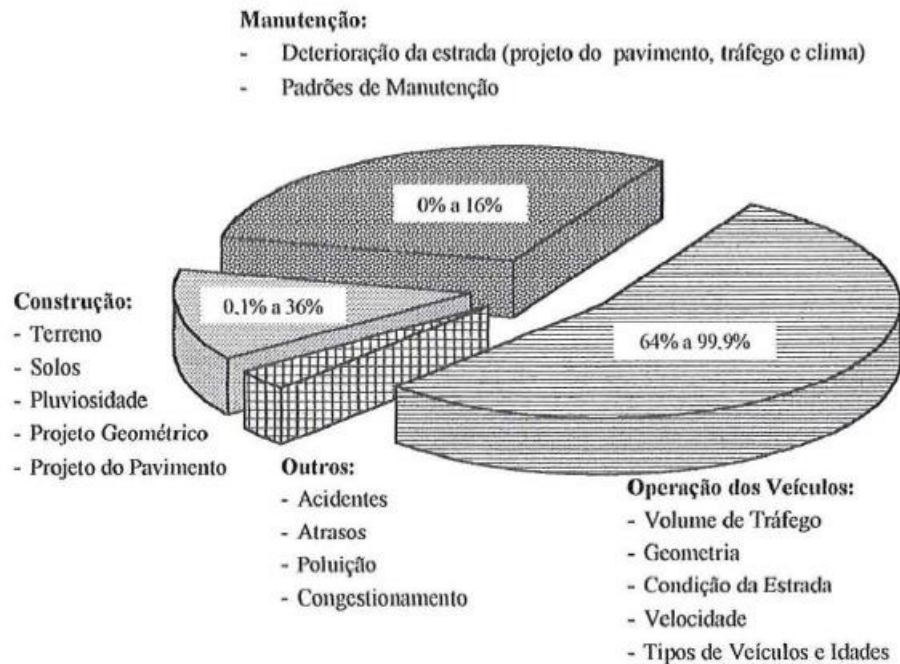
Há inúmeros estudos de caso sobre custos entre pavimento rígido e flexível e em sua maioria, há concordância sobre a tendência dos valores, embora estes difiram de texto para texto, pois há muitas considerações a serem feitas para um dimensionamento de uma via, como posição das jazidas, o tipo de material a ser escavado ou o tipo de material a ser utilizados em bases, sub bases e reforço do subleito.

No Brasil, nas décadas de 40 e 50, conforme Biroli (2003), utilizava-se cimento Portland para a pavimentação. Entretanto, com o fim da Segunda Guerra, a produção de cimento foi destinada à Construção Civil, somado ao fato de que, nos EUA, desenvolvia-se extensa tecnologia para pavimentos asfálticos devido ao baixo custo do petróleo. Atualmente a extrema maioria das vias pavimentadas são de pavimento flexível e há, ainda conforme Biroli (2003), uma inércia para a adoção de alternativas. Há uma necessidade de reavaliação de quando e onde utilizar cada tipo de pavimento de modo que os custos sejam os menores para o nível de serviço adequado de cada projeto.

Biroli (2003) aponta que os custos associados a um pavimento são de 3 tipos, conforme a Figura 35, e que todos eles devem ser avaliados.

- Construção;
- Manutenção;
- Operação de Veículos.

Figura 35 – Custos associados a um pavimento.



Fonte: Biroli (2003)

8.1 Estudo de Biroli (2003)

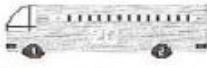







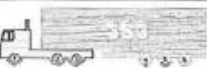

Utilizando o programa computacional de gerência desenvolvido pelo Banco Mundial, HDM-4 (*Highway Design and Maintenance Standards Model*) Biroli (2003) faz uma análise sobre os diferentes custos envolvidos considerando os fatores:

- Solicitações e Volume de tráfego (cinco níveis);
- Período de Projeto (três níveis);
- Resistência do Subleito (três níveis);
- Materiais e Estruturas das camadas.

A partir de pesquisas no banco de dados do DNER de São Paulo, foram estabelecidos os níveis de tráfego. Para períodos de projeto, foram considerados 10, 20 e 30 anos. Como capacidade do subleito, foram considerados os seguintes valores de CBR: 3%, 12% e 20%.

Os Níveis de tráfegos foram classificados em: muito leve, leve, médio, pesado e muito pesado conforme a Tabela 18 e os tipos de veículos estão presentes na Tabela 17

Tabela 18 - Limites Legais de carga e Tipos de Veículo

Tipos de Veículo	Esquema	Limite Legal de Carga/Eixo (kN)			
Leves e Utilitários		60	60		
O2C		60 (1)	100 (2)		
O3C		60 (1)	170 (2/3)		
2C		60 (1)	100 (2)		
3C		60 (1)	170 (2/3)		
2C2		60 (1)	100 (2)	100 (3)	100 (4)
3C2		60 (1)	170 (2/3)	100 (4)	100 (5)
2S1		60 (1)	100 (2)	100 (3)	
2S2		60 (1)	100 (2)	170 (3/4)	
2S3		60 (1)	100 (2)	250 (3/4/5)	
3S3		60 (1)	170 (2/3)	250 (4/5/6)	

Fonte: Biroli (2003)

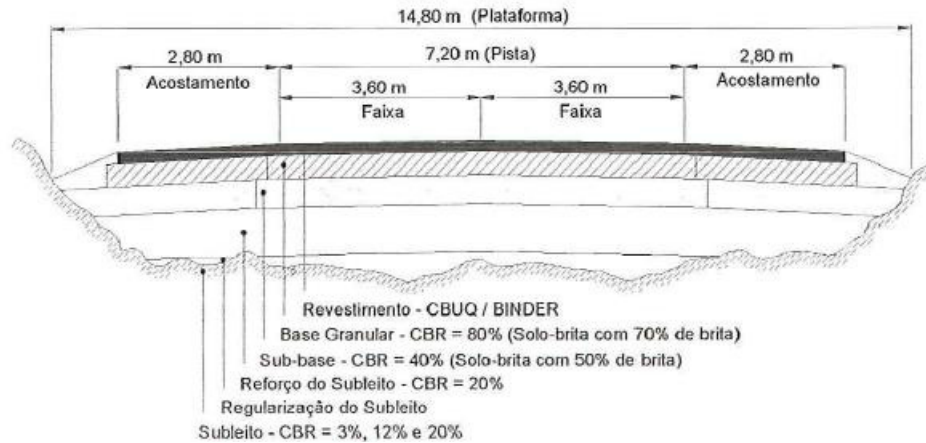
Tabela 17 - Classificação e Composição dos Tráfegos

Tipo de Veículo	Tráfego 1 Muito Leve	Tráfego 2 Leve	Tráfego 3 Médio	Tráfego 4 Pesado	Tráfego 5 Muito Pesado
Leves	201	1.522	3.044	4.566	8.040
Utilitários	63	473	946	1.419	2.520
O2C	12	99	198	300	480
O3C	24	153	308	460	955
2C	26	233	468	702	1.070
3C	24	188	376	564	955
2C2	0	8	16	24	20
3C2	0	1	2	4	5
2S1	1	5	10	12	5
2S2	13	90	178	270	520
2S3	25	185	368	550	990
3S3	11	43	86	129	440
Veículos comerciais/dia/faixa	136	1.005	2.010	3.015	5.440
Veículos/dia/faixa	400	3.000	6.000	9.000	16.000

Fonte: Biroli (2003)

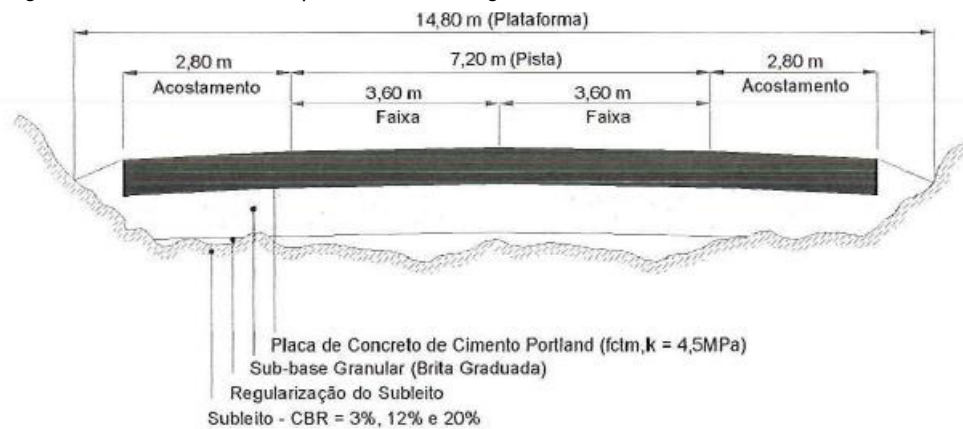
Para efeitos de dimensionamento, Biroli (2003) considerou as seguintes camadas de estrutura do pavimento apresentadas nas Figuras 36 a 38.

