



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

Sobre a Estimativa de Produção de Equipamentos de Construção de Pavimentos Rodoviários

Autor: Wilbert Raymundo Ríos Sotomayor

Campinas - SP
2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Wilbert Raymundo Ríos Sotomayor

**Sobre a Estimativa de Produção de
Equipamentos de Construção de Pavimentos Rodoviários**

Dissertação apresentada à comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de transportes.

Orientador: prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva

Campinas - SP
2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA – BAE – UNICAMP

R479s	<p>Ríos Sotomayor, Wilbert Raymundo Sobre a Estimativa de Produção de Equipamentos de Construção de Pavimentos Rodoviários / Wilbert Raymundo Ríos Sotomayor.--Campinas, SP: [s.n.], 2008.</p> <p>Orientador: Cássio Eduardo Lima de Paiva Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.</p> <p>1. Pavimentos de concreto asfáltico. 2. Pavimentos flexíveis. 3. Máquinas para a construção civil. 4. Planejamento da produção. I. Paiva, Cássio Eduardo Lima de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.</p>
-------	---

Título em inglês: *About the estimative of production of construction equipments
for road pavement*

Palavras-chave em inglês: *Pavement, Construction Equipment, Estimative of
Production*

Área de concentração: transportes

Titulação: mestre em engenharia civil

Banca examinadora: Carlos Alberto Bandeira Guimarães, Antonio Clóvis Pinto
Ferraz

Data da defesa: 29/02/2008

Programa de pós-graduação: engenharia civil

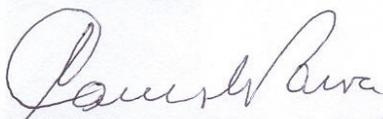
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

Wilbert Raymundo Ríos Sotomayor

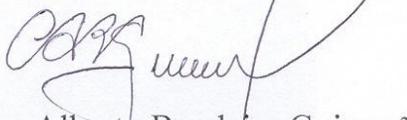
**Sobre a Estimativa de Produção de
Equipamentos de construção de pavimentos rodoviários**

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

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Cássio Eduardo Lima de Paiva
UNICAMP



Prof. Dr. Carlos Alberto Bandeira Guimarães
UNICAMP



Prof. Dr. Antonio Clóvis Pinto Ferraz
USP - SC

Campinas, 29 de Fevereiro de 2008

Dedicatória

A minhas filhas Alexandra e Almendra, aos meus pais e a minha esposa.

RESUMO

RIOS S, Wilbert R. “**Equipamentos de Construção de Pavimentos Rodoviários – Estimativa de Produção**”. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007, 138 pág. Dissertação de Mestrado.

Para o desenvolvimento de um projeto rodoviário, é conhecida a grande incidência de custos que tem os equipamentos empregados para a sua construção. Um fator importante para a otimização de custos neste tipo de empreendimentos é apresentado neste trabalho, já que há quantidade insuficiente de uma literatura clara e concisa sobre a produção de alguns equipamentos.

Este estudo tem como objetivo identificar, descrever e analisar as diversas variáveis, que condicionam o desempenho dos equipamentos empregados na execução de bases e revestimentos de pavimentos flexíveis, propor métodos e criar ábacos para a fácil determinação da produção dos mesmos.

Conhecendo a interação das variáveis será mais simples que engenheiros ligados ao projeto, execução e manutenção de rodovias tomem uma decisão acertada.

Palavras-chave: Pavimentação, Equipamentos de Construção, Estimativa de Produção.

ABSTRACT

RIOS S, Wilbert R. “*About the Estimative of Production of Construction Equipments for Road Pavement*”. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007, 138 pág. Dissertação de Mestrado.

In the development of a road project, it is known that one of the most significant contributors for the high costs are the equipments used for its construction. As there are few clear and concise literatures about production of some equipments, important factors in cost optimization in this type of enterprises will be presented in this work.

The objective of this study is to identify, describe and analyze several variables that influence the equipment performance used in the execution of bases course and surfacing course of flexible pavement, propose methods and create abacs that provide an easy determination of equipment production.

By knowing the interaction of the variables, it becomes easier to engineers who work in project, execution and maintenance of highways to take a more accurate decision.

Key words: Pavement, Construction Equipment, Estimative of Production.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE NOTAÇÕES E ABREVIATURAS.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos do trabalho	3
1.3. Justificativa do tema escolhido.....	4
2. TIPOS DE CAMADAS EXECUTADAS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	7
2.1. Pavimento rodoviário	7
2.2. Camadas constituintes do pavimento	10
2.2.1. Regularização do subleito	10
2.2.2. Reforço de subleito.....	11
2.2.3. Sub-base	11
2.2.4. Base	13
2.2.5. Revestimento.....	15
3. EQUIPAMENTOS PARA A EXECUÇÃO DE CAMADAS VIÁRIAS E SUA ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO.....	25
3.1. Principais equipamentos por tipo de serviço	25
3.2. Produção dos equipamentos estudados.....	32
3.2.1. Motoniveladoras.....	32
3.2.2. Rolos compactadores.....	37