Figura 36 – 1º Pavimento Tipo: Pavimento Flexível



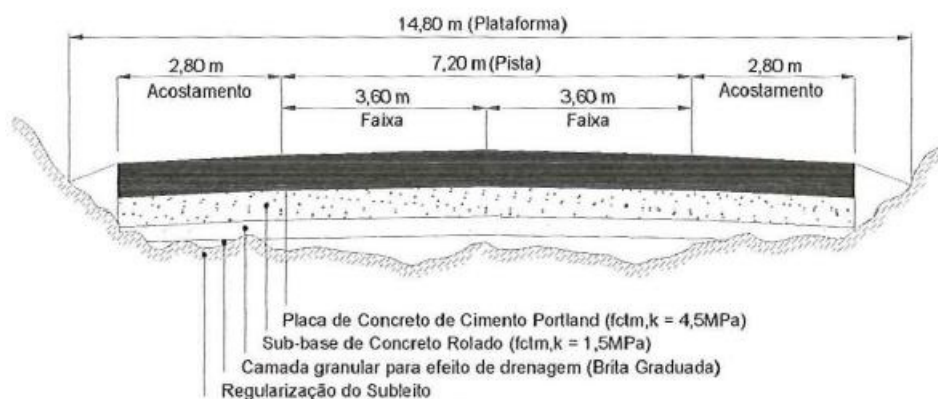
Fonte: Biroli (2003)

Figura 38 – 2º Pavimento Tipo: Pavimento Rígido



Fonte: Biroli (2003)

Figura 37 – 3º Pavimento Tipo: Pavimento Rígido



Fonte: Biroli (2003)

Os métodos de dimensionamento utilizados foram:

- Pavimentos Flexíveis: AASHTO (1993) e DNER (1981);
- Pavimentos Rígidos: AASHTO (1993) e PCA (1984).

Nas Tabelas 19 e 20, são apresentados os valores relativos aos custos de construção para os métodos de dimensionamento PCA (1984), para pavimentos rígidos, e DNER (1981), para pavimentos flexíveis, obtidos por Biroli (2003).

Tabela 19 - Custos de Construção para pavimentos Flexíveis DNER (1981)

CUSTOS DE CONSTRUÇÃO (RS x 10 ⁶) DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS - TABELA DE PREÇOS UNITÁRIOS DO DER-SP									
MÉTODO DO DNER (1981)									
TRÁFEGO	PERÍODO = 10 anos			PERÍODO = 20 anos			PERÍODO = 30 anos		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
1	31,28	23,17	21,60	35,36	27,62	26,05	37,29	29,45	27,88
2	37,49	29,56	27,99	40,72	33,04	31,47	43,44	35,13	33,56
3	40,61	33,04	31,47	43,55	35,13	33,56	43,87	35,13	33,56
4	40,82	33,04	31,47	43,77	35,13	33,56	44,26	35,24	33,67
5	43,65	35,13	33,56	44,54	35,24	33,67	47,85	37,97	36,40

Fonte: Biroli (2003)

Tabela 20 - Custos de Construção para pavimentos Rígidos PCA (1984)

CUSTOS DE CONSTRUÇÃO (RS x 10 ⁶) DOS PAVIMENTOS RÍGIDOS - TABELA DE PREÇOS UNITÁRIOS DO DER-SP									
MÉTODO DA PCA (1984) - SUB-BASE DE BRITA GRADUADA									
TRÁFEGO	PERÍODO = 10 anos			PERÍODO = 20 anos			PERÍODO = 30 anos		
	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%	CBR = 3%	CBR = 12%	CBR = 20%
1	70,44	63,91	63,91	72,32	65,79	65,79	75,58	67,17	67,17
2	76,97	70,44	68,56	80,73	70,44	70,44	83,99	73,70	72,32
3	80,23	71,82	71,82	83,99	73,70	73,70	87,75	73,70	73,70
4	82,11	73,70	71,82	85,87	73,70	73,70	89,63	75,58	75,58
5	85,87	73,70	73,70	89,63	75,58	75,58	92,90	76,97	75,58

Fonte: Biroli (2003)

É possível observar que, para condições semelhantes de subleito, tráfego e período de projeto, os custos de construção são muito menores para pavimentos flexíveis em qualquer nível de tráfego ou período de projeto. As Tabelas 21 a 24 apresentam os valores dos custos totais para períodos de projeto de 10 anos e 30 anos.

Tabela 21 - Custos Totais. Período de projeto 10 anos

		DNER (F) e PCA (R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	164,17	201,30
	CBR = 12%	156,07	194,80
	CBR = 20%	154,54	194,80
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	1001,31	1023,60
	CBR = 12%	993,48	1017,38
	CBR = 20%	993,05	1015,62
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	1982,07	1969,86
	CBR = 12%	1974,66	1964,69
	CBR = 20%	1976,15	1964,91
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	2969,53	2910,94
	CBR = 12%	2963,67	2906,63
	CBR = 20%	2969,03	2905,15
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	5477,22	5272,11
	CBR = 12%	5471,87	5267,16
	CBR = 20%	5480,72	5267,78

Fonte: Biroli (2003)

Tabela 22 - Custos totais sem manutenção e reabilitação. Período de projeto 10 anos.

		DNER (F) e PCA (R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	164,17	201,30
	CBR = 12%	156,07	194,80
	CBR = 20%	154,54	194,80
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	1001,31	1023,60
	CBR = 12%	993,48	1017,38
	CBR = 20%	993,05	1015,62
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	1982,07	1.969,86
	CBR = 12%	1974,66	1.966,64
	CBR = 20%	1976,15	1.964,91
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	2969,53	2.910,94
	CBR = 12%	2963,67	2.906,70
	CBR = 20%	2969,03	2.907,19
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	5.663,70	5.272,11
	CBR = 12%	5.682,77	5.269,64
	CBR = 20%	5.873,80	5.270,19

Fonte: Biroli (2003)

Tabela 23 - Custos totais. Período de projeto 30 anos.

		DNER (F) e PCA (R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	590,05	589,52
	CBR = 12%	583,64	581,13
	CBR = 20%	586,31	581,37
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	3.960,91	3.795,42
	CBR = 12%	3.951,41	3.789,60
	CBR = 20%	3.952,35	3.788,91
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	7.815,08	7.496,06
	CBR = 12%	7.809,43	7.490,87
	CBR = 20%	7.839,37	7.493,25
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	11.670,26	11.175,14
	CBR = 12%	11.669,63	11.175,84
	CBR = 20%	11.705,07	11.179,94
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	21.393,46	20.444,07
	CBR = 12%	21.401,81	20.456,93
	CBR = 20%	21.439,54	20.465,16

Fonte: Biroli (2003)

Tabela 24 - Custos totais sem manutenção e reabilitação. Período de projeto 30 anos.

		DNER (F) e PCA (R)	
		FLEXÍVEL	RÍGIDO
TRÁFEGO 1	CBR = 3%	590,05	589,56
	CBR = 12%	583,64	581,62
	CBR = 20%	586,31	581,71
TRÁFEGO 2	CBR = 3%	5.141,10	3.801,28
	CBR = 12%	5.134,27	3.804,38
	CBR = 20%	5.209,87	3.804,27
TRÁFEGO 3	CBR = 3%	10.841,70	7.510,71
	CBR = 12%	10.968,84	7.534,64
	CBR = 20%	10.983,20	7.536,99
TRÁFEGO 4	CBR = 3%	16.895,35	11.200,65
	CBR = 12%	17.094,55	11.248,81
	CBR = 20%	17.174,30	11.253,47
TRÁFEGO 5	CBR = 3%	33.607,70	20.505,12
	CBR = 12%	33.748,29	20.676,31
	CBR = 20%	34.011,21	20.677,59

Fonte: Biroli (2003)

Para os custos totais Biroli (2003) apresenta valores para os diferentes períodos de projeto em diferentes períodos de análise, considerando com e sem manutenções e reabilitações, sendo a ausência desses fatores um indicativo da influência dos custos de operação diferentes para cada tipo de pavimento, pois tais custos estão atrelados ao tipo de pavimentação e a qualidade de rolamento, que se perpetua por meio de manutenção e reabilitação da camada de revestimento, prioritariamente.

8.2 Estudo de Cavalet, Luvizão, Nienov e Zampieri (2019)

Cavalet *et al.* (2019), comparam os custos de construção e manutenção de um trecho da rodovia estadual SC-114.

Foi adotado um período de análise de 20 anos e um trecho de 1km de via com duas faixas de 3,50 metros e acostamento de 2,50 metros nas duas margens. No dimensionamento os autores utilizaram o Software MeDiNa para o pavimento flexível e o método PCA/84 para o pavimento rígido.

- Pavimento Flexível: sub-base de macadame seco, base de brita graduada, subleito de material semelhante ao usado na SC-114 e duas camadas de concreto asfáltico modificado por polímero.
- Pavimento Rígido: sub-base de CCR e subleito de material semelhante ao usado na modelagem do pavimento flexível.

As condições de tráfego para cada tipo de pavimento são dadas nas Tabelas 25 e 26. Definidas as estruturas e condições de tráfego e realizados os dimensionamentos foram obtidos os valores das espessuras de cada camada conforme a Tabela 27.

Tabela 25 - Condições de tráfego. Pavimento flexível.

Tipo de via	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano)	2632
FV:	4.794
N anual (1º ano)	$4,61 \times 10^6$
Taxa de crescimento	4,4
Período de projeto (anos)	10
N total	$5,63 \times 10^7$

Fonte: Cavalet et al. (2019)

Tabela 27 - Condições de tráfego. Pavimento rígido.