3.2.3.	Distribuidor ou caminhão espargidor de asfalto	45
3.2.4.	Pavimentadoras de asfalto.....	49
3.2.5.	Usinas de asfalto.....	54
4.	ANÁLISE CRÍTICA ÀS VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO	75
4.1.	Considerações iniciais	75
4.2.	Motoniveladoras	75
4.3.	Rolos compactadores	83
4.4.	Distribuidor de asfalto	96
4.5.	Pavimentadora de asfalto.....	97
4.6.	Usina de asfalto	103
5.	APLICAÇÃO PRÁTICA DAS EQUAÇÕES DE PRODUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS RODOVIÁRIOS.....	113
5.1.	Espalhamento e compactação de camadas de solos.	114
5.1.1.	Estimativa de produção da motoniveladora	114
5.1.2.	Estimativa de produção do rolo compactador para solos.....	116
5.2.	Produção, espalhamento e compactação de camadas betuminosas a quente. 117	
5.2.1.	Estimativa de produção da usina de asfalto	117
5.2.2.	Estimativa de produção do distribuidor de asfalto	117
5.2.3.	Estimativa de produção da pavimentadora de asfalto	118
5.2.4.	Estimativa de produção dos rolos compactadores de asfalto	119
5.2.5.	Estimativa de produção dos rolos pneumáticos de asfalto	120
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	123
6.1.	Avaliação do trabalho desenvolvido.....	123
6.2.	Sugestões para futuras pesquisas.....	125
7.	BIBLIOGRAFIA	127
7.1.	Referências bibliográficas	127
7.2.	Catálogos técnicos consultados	132
7.3.	Bibliografia de apoio e consulta	137

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 – Principais partes conformantes de uma motoniveladora.....	33
Figura 3.2 – Motoniveladora no trabalho de regularização de camadas do pavimento.	34
Figura 3.3 – Rolos pé-de-carneiro durante o processo de compactação de camadas viárias.	39
Figura 3.4 – Rolo liso tandem durante o processo de compactação de uma camada asfáltica.....	41
Figura 3.5 – Rolo pneumático durante o processo de compactação de uma camada asfáltica.	42
Figura 3.6 – Distribuidores de asfalto com barra espargidora.....	47
Figura 3.7 – Partes conformantes da pavimentadora de asfalto.	50
Figura 3.8 – Pavimentadora de esteiras colocando mistura asfáltica.	51
Figura 3.9 – Fluxograma de uma usina gravimétrica ou descontínua.	56
Figura 3.10 – Fluxograma de uma usina volumétrica ou contínua.	57
Figura 3.11 – Fluxograma de uma usina <i>Drum Mixer</i>	62
Figura 3.12 – Misturador de tambor de fluxo paralelo.....	62
Figura 3.13 – Misturador de tambor contrafluxo.	63
Figura 4.1 – Técnica empregada pela motoniveladora - passagem da lâmina em trajeto de ida ..	77
Figura 4.2 – Técnica empregada pela motoniveladora - passagem contínua da lâmina entre o início e o término da área a ser regularizada	77
Figura 4.3 – Ábaco da capacidade de produção bruta de uma motoniveladora com velocidade média de 15 km/h e largura da lâmina de 3,658 metros.	82
Figura 4.4 – Ábaco da capacidade de produção bruta de uma motoniveladora com velocidade média de 15 km/h e largura da lâmina de 4,267 metros.	83
Figura 4.5 – Operação típica de compactação.....	85

Figura 4.6 – Ábaco da capacidade de produção bruta de um rolo compactador de solos com velocidade média de 5 km/h e largura de compactação de 1,65 metro.	94
Figura 4.7 – Ábaco da capacidade de produção bruta de um rolo compactador de asfalto com velocidade média de 4,5 km/h e largura de compactação de 1,65 metro.	95
Figura 4.8 – Ábaco da capacidade de produção bruta de um rolo pneumático de asfalto com velocidade média de 5,5 km/h e largura de compactação de 1,90 metro.	96
Figura 4.9 – Ábaco da capacidade de produção bruta de uma pavimentadora de asfalto para uma densidade de compactação de 2,4 ton./m ³ e largura de pavimentação de 3,70 metros.	103
Figura 4.10 – Ábaco da capacidade de produção de uma usina de asfalto com diferentes diâmetros de secador contrafluxo (ton./h) para diferentes umidades do agregado.	109
Figura 4.11 – Ábaco da capacidade de produção de uma usina de asfalto secador contrafluxo (ton./h) para diferentes umidades do agregado e temperaturas de descarga do material.	110
Figura 4.12 – Ábaco da capacidade de produção de uma usina de asfalto com diferentes diâmetros de secador fluxo paralelo (ton./h) para diferentes umidades do agregado.	111
Figura 4.13 – Ábaco da capacidade de produção de uma usina de asfalto secador fluxo paralelo (ton./h) para diferentes umidades do agregado e temperaturas de descarga do material.	112

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 – Base classificatória para pavimentos.	9
Tabela 2.2 – Tipo de material - camadas constituintes dos pavimentos flexíveis.....	22
Tabela 2.3 – Etapa construtiva - camadas constituintes dos pavimentos flexíveis.	23
Tabela 3.1 – Equipamentos por tipo de serviço – mistura na pista.	26
Tabela 3.2 – Equipamentos por tipo de serviço – mistura na usina.	27
Tabela 3.3 – Equipamentos por tipo de serviço – carga e transporte.	28
Tabela 3.4 – Equipamentos por tipo de serviço – espalhamento.....	29
Tabela 3.5 – Equipamentos por tipo de serviço – compactação.....	30
Tabela 3.6 – Equipamentos por tipo de serviço – acabamento.	31
Tabela 3.7 – <i>Speed Number</i> para uso na equação da velocidade da pavimentadora.	54
Tabela 3.8 – Espessura típicas de colocação de misturas betuminosas considerando o empolamento.	54
Tabela 3.9 – Máximos valores de fluxo de gás recomendados para secadores contrafluxo.	66
Tabela 3.10 – Máximos valores de fluxo de gás recomendados para secadores fluxo paralelo. ..	67
Tabela 3.11 – Efeito do excesso de ar, no secador e na demanda de calor requerido.....	69
Tabela 3.12 – Taxa de produção esperada para secador contrafluxo.	71
Tabela 3.13 – Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo.	72
Tabela 4.1 - Características Técnicas das Motoniveladoras.....	80
Tabela 4.2 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção das motoniveladoras....	81
Tabela 4.3 – Variáveis de produção recomendados para as motoniveladoras.	81
Tabela 4.4 - Características técnicas dos rolos pé-de-carneiro.....	86

Tabela 4.5 – Características técnicas de rolos lisos para solos.....	87
Tabela 4.6 – Características técnicas dos rolos lisos para asfalto.	88
Tabela 4.7 – Características técnicas dos rolos pneumáticos	89
Tabela 4.8 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção dos compactadores vibratórios de solos.....	90
Tabela 4.9 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção dos compactadores vibratórios de asfalto.	91
Tabela 4.10 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção dos compactadores estáticos lisos e pneumáticos.....	92
Tabela 4.11 – Variáveis de produção recomendados para os rolos compactadores.....	93
Tabela 4.12 – Características técnicas do distribuidor de asfalto.....	97
Tabela 4.13 - Características técnicas das pavimentadoras de rodas.	99
Tabela 4.14 – Características técnicas das pavimentadoras de esteiras.	100
Tabela 4.15 – Características técnicas das pavimentadoras de esteiras (continuação).	101
Tabela 4.16 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção das pavimentadoras de asfalto.	102
Tabela 4.17 – Variáveis de produção recomendados para as pavimentadoras de asfalto.	102
Tabela 4.18 - Características técnicas da usina de asfalto gravimétrica ou descontínua.....	105
Tabela 4.19 - Características técnicas da usina de asfalto contínua contra - fluxo.	105
Tabela 4.20 - Características técnicas da usina de asfalto contínua <i>Drum Mixer</i>	106
Tabela 4.21 – Taxa de produção esperada para secador contrafluxo com 3% de umidade do agregado e diâmetros comerciais do secador.	107
Tabela 4.22 – Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo com 3% de umidade do agregado e diâmetros comerciais do secador.	108
Tabela 4.23 – Taxa de produção esperada para secador contrafluxo (ton./h) para diferentes umidades do agregado.	109
Tabela 4.24 – Taxa de produção esperada para secador contrafluxo (ton./h) para diferentes temperaturas de descarga do material.....	110
Tabela 4.25 – Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo (ton./h) para diferentes umidades do agregado.	111

Tabela 4.26 – Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo (ton./h) para diferentes temperaturas de descarga do material.....	112
--	-----

LISTA DE NOTAÇÕES E ABREVIATURAS

AAPA	<i>Australian Asphalt Pavement Association</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BGS	Brita Graduada Simples
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
C	Comprimento da área de trabalho
$C_{\text{queimador}}$	Capacidade do queimador da usina de asfalto
Cr	Calor requerido para a produção da mistura asfáltica quente
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DER-SP	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, atual DNIT
DNER-ES	Especificação de Serviço do DNER
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
D	Distância percorrida avante ou a ré pelo equipamento
E	Eficiência do equipamento
FAÇO	Fábrica de Aço Paulista S.A.
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
L	Largura da área de trabalho
l	Largura efetiva da área de trabalho proporcionada pelo equipamento
lt	Total de litros a serem aplicados pelo distribuidor de asfalto
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>

NBR	Norma Brasileira Registrada
N	Número de passadas do equipamento para cumprir um determinado trabalho
PMSP	Prefeitura do Município de São Paulo
ρ	Densidade da mistura asfáltica compactada
Q	Produção do equipamento
q	Vazão da barra distribuidora de asfalto
r	Raio do secador da usina de asfalto
SAFL	Solo Arenoso Fino Laterítico
SBS	Estireno – butadieno – estireno
T	Tempo empregado por um equipamento numa determinada operação
t	Taxa de aplicação da barra do distribuidor de asfalto
TB	<i>Bituminous Materials of Pavement – Terminology</i>
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
V	Velocidade do equipamento
$V_{\text{gás}}$	Fluxo de gás para o secador da usina de asfalto
v	Velocidade do gás no secador da usina de asfalto
Vv	Volume de ventilação requerido no secador da usina de asfalto
w.g.	<i>“inches of water gauge”</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A opção pela modalidade rodoviária como principal meio de transporte de carga é um fenômeno que se observa em nível mundial desde a década de 1950, tendo como base a expansão da indústria automobilística associada aos baixos preços dos combustíveis derivados do petróleo.

No Brasil, a ênfase no transporte rodoviário, que se consolida à mesma época, está associada à implantação da indústria automobilística no País e à mudança da capital para a Região Centro-Oeste, que foram acompanhadas de um vasto programa de construção de rodovias.

A construção de rodovias tem um papel vital para o escoamento da produção agrícola e industrial, sendo, muitas vezes, a única opção para o transporte de mercadorias entre os centros produtores e consumidores, assim como até os portos e aeroportos.