Eixos	Número de Repetições	N
Simple (6t)	14.902.218	$1,49 \times 10^7$
Simple (10 t)	5.904.044	$5,9 \times 10^6$
Duplo (17 t)	12.073.156	$1,2 \times 10^7$
Triplo (25,5 t)	5.834.085	$5,83 \times 10^6$

Fonte: Cavalet et al. (2019)

Tabela 28 - Dimensionamento das camadas dos pavimentos

PAVIMENTO FLEXÍVEL		PAVIMENTO RÍGIDO	
Revestimento (1ª cam.)	6,1 cm	Placa de concreto	20 cm
Revestimento (2ª cam.)	10 cm	Sub-base de CCR	10 cm
Base	15 cm		
Sub-base	15 cm		
Consumo de Material		Densidade	
CAP polímero	5,50%	CAUQ	2,4 t/m ³
CM-30	0,0012 t/m ²		
RR-1C	0,0004 t/m ²		

Fonte: Cavalet et al. (2019)

Como resultado os autores obtiveram os valores apresentados na Tabela 28, onde pode-se observar que o custo de construção para o pavimento flexível foi mais de 44% superior ao custo de construção do pavimento de concreto de cimento Portland e os autores explicam que em parte por ser uma via de tráfego intenso, em parte pelo alto custo de aquisição do concreto asfáltico, pois este era adicionado de polímeros.

Tabela 26 - Custos de Construção para pavimentos

Pavimento Flexível		Pavimento Rígido	
Serviços e Materiais	Custo (R\$)	Serviços	Custo (R\$)
Regularização do Subleito	9.231,78	Regularização do subleito	9.231,78
Sub-base em Macadame Seco	146.275,62	Sub-base de CCR	171.813,99
Base em Brita Graduada	180.870,01	Placa de CCP	1.024.191,63
Imprimação	2.790,30		
Pintura de Ligação	3.602,82		
Revestimento CAUQ Polímero	413.600,93		
Asfalto Diluído CM-30	77.377,05		
Emulsão Asfáltica RR-1C	16.661,92		
CAP Modificado por Polímero	851.837,13		
Transporte de Líquidos asfálticos	40.028,18		
TOTAL (R\$):	1.742.275,73	TOTAL (R\$):	1.205.237,40

Fonte: Cavalet et al. (2019)

Com relação aos custos de manutenção, eles foram apresentados ano a ano e a Tabela 29 aponta que os custos de manutenção para o pavimento flexível foram superiores, mantendo o padrão observado em outros trabalhos.

Tabela 29- Custos de Manutenção ano a ano

Ano	Flexível (R\$/ano)	Rígido (R\$/ano)
1		Abertura
2	1.877,44	1.362,45
3	3.754,87	2.043,68
4	5.632,31	2.724,90
5	125.494,88	3.406,13
6 a 9	37.548,70	16.349,40
10	334.693,37	25.160,53
11 a 14	37.548,70	16.349,40
15	126.898,16	81.812,59
16 a 19	37.548,70	16.349,40
20	334.693,37	81.812,59
Total	1.045.690,50	247.371,06

Fonte: Cavalet et al. (2019)

8.3 Outros estudos

8.3.1 Costa (2013)

Costa (2013) conclui que, apesar dos pavimentos rígidos terem um custo inicial maior, os custos de manutenção do pavimento flexível, que por serem mais frequentes, fazem com que, a longo prazo, o pavimento rígido seja uma opção mais econômica. O autor ainda aponta que o pavimento rígido também é mais durável e de elaboração mais sofisticada.

Os valores obtidos pelo autor foram fornecidos pelas composições de preço do programa SINCRO2 – DNIT.

Na simulação feita por Costa (2013), foram considerados, para o tráfego um VDM de 2500 veículos para um período de projeto de 20 anos e com a resistência da sub-base definida por um Índice de Suporte Califórnia de 13%, considerando uma via com faixa de 3,5 metros de largura. Também foram consideradas os parâmetros apresentados na Tabela 30.

Após dimensionamento das camadas, foram obtidos:

- Pavimento Flexível: 15cm de sub-base de solo estabilizado granulometricamente, 13cm de base granular e 10 cm de revestimento em CBUQ.
- Pavimento Rígido: 13 cm de placa de concreto de 4,5 Mpa de resistência à tração na flexão e 10 cm de sub-base de CCR. O reforço do subleito foi dispensado em ambos os pavimentos.

Tabela 30 - Características comparadas dos tipos de pavimento.

Principais Características dos Tipos de Pavimentos Comparados		
Parâmetro	Pavimento Flexível	Pavimento Rígido
Estrutura	mais espessa	esbelta
Subleito	exige maior suporte	não exige muito suporte
Interação com agentes químicos	reage com óleos e graxas	resiste a ataques químicos
Freq. de manutenção	mais frequente	menos frequente
Custo inicial	baixo	elevado
Custo de manutenção	baixo	elevado
Vida útil	menor	maior
Segurança	escorregadio quando molhado	evita derrapagem devido a sua textura
Absorção de luz	absorve mais; mais gastos com iluminação da via	absorve menos; economia de energia na iluminação da via
Dimensionamento	método arcaico e experimental	método mais sofisticado e confiável
Qualidade dos mat. empregados	Menor possibilidade de controle	possibilita maior controle
Resistência às intempéries	Degrada mais facilmente	resiste bem

Fonte: Costa (2013)

8.3.2 Dal Pra Vasata e Júnior (2013)

Dal Pra Vasata e Junior (2013) comparam os custos de pavimentar num trecho de 1,6 km a Rua Tocantins na cidade Pato Branco – PR.

Foram coletados os dados de tráfego da rua os métodos de dimensionamento utilizados. Foram feitos também ensaios de caracterização do solo, que na rua em estudo havia sido compactado a rolo, bem como ensaios de compactação.

Os métodos de dimensionamento foram o do DNER (1981) para pavimento flexível e o PCA/84 para pavimento rígido e as composições de preço foram obtidas do SINCRO.

Os valores obtidos para os custos de construção foram, conforme a tendência observada, maiores para os pavimentos rígidos, sendo R\$ 1.386.309,69 para a opção asfáltica e R\$ 1.916.891,63 para a de concreto de cimento Portland.

Os autores concluem que tal diferença se deu na cotação da época e que seria importante a implementação de um sistema de monitoramento em função de aplicar manutenções e restaurações.

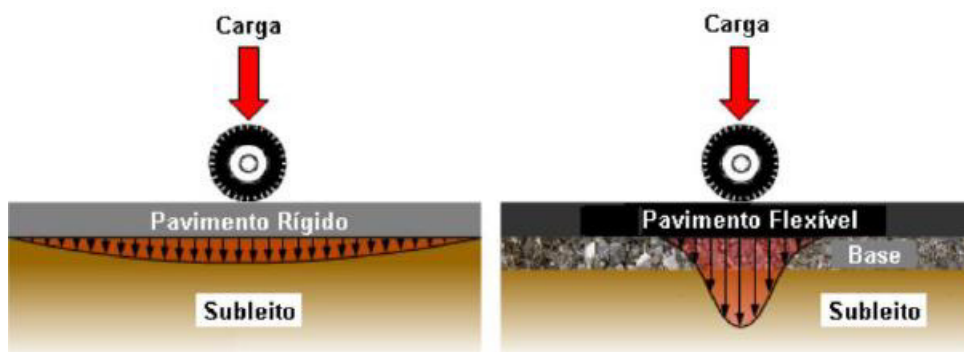
Os autores salientaram ainda que o pavimento de concreto teve espessura final, considerando todas as camadas da estrutura, bem menor, 34 cm em comparação a 134 cm do pavimento flexível, e que também seria resistente a ataques químicos de óleos ou graxas, diferentemente do pavimento asfáltico.

8.3.3 Araújo, Santos, Pinheiro e Cruz (2016)

Araújo *et al.* (2016) afirma que o pavimento rígido tem maior durabilidade e que possui uma estrutura mais simples em relação ao pavimento flexível.

Os autores também apontam que, dentro de um limite, o concreto de cimento Portland absorve a maior parte das tensões e redistribui em uma área mais distribuída que no pavimento asfáltico. A qualidade do solo interfere menos no comportamento estrutural do que no seu concorrente, conforme esquematizado na Figura 39.

Figura 39 – Representação das cargas nos pavimentos.



Fonte: Araújo *et al.* (2016)

Araújo *et al.* (2016) enfatizam que a maioria dos defeitos dos pavimentos rígidos advém de falhas executivas ou materiais empregados, necessitando, portanto, de um maior controle de qualidade durante sua execução.

Os autores concluem que o pavimento rígido é o mais aconselhável para estradas com maior intensidade de carga, mas que a análise econômica deve ser feita sempre, tendo em vista a grande diversidade de condições climáticas em um país extenso como o Brasil.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

9.1 Conclusão

A partir das informações levantadas neste trabalho, a partir da bibliografia citada, é possível concluir que:

Devido à produção de textos e normas estrangeiros, a partir da década de 50 que estimularam o desenvolvimento da pavimentação asfáltica. Essa influenciou o mercado de pavimentação brasileiro a seguir neste rumo, o que conformou o país a produzir um mesmo tipo de pavimento por 70 anos.

O pavimento flexível é utilizado de maneira majoritária no país, seja devido à cultura ou devido à facilidade de obter mão-de-obra qualificada, tendo em vista o grande volume de obras de pavimentação que utilizam revestimento asfáltico. Porém, é mais caro no longo prazo tão maior for o fluxo e a intensidade das cargas, mesmo que tenha os custos de construção inferiores, pois requer manutenções frequentes, tem uma menor vida útil e a possibilidade do desenvolvimento de deformação permanente de trilha de rodas.

O pavimento rígido, embora pouco utilizado, é na grande maioria das vezes a melhor solução para rodovias de tráfego intenso e tem uma durabilidade superior, gera menos movimentação de terra devido às baixas espessuras, em relação aos pavimentos asfálticos, e gera menos gastos indiretos com iluminação, além de menos gastos de operação, já que possui menores custos com manutenção e restauração das vias, mas os pavimentos rígidos requerem um controle maior no seu projeto e execução.

Entretanto, algumas considerações não foram tomadas por esses estudos, como a necessidade de fechamento das vias para a manutenção de pavimentos rígidos de concreto de cimento Portland. Ainda que seja a opção mais viável para estradas de alto tráfego, pelo que se observa nos trabalhos apresentados nesta revisão, a obstrução das vias durante as manutenções pode tornar, para determinadas situações, o pavimento rígido uma solução inviável.

Deve-se observar que, embora haja uma diferença entre custos de construção entre os tipos de pavimento, essa diferença pode diminuir com o atual aumento no preço do petróleo. Variações deste tipo podem tornar o pavimento de concreto de cimento Portland uma opção ainda mais viável.

Por fim, os valores obtidos dependem também dos métodos de dimensionamento e que, com a evolução para métodos mecanísticos-empíricos que modelem mais eficientemente os pavimentos, poderá se ter avaliações ainda mais precisas.

9.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a realização de um estudo comparativo entre os pavimentos de concreto de cimento Portland, de concreto asfáltico e de blocos intertravados para vias urbanas. Deste modo, pode-se realizar uma melhor análise das opções ideais para toda infraestrutura rodoviária.

Outra sugestão é a da análise experimental do desempenho de concretos com agregados reciclados em comparação ao concreto convencional para aplicação em pavimentos rígidos. Deste modo, pode-se avaliar se a substituição dos agregados reciclados apresentaria ganhos em resistência ou vantagem econômica para a construção de pavimentos rígidos.

REFERÊNCIAS

- ALBANO, J. F. **Notas de Aula Do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [20--]
- ARAÚJO, M. A.; SANTOS, M. J. P.; PINHEIRO, H. P.; CRUZ, Z. V. **Análise comparativa de métodos de pavimentação–pavimento rígido (concreto) x flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento. Ano 01, v. 10, p. 187-196, 2016. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/metodos-de-pavimentacao>>. Acesso em: 10 janeiro 2022.
- ABNT. **NBR 14756**: Materiais Betuminosos – Determinação da Viscosidade Cinemática. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- ABNT. **NBR 15235**: Materiais Asfálticos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ABNT. **NBR 6576**: Materiais Asfálticos – Determinação da penetração. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 4124**: standard test methods for separation of asphalt into four fractions. USA, 2001.
- BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BATTAGIN, A. F.; BATTAGIN, I. L. S. O cimento Portland no Brasil. *In*: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2, p. 761-790.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. D., CERATTI, J. A. P., & SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás, ABEDA, 2008.
- BEZERRA, F. S. C. **Avaliação dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, intertravados e com concreto: previsões de comportamento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- BIROLI, F. C. **Comparação dos custos de pavimentos flexíveis e rígidos com base em conceitos de gerência de pavimentos**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- CAVA, F. **Da Rocha ao Asfalto: A História da Pavimentação**, 2019. Disponível em: <<https://alemdainercia.com/2019/03/13/da-rocha-ao-asfalto-a-historia-da-pavimentacao/>>. Acesso em: 05 janeiro 2022.

CRISTIANO, B. R.; MAIA, R. M. **Pavimentos Rígidos Em Rodovias**. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Instituto Tecnológico de Educação e Tecnologia, Caratinga, 2014.

CAVALET, V. N.; LUVIZÃO, G.; NIENOV, F. A.; ZAMPIERI, L. Q. Análise comparativa do custo-benefício entre pavimentos flexíveis em concreto asfáltico e pavimentos rígidos em concreto de cimento Portland aplicado em rodovia de alto tráfego. *In*: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 33., 2019, Balneário Camburiú. **Anais**. Balneário Camburiú: Universidade do Oeste de Santa Catarina. 2019. p. 1246 - 1257.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Anuário CNT do Transporte**. 2019. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/Rodoviario/1-2-1-/Empresas>>. Acesso em: 20 dezembro 2021.

COUTINHO, J. C. P. **Dimensionamento de Pavimento Asfáltico**: Comparação do Método DNER com um método mecanístico-empírico aplicada a um trecho. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

COSTA, J. S. **Análise comparativa de alternativas para pavimentação de rodovias**: pavimento flexível x pavimento rígido. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

DAL PRA VASATA, A. C.; JUNIOR, I. S. **Análise comparativa entre sistemas de pavimentação rígida quanto a sua viabilidade técnica e econômica para aplicação em uma via urbana**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

DNER. **DNER-EM 367/97**. Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

DNER. **DNER-ES 386/99**. Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito. Rio de Janeiro: DNER, 1999.

DNER. **DNER-ME 035/98**. Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DNER. **DNER-ME 054/97**. Equivalente de areia. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

DNER. **DNER-ME 089/94**. Agregado – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNIT. **Manual de estudos de tráfego**. Publicação IPR – 723. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

DNIT. **Manual de pavimentos rígidos**. Publicação IPR – 714. Rio de Janeiro: IPR, 2005.

DNIT. **Manual de pavimentação**. Publicação IPR – 719. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

DNIT. **NORMA DNIT 031/2006 – ES.** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificações de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

DNIT. **NORMA DNIT 032/2005 – ES.** Pavimentos flexíveis – Areia-Asfalto a quente – Especificações de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2005.

DNIT. **NORMA DNIT 172/2016 – ME.** Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio. Brasília: IPR, 2016.

DNIT. **NORMA DNIT 424/2020 – ME.** Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com crivos – Método de ensaio. Brasília: IPR, 2020.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV.** Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRANCO, F. C. P. MOTTA, L. M. G. (2018) **Guia para Utilização de Método Mecanístico-Empírico.** Apresentação dos Programas Desenvolvidos no TED 682/2014. Manual de Utilização. COPPE/IPR. Rio de Janeiro, Brasil.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural: Tópicos Aplicados.** São Paulo: Editora PINI, 2008.

GASPAR, R. Caminho do Ouro. Disponível em <<https://paraty.com.br/caminho-do-ouro/>>. Acesso em 15 janeiro 2022.

GONDIM, M. F. **A travessia no tempo: Homens e Veículos, da mitologia aos tempos modernos.** Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília: 2014.

GONDIM, Y. C. **Dimensionamento de pavimentos de concreto utilizando o programa computacional KENSLABS 2004 e comparação com método da PCA 1984.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

ILOS – Instituto de Logística e Supply Chain. **Cenário da Infraestrutura Rodoviária no Brasil.** Disponível em: < <https://www.ilos.com.br/web/cenario-da-infraestrutura-rodoviaria-no-brasil/>>. Acesso em 20 dezembro 2021.

IPSOS. **Global Infrastructure Index: Public satisfaction and priorities.** Ipsos MORI Social Research Institute, 2018. Disponível em < <https://www.ipsos.com/en/global-infrastructure-index-public-satisfaction-and-priorities-2018>>. Acesso em 10 junho 2022.

LINS, A.; FILHO, S. **Estudo comparativo de viabilidade técnica e econômica entre pavimentos rígido e flexível aplicados a rodovia BR-408/PE.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade do Vale do Ipojuca, Caruaru, 2011.

MARÉ, F. L. **História das Infra-estruturas Rodoviárias.** Dissertação (Mestrado), Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2011.

MOURA, J. C. **Análise comparativa do desempenho dos métodos de dimensionamento de pavimentos rígidos.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** 2ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação.** Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

OLIVEIRA, P. L. **Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

OLIVEIRA, E. M. **Transferência dos esforços cisalhantes em juntas de pavimentos rígidos.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação Asfáltica:** Conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2015.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** v1. 2ª ed. São Paulo: PINI, 2008.

SILVA, J. R.; LIMA, A. W.; COELHO, N. A.; ANDRADE, D. S. Pavimentos rígidos – análise da influência do comprimento das barras de transferência. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53., 2011, Florianópolis. **Anais.** São Paulo: IBRACON, 2011.