Uma obra rodoviária se caracteriza por ter custos consideráveis na sua concepção e, principalmente, na sua execução. Um fator importante destes custos é a forte incidência da utilização de equipamentos pesados. Essa forte incidência ocorre tanto nos serviços de terraplenagem quanto nos de pavimentação.

O sucesso na execução de uma obra rodoviária (do ponto de vista técnico-econômico) depende da rapidez da construção da estrada. Esta produtividade é obtida alocando à obra uma quantidade maior de equipamentos e conhecida o real desempenho dos mesmos.

Atualmente, o planejamento da produção para um projeto dado se enfoca freqüentemente orientada à produtividade do equipamento alocado. Além disso, o planejamento financeiro de uma empreiteira começa sempre a partir do investimento em equipamentos, já que estes elementos constituem a maior inversão de capital a longo prazo.

A tarefa principal de um engenheiro de construção é fazer com que as operações sob sua responsabilidade sejam concluídas com um produto final satisfatório, de acordo com os planos e especificações, e ao custo menor possível. Um fator determinante, ao se planejar a aquisição do equipamento para a construção, é o seu custo total, que compreende não só o investimento original de aquisição, mas, também, o custo de operação, reparação e conservação do equipamento.

Com os avanços tecnológicos alcançados nas últimas décadas no setor de máquinas pesadas, para cada serviço da área rodoviária existe no mercado um tipo de equipamento especialmente fabricado para atender às exigências de ordem técnica e operacional requeridas para as mais variadas atividades.

Dependendo do porte do empreendimento rodoviário e do orçamento programado, há maior ou menor acessibilidade aos equipamentos requeridos. No caso da grande maioria dos municípios brasileiros, que não possuem os recursos necessários para adquirir e manter um conjunto mínimo de equipamentos necessários para a manutenção de estradas rurais, estando, portanto, limitados à sua acessibilidade aos equipamentos de última geração e ao aproveitamento das vantagens tecnológicas.

Considerando-se os custos para a execução de rodovias e sabendo-se da forte incidência dos equipamentos no desenvolvimento dos mesmos, existe a necessidade dos engenheiros rodoviários em contar com uma ferramenta que ajude na determinação (valor mais exato possível) da produção dos equipamentos mínimos necessários para a construção de pavimentos asfálticos rodoviários.

1.2. Objetivos do trabalho

Este trabalho tem o objetivo de identificar, descrever e analisar as variáveis que influenciam na produção dos equipamentos empregados na construção de bases e revestimentos de pavimentos flexíveis. Os equipamentos analisados são os seguintes:

- Motoniveladoras;
- Rolos compactadores de solo e asfalto;
- Distribuidores de asfalto;
- Pavimentadoras de concreto asfáltico;
- Usinas de asfalto.

A pesquisa bibliográfica realizada foi baseada em livros, especificações técnicas, catálogos e manuais dos fabricantes de maquinarias, e pretende organizar de forma consistente e sistemática o conhecimento disponível na literatura técnica sobre o assunto, obtendo como resultado um documento que apresenta:

- As fórmulas de produção dos equipamentos em estudo;
- As características técnicas e parâmetros que influem na produção;
- Uma análise comparativa entre os equipamentos existentes no mercado brasileiro, avaliando as compatibilidades e discordâncias dos diferentes fabricantes;
- A formulação de ábacos que ajudem na determinação da estimativa de produção dos equipamentos, sendo consideradas a série de variáveis determinadas;

- A metodologia de aplicação prática para a determinação da produção desses equipamentos.

1.3. Justificativa do tema escolhido

A estimativa de produção dos equipamentos empregados na construção rodoviária não é um processo preciso, pois, além de depender de diversos parâmetros de difícil determinação, ainda há outros fatores aleatórios que influem de forma decisiva no desempenho das máquinas.

Para os cálculos da estimativa de produção, obriga-se a recorrer, muitas vezes, a julgamentos ou opiniões pessoais baseados em experiência anterior para se obter resultados corretos, se comparados, posteriormente, com a realidade. (HELIO DE SOUZA e CATALANI G. 2002).

Uma vez conhecidos a natureza e o prazo do serviço a ser executado é necessário o uso de equipamentos adequados a tais condicionantes. Como os equipamentos têm custo inicial de aquisição muito elevado, o que demanda um alto investimento de capital, há necessidade de se utilizá-los corretamente, fazendo com que tenham a produção mais rentável possível.

A experiência mostra que vários parâmetros precisam ser conhecidos ou determinados para permitir a escolha da frota de máquinas mais indicada, o que resulta certa complexidade na solução do problema. Há de se considerar, também, que em muitos casos, pode haver mais de uma configuração de frota que satisfaça as condições vigentes, ficando a escolha ao arbítrio de critérios pessoais, econômicos e de cronograma. (HELIO DE SOUZA e CATALANI G.).

Em geral, cada equipamento tem uma produção teórica fornecida pelo fabricante, sendo essa produção considerada o seu valor máximo. Esse valor, normalmente apresentado nos catálogos técnicos dos fabricantes, não vem acompanhado das fórmulas empregadas para o cálculo do mesmo. Esse fato contribui para criar questionamentos quando, muitas vezes, a situação da obra difere das condições apresentadas nos catálogos.

Além disso, na atual bibliografia técnica disponível no País, não há um documento que resuma, apresente e oriente de forma ordenada e concisa como determinar a produção dos equipamentos analisados no presente trabalho, principalmente no caso das usinas de asfalto.