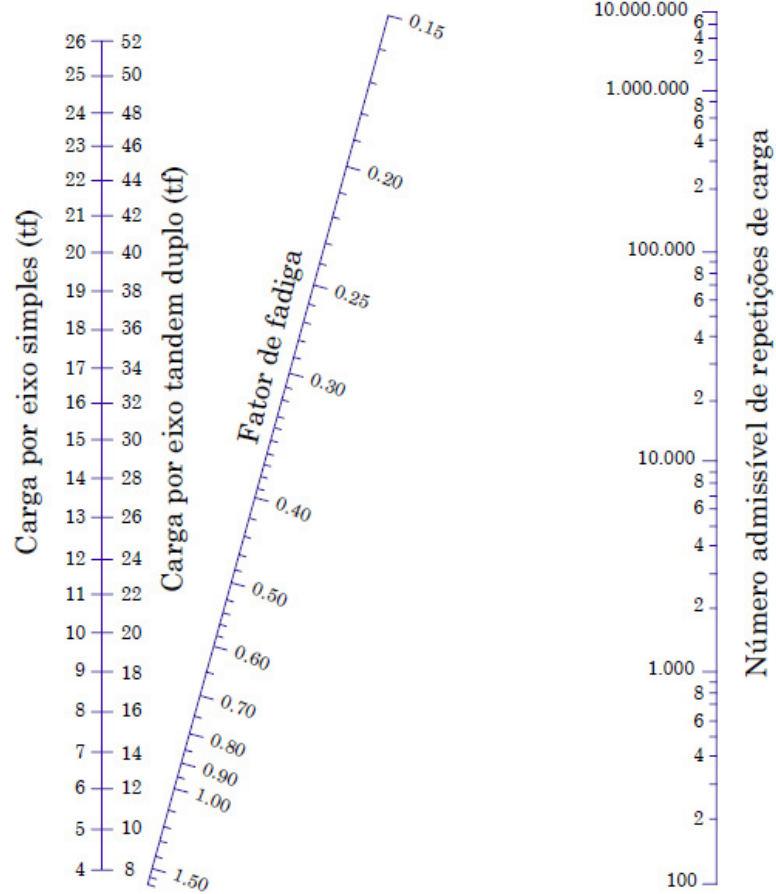
SILVA, F. M. **Dimensionamento de pavimentos rígidos para corredores de ônibus, considerando diferentes níveis de tráfego.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências Humanas e Sociais da Fundação Carmelita Mário Palmério, Monte Carmelo, 2018.

SOUZA, M. N. **Dimensionamento de estruturas de pavimento:** Aplicação do método DNER (1981) e do método MeDiNa. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Santa Catarina, 2019.

ANEXO

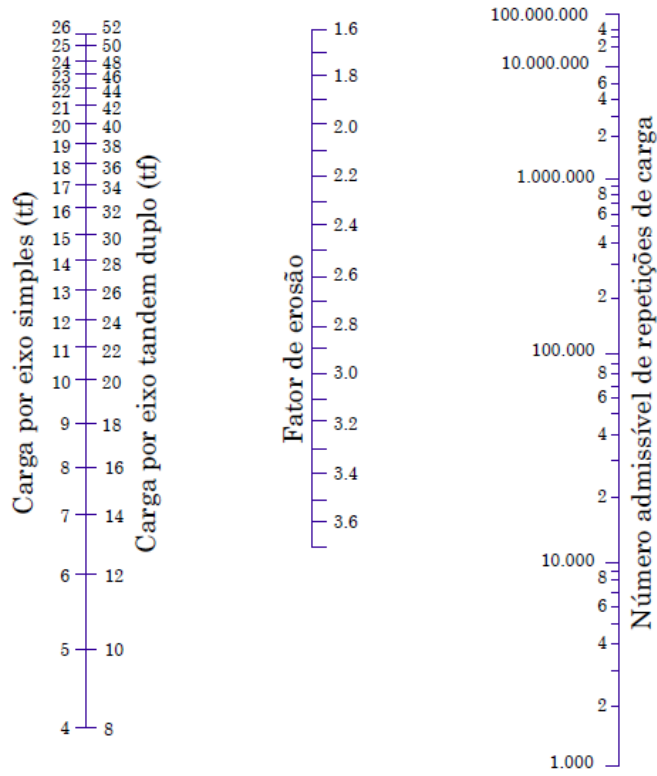
ANEXO A – Ábacos para o método de dimensionamento PCA (1984)

Figura A.1 - Ábaco de Fadiga.



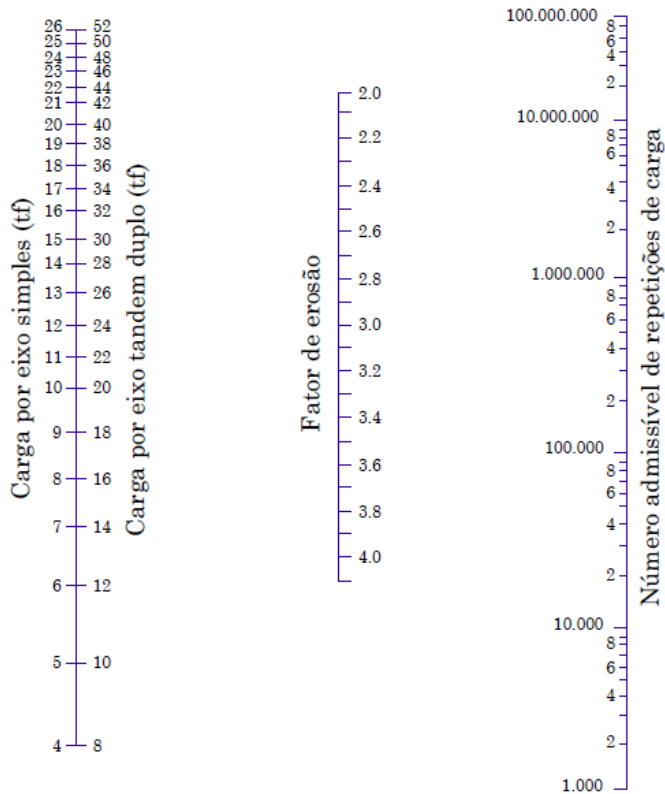
Fonte: DNER (1989) *apud* Oliveira (2000)

Figura A.2 - Número Admissível de repetições em função do fator de erosão – com acostamento de Concreto.



Fonte: DNER (1989) *apud* Oliveira (2000)

Figura A.3 - Número Admissível de repetições em função do fator de erosão – sem acostamento de Concreto.



Fonte: DNER (1989) *apud* Oliveira (2000)

ANEXO B – Tabelas para o método de dimensionamento PCA (1984)

Tabela A.1 - Tensão Equivalente - sem acostamento de concreto.

h	k do sistema subleito – sub-base (MPa/m)																	
	20			40			60			80			140			180		
	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT
10	5,42	4,39	3,36	4,75	3,83	3,10	4,38	3,59	3,02	4,13	3,44	2,98	3,66	3,22	2,94	3,45	3,15	2,93
11	4,47	3,88	2,92	4,16	3,35	2,64	3,85	3,12	2,55	3,63	2,97	2,50	3,23	2,76	2,45	3,06	2,68	2,44
12	4,19	3,47	2,60	3,69	2,98	2,30	3,41	2,75	2,20	3,23	2,62	2,14	2,88	2,40	2,08	2,73	2,33	2,07
13	3,75	3,14	2,35	3,30	2,68	2,04	3,06	2,46	1,93	2,89	2,33	1,87	2,59	2,13	1,80	2,46	2,05	1,78
14	3,37	2,87	2,15	2,97	2,43	1,83	2,76	2,23	1,72	2,61	2,10	1,65	2,34	1,90	1,58	2,23	1,83	1,55
15	3,06	2,64	1,99	2,70	2,23	1,67	2,51	2,04	1,55	2,37	1,92	1,48	2,13	1,72	1,40	2,03	1,65	1,37
16	2,79	2,45	1,85	2,47	2,06	1,54	2,29	1,87	1,41	2,17	1,76	1,34	1,95	1,57	1,25	1,86	1,50	1,23
17	2,56	2,28	1,73	2,26	1,91	1,43	2,10	1,74	1,30	1,99	1,63	1,23	1,80	1,45	1,14	1,71	1,38	1,11
18	2,37	2,14	1,62	2,09	1,79	1,34	1,94	1,62	1,21	1,84	1,51	1,14	1,66	1,34	1,04	1,58	1,27	1,01
19	2,19	2,01	1,53	1,94	1,67	1,26	1,80	1,51	1,13	1,71	1,41	1,06	1,54	1,25	0,96	1,47	1,18	0,92
20	2,04	1,90	1,45	1,80	1,58	1,19	1,67	1,42	1,07	1,59	1,33	0,99	1,43	1,17	0,89	1,37	1,11	0,85
21	1,91	1,79	1,37	1,68	1,49	1,13	1,56	1,34	1,01	1,48	1,25	0,93	1,34	1,10	0,83	1,28	1,04	0,79
22	1,79	1,70	1,30	1,57	1,41	1,07	1,46	1,27	0,95	1,39	1,18	0,88	1,26	1,03	0,78	1,20	0,98	0,74
23	1,68	1,62	1,24	1,48	1,34	1,02	1,38	1,21	0,91	1,31	1,12	0,84	1,18	0,98	0,73	1,13	0,92	0,70
24	1,58	1,55	1,18	1,39	1,28	0,97	1,30	1,15	0,87	1,23	1,06	0,80	1,11	0,93	0,69	1,06	0,87	0,66
25	1,49	1,48	1,13	1,32	1,22	0,93	1,22	1,09	0,83	1,16	1,01	0,76	1,05	0,88	0,66	1,00	0,83	0,62
26	1,41	1,41	1,07	1,25	1,17	0,89	1,16	1,05	0,79	1,10	0,97	0,73	0,99	0,84	0,63	0,95	0,79	0,59
27	1,34	1,36	1,02	1,18	1,12	0,86	1,10	1,00	0,76	1,04	0,93	0,70	0,94	0,80	0,60	0,90	0,75	0,57
28	1,28	1,30	0,98	1,12	1,07	0,82	1,04	0,96	0,73	0,99	0,89	0,67	0,89	0,77	0,58	0,86	0,72	0,54
29	1,22	1,25	0,93	1,07	1,03	0,79	0,99	0,92	0,71	0,94	0,85	0,65	0,85	0,74	0,55	0,81	0,69	0,52
30	1,16	1,21	0,89	1,02	0,99	0,76	0,95	0,89	0,68	0,90	0,82	0,63	0,81	0,71	0,53	0,78	0,66	0,50
31	1,11	1,16	0,85	0,97	0,96	0,73	0,90	0,86	0,66	0,86	0,79	0,60	0,77	0,68	0,51	0,74	0,64	0,48
32	1,06	1,12	0,81	0,93	0,92	0,70	0,86	0,83	0,63	0,82	0,76	0,58	0,74	0,66	0,50	0,71	0,62	0,46
33	1,02	1,09	0,77	0,89	0,89	0,68	0,83	0,80	0,61	0,78	0,74	0,56	0,71	0,63	0,48	0,68	0,59	0,45
34	0,98	1,05	0,73	0,85	0,86	0,65	0,79	0,77	0,59	0,75	0,71	0,55	0,68	0,61	0,46	0,65	0,57	0,43
35	0,94	1,02	0,70	0,82	0,84	0,63	0,76	0,75	0,57	0,72	0,69	0,53	0,65	0,59	0,45	0,62	0,55	0,42

ES – eixo simples; TD – eixo tandem duplo; TT – eixo tandem triplo

Fonte: Pitta (1996) *apud* Oliveira (2000)

Tabela A.2 - Tensão Equivalente - com acostamento de concreto.

H	k do sistema subleito – sub-base (MPa/m)																	
	20			40			60			80			140			180		
	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT
10	4,18	3,48	2,87	3,65	3,10	2,67	3,37	2,94	2,60	3,19	2,85	2,57	2,85	2,74	2,56	2,72	2,72	2,57
11	3,68	3,07	2,50	3,23	2,71	2,29	2,99	2,56	2,22	2,83	2,47	2,18	2,55	2,35	2,16	2,43	2,32	2,16
12	3,28	2,75	2,20	2,88	2,41	2,00	2,67	2,26	1,93	2,54	2,17	1,89	2,29	2,05	1,85	2,19	2,02	1,85
13	2,95	2,49	1,97	2,60	2,17	1,78	2,41	2,02	1,70	2,29	1,94	1,66	2,07	1,82	1,61	1,99	1,78	1,61
14	2,68	2,27	1,78	2,36	1,97	1,59	2,19	1,83	1,52	2,08	1,75	1,48	1,89	1,63	1,43	1,81	1,59	1,42
15	2,44	2,08	1,62	2,15	1,80	1,44	2,00	1,67	1,37	1,90	1,59	1,33	1,73	1,48	1,27	1,66	1,44	1,26
16	2,24	1,93	1,49	1,97	1,66	1,32	1,84	1,53	1,24	1,75	1,46	1,20	1,59	1,35	1,15	1,53	1,31	1,13
17	2,06	1,79	1,38	1,82	1,54	1,21	1,70	1,42	1,14	1,62	1,35	1,10	1,48	1,24	1,04	1,42	1,20	1,03
18	1,91	1,67	1,28	1,69	1,43	1,12	1,57	1,32	1,05	1,50	1,25	1,01	1,37	1,15	0,96	1,32	1,11	0,94
19	1,77	1,57	1,19	1,57	1,34	1,04	1,46	1,23	0,98	1,40	1,17	0,94	1,28	1,07	0,88	1,23	1,03	0,86
20	1,65	1,48	1,12	1,46	1,26	0,98	1,37	1,16	0,91	1,30	1,10	0,87	1,19	1,00	0,82	1,15	0,96	0,80
21	1,55	1,40	1,05	1,37	1,19	0,92	1,28	1,09	0,85	1,22	1,03	0,81	1,12	0,93	0,76	1,08	0,90	0,74
22	1,45	1,32	0,99	1,29	1,12	0,86	1,20	1,03	0,80	1,15	0,97	0,76	1,05	0,88	0,71	1,01	0,85	0,69
23	1,37	1,26	0,93	1,21	1,07	0,81	1,13	0,98	0,76	1,08	0,92	0,72	0,99	0,83	0,67	0,96	0,80	0,65
24	1,29	1,20	0,88	1,15	1,01	0,77	1,07	0,93	0,71	1,02	0,87	0,68	0,94	0,79	0,63	0,90	0,76	0,61
25	1,22	1,14	0,84	1,08	0,97	0,73	1,01	0,88	0,68	0,97	0,83	0,64	0,89	0,75	0,59	0,86	0,72	0,57
26	1,16	1,09	0,79	1,03	0,92	0,70	0,96	0,84	0,64	0,92	0,79	0,61	0,84	0,71	0,56	0,81	0,68	0,54
27	1,10	1,04	0,75	0,98	0,88	0,66	0,91	0,81	0,61	0,87	0,76	0,58	0,80	0,68	0,53	0,77	0,65	0,52
28	1,05	1,00	0,72	0,93	0,85	0,63	0,87	0,77	0,59	0,83	0,73	0,56	0,76	0,65	0,51	0,74	0,62	0,49
29	1,00	0,96	0,68	0,89	0,81	0,60	0,83	0,74	0,56	0,79	0,70	0,53	0,73	0,62	0,49	0,70	0,60	0,47
30	0,95	0,93	0,65	0,85	0,78	0,58	0,79	0,71	0,54	0,76	0,67	0,51	0,70	0,60	0,46	0,67	0,57	0,45
31	0,91	0,89	0,62	0,81	0,75	0,55	0,76	0,69	0,51	0,72	0,64	0,49	0,67	0,58	0,44	0,64	0,55	0,43
32	0,87	0,86	0,59	0,78	0,73	0,53	0,73	0,66	0,49	0,69	0,62	0,47	0,64	0,55	0,43	0,62	0,53	0,41
33	0,84	0,83	0,57	0,74	0,70	0,51	0,70	0,64	0,47	0,67	0,60	0,45	0,61	0,53	0,41	0,59	0,51	0,39
34	0,80	0,80	0,54	0,71	0,68	0,49	0,67	0,62	0,46	0,64	0,58	0,43	0,59	0,52	0,39	0,57	0,49	0,38
35	0,77	0,78	0,52	0,69	0,66	0,47	0,64	0,60	0,44	0,61	0,56	0,42	0,57	0,50	0,38	0,55	0,47	0,36

ES – eixo simples; TD – eixo tandem duplo; TT – eixo tandem triplo

Fonte: Pitta (1996) *apud* Oliveira (2000)

Tabela A.3 - Fator de erosão - sem acostamento e sem barra de transferência.