No desenvolvimento da vida profissional, depara-se com determinadas condições de campo que são, muitas vezes, resolvidas através da experiência de um determinado profissional, sem um embasamento teórico, mas em alto grau de empirismo.

Identificadas as variáveis que fazem parte da produção dos equipamentos rodoviários poderão ser geradas tabelas, gráficos ou ábacos que servirão como base ao trabalho de engenheiros ligados a projeto, construção e manutenção rodoviária, considerando sempre aspectos teóricos e científicos que deveriam ser os pilares de uma decisão de engenharia.

O desenvolvimento deste trabalho tem o objetivo de esclarecer estas lacunas descritas.

2. TIPOS DE CAMADAS EXECUTADAS EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

2.1. Pavimento rodoviário

A norma brasileira de pavimentação NBR - 11170 – Serviços de Pavimentação da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990) define:

“O pavimento é uma estrutura construída sobre o leito natural ou terrapleno de uma via, constituída de uma ou várias camadas, capaz de resistir às tensões geradas pelas cargas dos veículos e pelas variações ambientais, distribuí-las minoradas no subleito, e dar condições de conforto e segurança de rolamento.”

Segundo Hunter (1994), um pavimento rodoviário é uma estrutura complexa da engenharia, o qual tende a desempenhar um número de funções nem sempre compatíveis. Seu primeiro objetivo é suportar a aplicação das cargas de tráfego e distribuí-las ao solo subjacente. O seguinte é assegurar que a transmissão de esforços seja suficientemente reduzida, de modo que não possa exceder a capacidade de suporte do subleito. Além disso, a estrutura do pavimento deve ser o suficientemente impermeável para evitar que a capacidade de drenagem do subleito ou sub-base seja excedida. Se isso ocorrer, o pavimento poderia se saturar e a integridade da sua estrutura seria diminuída consideravelmente.

Segundo Senço (1997), o pavimento é uma estrutura de várias camadas de espessuras finitas que se assenta sobre um semi-espaço infinito e exerce a função de fundação da estrutura, chamado de subleito.

O projeto de pavimentos considera uma série de variáveis, como a intensidade de tráfego, condições do terreno, material disponível para a construção, o clima, entre outros.

A espessura de cada camada depende da carga que a estrutura espera suportar e das propriedades dos materiais a empregar. (DYNAPAC, 1989).

Embora se possa utilizar nas estruturas de pavimentos asfálticos vários tipos de bases e sub-bases, elas compreendem, freqüentemente, materiais granulares compactados (tais como rocha britada, escoria, pedregulho, areia e combinação destes) e solo estabilizado.

Nos EUA, o tratamento mais comum é a mistura de asfalto com o material granular, o que produz uma base asfáltica. Outros materiais são usados também no tratamento de misturas granulares de bases, sub-bases e de solos selecionados: cimento *Portland*, cal, mistura cal-cinzas volantes, alcatrão do carvão, cloreto de cálcio e sal (cloreto de sódio). (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989).

Pinto e Preussler (2001) indicam que, com o crescimento do volume de tráfego, é justificável a construção de um pavimento capaz de suportar as solicitações cada vez maiores, produzidas pelo tráfego. Os investimentos realizados para a construção de pavimentos serão compensados pelos benefícios decorrentes da:

- Redução do custo de transporte;
- Diminuição do tempo de viagem;
- Diminuição do consumo de combustível;
- Aumento do conforto e da segurança;

- Diminuição das despesas de conservação;
- Redução do índice de acidentes.

Quanto à classificação de pavimentos rodoviários, Balbo (1997), faz uma base classificatória abrangente, tal como indicado na tabela a seguir:

Classificação	Definições
Pavimento de concreto	Composto por revestimentos em concreto de cimento <i>Portland</i> vibrado ou compactado, com ou sem juntas, armado ou não.
Pavimento asfáltico	Pavimento que possui revestimento asfáltico.
Pavimento <i>full depth asphalt</i>	Composto exclusivamente por camadas de misturas asfálticas aplicadas sobre o subleito. Termo consagrado e não traduzido.
Pavimento rígido	É o pavimento cuja camada superior, absorvendo grande parcela dos esforços horizontais solicitantes, acaba por gerar pressões verticais bastante aliviadas e bem distribuídas sobre as camadas inferiores.
Pavimento flexível	É o pavimento no qual a absorção de esforços se dá de forma dividida entre várias camadas, encontrando-se as tensões verticais em camadas inferiores concentradas em região próxima da área de aplicação da carga.
Pavimento semi-rígido	Composto por revestimento asfáltico e base e/ou sub-base em material tratado com cimento (brita ou solo) de elevada rigidez, excluídos quaisquer tipos de concreto.
Pavimento semi-flexível	Algumas vezes, aplicado a pavimentos com revestimento em blocos intertravados ou articulados sobre bases granulares.
Pavimentos de blocos de concreto	Pavimentos com revestimentos em blocos de concreto intertravados ou articulados de concreto.
Pavimento composto	Possui revestimentos asfáltico esbelto (em geral, poroso) sobre concreto de cimento <i>Portland</i> .

Tabela 2.1 – Base classificatória para pavimentos.

Fonte: adaptado de Balbo (1997)

2.2. Camadas constituintes do pavimento

2.2.1. Regularização do subleito

Segundo definição do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1997), na especificação de serviço DNER-ES 299/97, a regularização do subleito é a operação destinada a conformar o leito estradal, quando necessário, transversal e longitudinalmente, compreendendo cortes ou aterros de até 20 centímetros de espessura e de acordo com os perfis transversais e longitudinais indicados no projeto.

Senço (1997), indica que a operação de regularização é chamada também de preparo do subleito, devendo ser executada, sempre que possível, em aterro, evitando:

- Que sejam executados cortes difíceis no material da “casca” já compactada pelo tráfego, a maioria das vezes por muitos anos;
- Que seja substituída uma camada já compactada naturalmente por uma a ser compactada nem sempre atingindo o grau de compactação existente;
- Que não se sacrifique o equipamento de escarificação desnecessariamente, agindo numa camada compactada.

Para Pinto e Preussler (2001), o preparo do subleito é uma operação que, se não for executada com requisitos técnicos, pode comprometer todo o trabalho de pavimentação. É o suporte sobre o qual vão trabalhar as camadas do pavimento.

2.2.2. Reforço de subleito

Thagesen (1996), define que o reforço do subleito é a camada de consolidação que pode ser empregada sobre solos de pouca capacidade de suporte.

De acordo com Senço (1997), o reforço de subleito é a camada de solo com 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. O reforço é a parte constituinte especificamente do pavimento e tem funções de complemento da sub-base.

O antigo DNER (1997), na especificação do serviço DNER-ES 300/97, indica que os materiais constituintes do reforço do subleito são solos ou mistura de solos existentes, de qualidade superior à do subleito.

Thagesen (1996) e Pinto e Preussler (2001), concordam que o material constituinte do reforço do subleito é importado e selecionado, de boas a excelentes características físicas e elevada resistência ou material do subleito estabilizado granulométrica e/ou quimicamente. Essas qualidades devem dar ao reforço melhores condições de suporte do que as do subleito e resistência que permita a absorção e distribuição das cargas, que se transmitem por meio das camadas superiores do pavimento. A simples utilização do reforço do subleito indica um pavimento de elevada espessura advinda de um subleito de má qualidade, ou de um subleito de regulares condições associado a um tráfego intenso e pesado.

2.2.3. Sub-base

Segundo Senço (1997), a sub-base é a camada complementar à base, que por circunstâncias técnicas e econômicas não é aconselhável construir a base diretamente sobre a regularização ou reforço do subleito.

Coronado (2002), define que a sub-base deve ter estabilidade e capacidade de suporte, além de ótima capacidade para drenar e controlar a ascensão capilar da água, protegendo assim a estrutura do pavimento.

Hunter (1994), expressa que o desempenho da sub-base tem quatro funções:

- Proporciona uma camada estrutural a qual distribui as cargas ao subsolo;
- Proporciona uma plataforma de trabalho para o tráfego da construção e uma plataforma de compactação para colocar as subseqüentes misturas betuminosas;
- Atua como capa de isolamento conjuntamente com as misturas betuminosas para proteger o subleito do congelamento, no caso de climas frios;
- Pode proporcionar uma camada drenante com a finalidade de drenar a água do pavimento.

O material constituinte da sub-base deverá ter características tecnológica superiores às do material de reforço. Por sua vez, o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base.

A sub-base consiste de solo natural selecionado e material britado qualificado. Pode também ser estabilizada com cimento, cal ou betume, para melhorar sua resistência e durabilidade. (DYNAPAC, 1989).

Com relação à sua posição na estrutura do pavimento, a sub-base é usualmente distinguida da camada de base pelas menores exigências em termos de resistência, plasticidade e graduação dos materiais que a constituem. (PINTO e PREUSSLER, 2001).

2.2.4. Base

Segundo Hunter (1994) e Coronado (2002), desde o ponto de vista estrutural, a base é a camada mais importante do pavimento flexível. Tem como finalidade distribuir as cargas aplicadas na superfície, para não exceder a capacidade de suporte do subleito. Para desempenhar essa função devem ser apresentadas as características necessárias de resistência intrínseca.

Por outro lado, Pinto e Preussler (2001), indicam que a base deve reduzir as tensões de compressão no subleito e na sub-base em níveis aceitáveis, ou seja, precisa distribuir as cargas aplicadas na superfície do pavimento para minimizar ou eliminar as deformações de consolidação e cisalhamento no subleito e/ou sub-base. Além disso, deve garantir que a magnitude das tensões de flexão no revestimento não o leve ao trincamento prematuro.

Os materiais mais comumente utilizados consistem de produtos de britagem, mistura de solos e materiais britados.

A base também pode ser executada com materiais tratados ou estabilizados com ligantes ou aglomerantes, como o cimento *Portland*, betume, cal e cinzas volantes.

Estudo feito pelo Instituto de Asfalto (1989), mostra que as camadas asfálticas têm tanto resistência à tração quanto à compressão, de modo que resistam a essas tensões internas. As bases granulares não tratadas não têm resistência à tração. Portanto, as bases asfálticas espalham a carga da roda sobre áreas maiores, quando comparadas com as bases granulares não tratadas. Em consequência, a espessura total da estrutura de pavimento é menor quando empregadas às bases asfálticas.

Quanto aos tipos de camada de base, é feita a seguir uma breve descrição das mais utilizadas nos pavimentos flexíveis:

- Base de brita graduada:

A especificação ES-P06 da PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo (1999) define a base de brita graduada como a camada constituída de uma mistura, em usina ou *in loco*, de produtos de britagem apresentando granulometria contínua, cuja estabilização é obtida pela ação mecânica do equipamento de compactação.