h	k do sistema subleito – sub-base (MPa/m)																	
	20			40			60			80			140			180		
	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT
10	3,94	4,00	4,03	3,92	3,93	3,93	3,90	3,90	3,88	3,88	3,88	3,84	3,84	3,84	3,75	3,80	3,82	3,70
11	3,82	3,90	3,93	3,79	3,82	3,84	3,78	3,79	3,78	3,76	3,76	3,74	3,72	3,72	3,66	3,69	3,70	3,61
12	3,71	3,81	3,85	3,68	3,73	3,75	3,67	3,69	3,70	3,65	3,66	3,66	3,62	3,62	3,57	3,59	3,59	3,53
13	3,61	3,73	3,77	3,58	3,65	3,68	3,56	3,60	3,62	3,55	3,57	3,58	3,52	3,52	3,50	3,50	3,49	3,45
14	3,52	3,66	3,70	3,49	3,57	3,60	3,47	3,52	3,55	3,46	3,49	3,51	3,43	3,43	3,42	3,41	3,41	3,38
15	3,43	3,59	3,64	3,40	3,50	3,54	3,38	3,45	3,48	3,37	3,42	3,44	3,34	3,36	3,36	3,32	3,33	3,32
16	3,35	3,53	3,58	3,32	3,43	3,47	3,30	3,38	3,42	3,29	3,35	3,38	3,26	3,28	3,29	3,24	3,26	3,25
17	3,28	3,48	3,52	3,24	3,37	3,42	3,22	3,32	3,36	3,21	3,28	3,32	3,18	3,22	3,23	3,17	3,19	3,19
18	3,21	3,42	3,47	3,17	3,32	3,36	3,15	3,26	3,30	3,14	3,23	3,26	3,11	3,16	3,18	3,10	3,13	3,14
19	3,15	3,37	3,42	3,11	3,27	3,31	3,08	3,21	3,25	3,07	3,17	3,21	3,04	3,10	3,13	3,03	3,07	3,09
20	3,09	3,33	3,37	3,04	3,22	3,26	3,02	3,16	3,20	3,01	3,12	3,16	2,98	3,05	3,08	2,96	3,01	3,04
21	3,04	3,28	3,33	2,99	3,17	3,22	2,96	3,11	3,16	2,95	3,07	3,11	2,92	3,00	3,03	2,90	2,96	2,99
22	2,98	3,24	3,29	2,93	3,13	3,18	2,90	3,07	3,11	2,89	3,03	3,07	2,86	2,95	2,99	2,85	2,92	2,95
23	2,93	3,20	3,25	2,88	3,09	3,13	2,85	3,03	3,07	2,83	2,98	3,03	2,80	2,91	2,94	2,79	2,87	2,91
24	2,89	3,16	3,21	2,83	3,05	3,10	2,80	2,99	3,03	2,78	2,94	2,99	2,75	2,86	2,90	2,74	2,83	2,86
25	2,84	3,13	3,17	2,78	3,01	3,06	2,75	2,95	2,99	2,73	2,91	2,95	2,70	2,82	2,87	2,69	2,79	2,83
26	2,80	3,09	3,14	2,73	2,98	3,02	2,70	2,91	2,96	2,69	2,87	2,91	2,65	2,79	2,83	2,64	2,75	2,79
27	2,76	3,06	3,10	2,69	2,94	2,99	2,66	2,88	2,92	2,64	2,83	2,88	2,61	2,75	2,79	2,59	2,71	2,75
28	2,72	3,03	3,07	2,65	2,91	2,96	2,62	2,84	2,89	2,60	2,80	2,85	2,56	2,71	2,76	2,55	2,68	2,72
29	2,68	3,00	3,04	2,61	2,88	2,92	2,58	2,81	2,86	2,56	2,77	2,81	2,52	2,68	2,73	2,50	2,64	2,69
30	2,65	2,97	3,01	2,57	2,85	2,89	2,54	2,78	2,83	2,52	2,74	2,78	2,48	2,65	2,69	2,46	2,61	2,65
31	2,61	2,94	2,98	2,54	2,82	2,87	2,50	2,75	2,80	2,48	2,71	2,75	2,44	2,62	2,66	2,42	2,58	2,62
32	2,58	2,91	2,96	2,50	2,79	2,84	2,47	2,72	2,77	2,44	2,68	2,72	2,40	2,59	2,63	2,38	2,55	2,59
33	2,55	2,89	2,93	2,47	2,77	2,81	2,43	2,70	2,74	2,41	2,65	2,70	2,36	2,56	2,61	2,35	2,52	2,57
34	2,52	2,86	2,91	2,44	2,74	2,78	2,40	2,67	2,72	2,37	2,62	2,67	2,33	2,53	2,58	2,31	2,49	2,54
35	2,49	2,84	2,88	2,41	2,71	2,76	2,37	2,65	2,69	2,34	2,60	2,64	2,29	2,51	2,55	2,28	2,47	2,51

ES – eixo simples; TD – eixo tandem duplo; TT – eixo tandem triplo

Fonte: Pitta (1996) *apud* Oliveira (2000)

Tabela A. 4 - Fator de erosão - sem acostamento e com barra de transferência.

h	k do sistema subleito – sub-base (MPa/m)																	
	20			40			60			80			140			180		
	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT
10	3,76	3,83	3,86	3,75	3,79	3,80	3,74	3,77	3,75	3,74	3,76	3,71	3,72	3,72	3,62	3,70	3,70	3,56
11	3,63	3,71	3,76	3,62	3,67	3,69	3,61	3,65	3,65	3,61	3,63	3,62	3,59	3,60	3,53	3,58	3,58	3,48
12	3,52	3,61	3,68	3,50	3,56	3,60	3,49	3,54	3,56	3,49	3,52	3,52	3,47	3,49	3,45	2,46	3,47	3,40
13	3,41	3,52	3,60	3,39	3,47	3,51	3,39	3,44	3,47	3,38	3,43	3,44	3,37	3,39	3,37	3,35	3,37	3,33
14	3,31	3,43	3,53	3,30	3,38	3,43	3,29	3,35	3,39	3,28	3,33	3,36	3,27	3,30	3,29	3,26	3,28	3,26
15	3,22	3,36	3,47	3,21	3,30	3,36	3,20	3,27	3,31	3,19	3,25	3,28	3,17	3,21	3,22	3,16	3,19	3,19
16	3,14	3,28	3,41	3,12	3,22	3,30	3,11	3,19	3,25	3,10	3,17	3,21	3,09	3,13	3,15	3,08	3,12	3,12
17	3,06	3,22	3,35	3,04	3,15	3,24	3,03	3,12	3,19	3,02	3,10	3,15	3,01	3,06	3,08	3,00	3,04	3,05
18	2,99	3,16	3,30	2,97	3,09	3,19	2,96	3,06	3,13	2,95	3,03	3,09	2,93	2,99	3,02	2,92	2,97	2,99
19	2,92	3,10	3,25	2,90	3,03	3,14	2,88	2,99	3,08	2,88	2,97	3,04	2,86	2,93	2,96	2,85	2,91	2,93
20	2,85	3,05	3,21	2,83	2,97	3,09	2,82	2,94	3,03	2,81	2,91	2,99	2,79	2,87	2,91	2,78	2,85	2,88
21	2,79	2,99	3,16	2,77	2,92	3,05	2,75	2,88	2,99	2,75	2,86	2,94	2,73	2,81	2,86	2,72	2,79	2,83
22	2,73	2,95	3,12	2,71	2,87	3,01	2,69	2,83	2,94	2,69	2,80	2,90	2,67	2,76	2,82	2,66	2,73	2,78
23	2,67	2,90	3,08	2,65	2,82	2,97	2,64	2,78	2,90	2,63	2,75	2,86	2,61	2,70	2,77	2,60	2,68	2,74
24	2,62	2,86	3,05	2,60	2,78	2,93	2,58	2,73	2,86	2,57	2,71	2,82	2,55	2,66	2,73	2,54	2,63	2,69
25	2,57	2,82	3,01	2,54	2,73	2,89	2,53	2,69	2,83	2,52	2,66	2,78	2,50	2,61	2,69	2,49	2,59	2,65
26	2,52	2,78	2,98	2,49	2,69	2,86	2,48	2,65	2,79	2,47	2,62	2,74	2,45	2,56	2,66	2,44	2,54	2,62
27	2,47	2,74	2,94	2,44	2,65	2,82	2,43	2,61	2,76	2,42	2,58	2,71	2,40	2,52	2,62	2,39	2,50	2,58
28	2,42	2,71	2,91	2,40	2,62	2,79	2,38	2,57	2,72	2,37	2,54	2,68	2,35	2,48	2,59	2,34	2,46	2,55
29	2,38	2,67	2,88	2,35	2,58	2,76	2,34	2,53	2,69	2,33	2,50	2,65	2,31	2,44	2,55	2,30	2,42	2,51
30	2,34	2,64	2,85	2,31	2,55	2,73	2,30	2,50	2,66	2,29	2,46	2,62	2,26	2,41	2,52	2,26	2,38	2,48
31	2,29	2,61	2,82	2,27	2,51	2,70	2,25	2,46	2,63	2,24	2,43	2,59	2,22	2,37	2,49	2,21	2,34	2,45
32	2,25	2,58	2,80	2,23	2,48	2,68	2,21	2,43	2,61	2,20	2,40	2,56	2,18	2,33	2,46	2,17	2,31	2,42
33	2,21	2,55	2,77	2,19	2,45	2,65	2,17	2,40	2,58	2,16	2,36	2,53	2,14	2,30	2,44	2,13	2,28	2,40
34	2,18	2,52	2,74	2,15	2,42	2,62	2,14	2,37	2,55	2,12	2,33	2,50	2,10	2,27	2,41	2,09	2,24	2,37
35	2,14	2,49	2,72	2,11	2,39	2,60	2,10	2,34	2,53	2,09	2,30	2,48	2,07	2,24	2,38	2,06	2,21	2,34

ES – eixo simples; TD – eixo tandem duplo; TT – eixo tandem triplo

Fonte: Pitta (1996) *apud* Oliveira (2000)

Tabela A. 5 - Fator de erosão - com acostamento e sem barra de transferência.