- Base de brita corrida:

Segundo definição de Pinto e Preussler (2001), é uma camada constituída por produtos resultantes da britagem primária de rocha sã, enquadrados numa condição granulométrica contínua.

- Base de solo arenoso fino laterítico:

De acordo com Nogami e Villibor (1995), conceitua-se tecnologicamente como SAFL, aquele que pertence à classe de solo de comportamento laterítico e a um dos grupos LA' (areias argilosas lateríticas), LA (areias com pouca argila laterítica), e LG' (argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas) segundo a classificação geotécnica MCT, sendo características das regiões tropicais.

- Base de solo-brita:

Pode ser dividida em solo arenoso-brita e solo argiloso-brita. Na primeira, constitui-se de uma mistura de solo arenoso fino laterítico e brita corrida, e, na segunda, de solo com predomínio de argila, misturado com brita corrida. Para ambos os casos, as porcentagens ideais das misturas devem ser definidas em estudos de laboratório. (PINTO e PREUSSLER, 2001).

- Base de solo estabilizado granulometricamente

A especificação DE 00/PAV-005 do DER-SP – Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (2000), descreve que consiste da utilização de solos, mistura de solos, mistura de solos e materiais britados, escoria ou produtos totais de britagem, de modo a apresentar, após umedecimento e compactação, boas condições de estabilidade e durabilidade.

- Base de macadame hidráulico

A especificação ES-P05 da PMSP (1999), define o macadame hidráulico como a camada obtida por compressão de agregados graúdos, uniformemente distribuídos, cujos vazios são preenchidos por agregados menores, pó de pedra ou areia (material de enchimento), a princípio seco, e depois com ajuda de água. A estabilidade da camada é obtida a partir da ação mecânica energética de compactação.

- Base de macadame betuminoso

Esse tipo de base consiste na superposição de camadas de agregados britados, interligados entre si por pinturas de material betuminoso. (PINTO e PREUSSLER, 2001).

2.2.5. Revestimento

A camada de revestimento de uma estrutura flexível consiste da mistura de agregados minerais e materiais betuminosos, sobreposta à camada de base.

Segundo Hunter (1994), o revestimento, quanto mais espesso, é colocado com frequência em duas camadas. O propósito da camada inferior ou de ligação (*binder*) é prover uma superfície bem conformada onde a camada superior ou de rolamento será construída, estendendo e distribuindo também as cargas de tráfego sobre a base.

Hunter indica que o revestimento deve satisfazer os seguintes requerimentos:

- Resistir às deformações pelo tráfego;
- Resistir à fissuração, como resultado do movimento térmico ou de tensões de tráfego;
- Ser impermeável, protegendo as camadas inferiores do pavimento;
- Ser resistente aos efeitos do clima, abrasão e fadiga;
- Prover uma superfície aceitável ao rolamento de qualidade;
- Prover uma superfície com baixos níveis de geração de ruído.

Segundo Pinto e Preussler (2001), o sucesso do revestimento depende da obtenção de uma mistura com ótima graduação de agregados e da porcentagem de ligante betuminoso de forma a ser durável e resistente a fraturas e desagregações, sem se tornar instável ao tráfego esperado e às condições climáticas.

A massa para os revestimentos geralmente é preparada com misturas a quente, em usinas apropriadas, como o concreto asfáltico, por exemplo. Também pode ser obtida em usinas de mistura a frio, com emulsões asfálticas. As massas misturadas a quente são recomendadas para o uso em rodovias de tráfego de moderado a elevado.

É importante que os revestimentos sejam adequadamente compactados durante a construção. Quando são mal compactados, se tornam mais suscetíveis a uma grande variedade de defeitos que tendem a reduzir a vida útil e o nível de desempenho do pavimento.

Devido ao grande número de materiais betuminosos disponíveis, o seu uso pode ser resumido nos seguintes serviços:

- **Imprimação**

Segundo o antigo DNER (1997), na especificação de serviço DNER-ES 306/97, consiste na aplicação de uma camada asfáltica sobre a superfície de uma base concluída, antes da execução de um revestimento betuminoso qualquer.

Para a imprimação são utilizados asfaltos diluídos de baixa viscosidade, que permitem a penetração do ligante nos vazios da base. (Instituto Brasileiro de Petróleo – IBP, 1990).

A imprimação é realizada com o objetivo de:

- ❖ Aumentar a coesão da superfície da camada pela penetração do ligante aplicado;
- ❖ Atribuir à camada granular certo grau de impermeabilização.

- **Pintura de ligação**

A pintura asfáltica é executada com a função básica de promover a aderência à camada asfáltica a ser sobreposta sobre outra camada asfáltica, sendo utilizadas emulsões asfálticas.

Pinto e Preussler (2001), indicam que a pintura de ligação pode ser aplicada nas seguintes condições:

- ❖ Sobre antigos revestimentos asfálticos, previamente à execução de um recapeamento ou mesmo de um tratamento de rejuvenescimento;
- ❖ Sobre pinturas asfálticas anteriores, que pela ação do tráfego e do tempo tenham perdido a potencialidade de promover aderência com a camada a ser sobreposta;

- ❖ Como elemento de ligação entre duas camadas asfálticas.

Os tipos de revestimentos asfálticos empregados, como capas ou camadas de ligação, são os seguintes:

- Tratamento superficial

Os tratamentos superficiais asfálticos têm como objetivo melhorar as condições de rolamento e impermeabilização da pista, podendo ser executados como revestimento novo ou como recapeamento.