h	k do sistema subleito – sub-base (MPa/m)																	
	20			40			60			80			140			180		
	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT
10	3,45	3,45	3,44	3,41	3,36	3,35	3,39	3,33	3,30	3,38	3,31	3,27	3,34	3,28	3,22	3,31	3,27	3,19
11	3,34	3,36	3,36	3,30	3,27	3,26	3,28	3,22	3,20	3,27	3,20	3,17	3,23	3,16	3,12	3,20	3,15	3,09
12	3,24	3,28	3,29	3,20	3,18	3,18	3,18	3,13	3,12	3,16	3,11	3,09	3,13	3,06	3,02	3,11	3,04	2,99
13	3,15	3,21	3,23	3,11	3,11	3,11	3,08	3,05	3,05	3,07	3,02	3,01	3,04	2,97	2,94	3,02	2,95	2,91
14	3,07	3,15	3,17	3,02	3,04	3,04	3,00	2,98	2,98	2,98	2,95	2,94	2,95	2,89	2,87	2,93	2,86	2,83
15	2,99	3,09	3,12	2,94	2,98	2,99	2,92	2,91	2,92	2,90	2,88	2,88	2,87	2,82	2,80	2,85	2,79	2,77
16	2,91	3,04	3,08	2,87	2,92	2,94	2,84	2,86	2,87	2,83	2,82	2,82	2,80	2,75	2,74	2,78	2,72	2,70
17	2,85	2,99	3,03	2,80	2,87	2,89	2,77	2,81	2,82	2,76	2,77	2,77	2,73	2,69	2,69	2,71	2,66	2,65
18	2,78	2,94	2,99	2,73	2,82	2,85	2,71	2,76	2,77	2,69	2,71	2,72	2,66	2,64	2,63	2,64	2,61	2,60
19	2,73	2,90	2,96	2,67	2,77	2,81	2,64	2,71	2,73	2,63	2,67	2,68	2,60	2,59	2,59	2,58	2,55	2,55
20	2,67	2,86	2,93	2,61	2,73	2,77	2,59	2,67	2,69	2,57	2,62	2,64	2,54	2,54	2,54	2,52	2,51	2,50
21	2,62	2,82	2,89	2,56	2,69	2,74	2,53	2,63	2,65	2,51	2,58	2,60	2,48	2,50	2,50	2,47	2,46	2,46
22	2,57	2,78	2,87	2,51	2,66	2,71	2,48	2,59	2,62	2,46	2,54	2,56	2,43	2,46	2,47	2,41	2,42	2,42
23	2,52	2,75	2,84	2,46	2,62	2,68	2,43	2,55	2,59	2,41	2,50	2,53	2,38	2,42	2,43	2,36	2,38	2,38
24	2,47	2,72	2,81	2,41	2,59	2,65	2,38	2,52	2,56	2,36	2,47	2,50	2,33	2,38	2,40	2,31	2,34	2,35
25	2,43	2,69	2,79	2,37	2,55	2,62	2,34	2,48	2,53	2,32	2,43	2,47	2,28	2,35	2,37	2,27	2,31	2,32
26	2,39	2,66	2,77	2,33	2,52	2,60	2,29	2,45	2,50	2,27	2,40	2,44	2,24	2,31	2,34	2,22	2,27	2,29
27	2,35	2,63	2,74	2,28	2,49	2,57	2,25	2,42	2,48	2,23	2,37	2,42	2,20	2,28	2,31	2,18	2,24	2,26
28	2,31	2,60	2,72	2,25	2,47	2,55	2,21	2,39	2,46	2,19	2,34	2,39	2,16	2,25	2,28	2,14	2,21	2,23
29	2,28	2,58	2,70	2,21	2,44	2,53	2,17	2,37	2,43	2,15	2,32	2,37	2,12	2,22	2,26	2,10	2,18	2,20
30	2,24	2,55	2,68	2,17	2,41	2,51	2,14	2,34	2,41	2,12	2,29	2,35	2,08	2,19	2,23	2,06	2,15	2,18
31	2,21	2,53	2,67	2,14	2,39	2,49	2,10	2,31	2,39	2,08	2,26	2,33	2,04	2,17	2,21	2,02	2,13	2,16
32	2,18	2,50	2,65	2,11	2,36	2,47	2,07	2,29	2,37	2,05	2,24	2,31	2,01	2,14	2,19	1,99	2,10	2,13
33	2,15	2,48	2,63	2,07	2,34	2,45	2,04	2,27	2,35	2,01	2,21	2,29	1,97	2,12	2,17	1,95	2,07	2,11
34	2,12	2,46	2,61	2,04	2,32	2,43	2,01	2,24	2,33	1,98	2,19	2,27	1,94	2,09	2,15	1,92	2,05	2,09
35	2,09	2,44	2,60	2,01	2,30	2,42	1,97	2,22	2,32	1,95	2,17	2,25	1,91	2,07	2,13	1,89	2,03	2,07

ES – eixo simples; TD – eixo tandem duplo; TT – eixo tandem triplo

Fonte: Pitta (1996) *apud* Oliveira (2000)

Tabela A. 6 - Fator de erosão - com acostamento e com barra de transferência.

h	k do sistema subleito – sub-base (MPa/m)																	
	20			40			60			80			140			180		
	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT	ES	TD	TT
10	3,27	3,25	3,27	3,24	3,17	3,17	3,22	3,14	3,13	3,21	3,12	3,12	3,17	3,11	3,07	3,15	3,11	3,03
11	3,16	3,16	3,19	3,12	3,07	3,07	3,10	3,03	3,02	3,09	3,00	3,00	3,05	2,98	2,95	3,03	2,97	2,92
12	3,05	3,08	3,12	3,01	2,98	2,99	2,99	2,93	2,93	2,98	2,90	2,90	2,94	2,86	2,85	2,92	2,84	2,82
13	2,96	3,01	3,06	2,92	2,90	2,92	2,89	2,85	2,85	2,88	2,81	2,81	2,84	2,76	2,76	2,82	2,74	2,73
14	2,87	2,94	3,00	2,82	2,83	2,86	2,80	2,77	2,78	2,78	2,74	2,74	2,75	2,67	2,67	2,73	2,65	2,64
15	2,79	2,88	2,95	2,74	2,77	2,80	2,72	2,71	2,73	2,70	2,67	2,67	2,67	2,60	2,59	2,65	2,57	2,56
16	2,71	2,82	2,91	2,66	2,71	2,76	2,64	2,65	2,67	2,62	2,60	2,62	2,59	2,53	2,52	2,57	2,50	2,49
17	2,64	2,77	2,86	2,59	2,65	2,71	2,57	2,59	2,62	2,55	2,55	2,57	2,51	2,46	2,47	2,49	2,43	2,43
18	2,57	2,72	2,82	2,52	2,60	2,67	2,50	2,54	2,58	2,48	2,49	2,52	2,44	2,41	2,41	2,42	2,37	2,37
19	2,51	2,67	2,79	2,46	2,56	2,63	2,43	2,49	2,54	2,41	2,44	2,48	2,38	2,35	2,37	2,36	2,32	2,32
20	2,45	2,63	2,75	2,40	2,51	2,59	2,37	2,44	2,50	2,35	2,40	2,44	2,31	2,31	2,32	2,30	2,27	2,28
21	2,39	2,58	2,72	2,34	2,47	2,56	2,31	2,40	2,47	2,29	2,35	2,40	2,26	2,26	2,28	2,24	2,22	2,23
22	2,34	2,54	2,68	2,29	2,43	2,53	2,26	2,36	2,43	2,24	2,31	2,37	2,20	2,22	2,25	2,18	2,18	2,20
23	2,29	2,50	2,65	2,23	2,39	2,49	2,21	2,32	2,40	2,19	2,27	2,34	2,15	2,18	2,21	2,13	2,13	2,16
24	2,24	2,46	2,62	2,18	2,35	2,46	2,16	2,28	2,37	2,13	2,23	2,31	2,10	2,14	2,18	2,08	2,10	2,13
25	2,19	2,43	2,59	2,14	2,31	2,44	2,11	2,24	2,34	2,09	2,20	2,28	2,05	2,10	2,15	2,03	2,06	2,10
26	2,15	2,39	2,57	2,09	2,28	2,41	2,06	2,21	2,32	2,04	2,16	2,25	2,00	2,07	2,12	1,98	2,02	2,07
27	2,10	2,36	2,54	2,05	2,24	2,38	2,02	2,18	2,29	2,00	2,13	2,22	1,96	2,03	2,10	1,94	1,99	2,04
28	2,06	2,32	2,51	2,01	2,21	2,36	1,98	2,14	2,26	1,95	2,10	2,20	1,91	2,00	2,07	1,89	1,96	2,01
29	2,20	2,29	2,49	1,97	2,18	2,33	1,93	2,11	2,24	1,91	2,06	2,17	1,87	1,97	2,04	1,85	1,93	1,99
30	1,98	2,26	2,47	1,93	2,15	2,31	1,90	2,08	2,22	1,87	2,03	2,15	1,83	1,94	2,02	1,81	1,90	1,96
31	1,95	2,23	2,44	1,89	2,12	2,29	1,86	2,05	2,19	1,84	2,01	2,13	1,79	1,91	2,00	1,77	1,87	1,94
32	1,91	2,20	2,42	1,85	2,09	2,26	1,82	2,03	2,17	1,80	1,98	2,10	1,76	1,88	1,97	1,74	1,84	1,92
33	1,87	2,17	2,40	1,82	2,06	2,24	1,78	2,00	2,15	1,76	1,95	2,08	1,72	1,86	1,95	1,70	1,81	1,89
34	1,84	2,15	2,38	1,78	2,04	2,22	1,75	1,97	2,13	1,73	1,92	2,06	1,69	1,83	1,93	1,67	1,79	1,87
35	1,81	2,12	2,36	1,75	2,01	2,20	1,72	1,95	2,11	1,69	1,90	2,04	1,65	1,80	1,91	1,63	1,76	1,85

ES – eixo simples; TD – eixo tandem duplo; TT – eixo tandem triplo

Fonte: Pitta (1996) *apud* Oliveira (2000)