A especificação DE 00/PAV-012 do DER-SP (2000), indica que a execução de cada uma das camadas de tratamento superficial asfáltico consiste em aplicar material asfáltico sobre a superfície subjacente e, logo em seguida, distribuir o agregado e comprimi-lo, de maneira que o material asfáltico suba até uma certa parte da altura do agregado, fixando-o por baixo (penetração invertida).

Os tratamentos superficiais asfálticos são denominados simples, duplos e triplos quando são constituídos, respectivamente, de uma, duas e três camadas superpostas. Cada uma delas constituída por uma aplicação de material asfáltico e uma aplicação de agregado.

- Macadame betuminoso

A especificação DE 00/PAV-008 do DER-SP (2000), define o produto constituído por agregados e material asfáltico a eles aderido, mediante interpenetração, em uma camada de agregado graúdo; duas camadas de agregado miúdo aplicadas e comprimidas, cada uma delas, sobre uma camada de cimento asfáltico.

O emprego desse tipo de serviço pode se dar como base ou revestimento, sendo, neste último caso, necessária a aplicação de uma capa selante. Diferencia-se do tratamento superficial devido à granulometria e à espessura. (PINTO e PREUSSLER, 2001).

- Pré-misturado a quente

A especificação ES-P10 da PMSP (1999), mostra que o pré-misturado a quente é o produto resultante da mistura a quente, em usina apropriada, com características específicas compostas de agregado mineral graduado, material de enchimento (*filler*) e cimento asfáltico de petróleo, espalhada e comprimida a quente.

Sua espessura, após compressão, pode variar de 3 centímetros a 10 centímetros aproximadamente, dependendo da granulometria final da mistura de agregados. (IBP, 1990).

Segundo Pinto e Preussler (2001), a mistura é freqüentemente utilizada como camada intermediária, posicionada imediatamente abaixo de um revestimento do tipo concreto asfáltico.

Sua utilização, no entanto, pode ser estendida a diversas aplicações, entre elas, se destacam as seguintes:

- ❖ Camada de regularização em obras de restauração onde, além da função estrutural, deseja-se corrigir deformações da pista existente;
- ❖ Camada de revestimento, recebendo uma capa de selante;
- ❖ Camada delgada, aplicada sobre revestimentos, para a prevenção contra derrapagens, compondo-se a mistura, nesse caso, com agregado de diâmetro máximo limitado.

- Pré-misturado a frio

A camada do pré-misturado a frio é o produto resultante da mistura, em equipamento apropriado, de agregados minerais e emulsão asfáltica ou asfalto diluído, espalhado e comprimido a frio. Segundo a granulometria, classificam-se em abertos e

densos. O pré-misturado a frio pode ser utilizado como camada de regularização, como base ou como revestimento, além de serviços de conservação. (IBP, 1990).

- Concreto asfáltico ou betuminoso

Segundo definição do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (2004), na especificação de serviço DNIT 031/2004-ES, o concreto betuminoso usinado a quente é uma mistura a quente executada em usina apropriada constituída de agregado mineral graduado, material de enchimento e cimento asfáltico, espalhada e comprimida a quente, com características de estabilidade, vazios e relação betume-vazios definidas nas especificações de serviços.

A ES-P11 da PMSP (1999), indica que, de acordo com a posição relativa e a função na estrutura, o concreto asfáltico deve atender a características especiais em sua formulação, recebendo geralmente as seguintes designações:

- ❖ Camada de rolamento: camada superior da estrutura destinada a receber diretamente a ação do tráfego. A mistura empregada deve apresentar estabilidade e flexibilidade compatíveis com o funcionamento elástico da estrutura e condições de rugosidade que proporcionem segurança ao tráfego, mesmo sob condições climáticas e geométricas adversas;
- ❖ Camada de ligação ou *binder*: camada posicionada imediatamente abaixo da capa. Apresenta, em relação à mistura utilizada para a camada de rolamento, diferenças de comportamento, decorrentes do emprego de agregado de diâmetro maior, de maior porcentagem de vazios e menor relação de betume-vazios;
- ❖ Camada de nivelamento ou regularização: serviço executado com massa asfáltica de graduação fina, com a função de corrigir deformações ocorrentes na superfície de um antigo revestimento e, simultaneamente, promover a selagem de fissuras existentes.

- Lama asfáltica

Segundo o antigo DNER (1997), na especificação de serviço DNER-ES 314/97, a lama asfáltica consiste na associação de agregados ou misturas de agregados miúdos, material de enchimento (*filler*), emulsão asfáltica e água, com consistência fluida, uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada.

A lama asfáltica tem seu principal emprego na proteção dos pavimentos asfálticos, já desgastados, sendo também muito usada, como camada de desgaste e impermeabilização, nos revestimentos executados com tratamento superficial ou macadame betuminoso. (IBP, 1990).

- Micro revestimento asfáltico a frio modificado por polímero

De acordo com o DNIT (2005), na especificação de serviço DNIT 035/2005-ES, o micro revestimento asfáltico a frio, com emulsão modificada por polímero, consiste na associação de agregado, material de enchimento (*filler*), emulsão asfáltica modificada por polímero do tipo SBS, água, aditivos se necessário, com consistência fluida, uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada.

O micro revestimento asfáltico a frio, com emulsão modificada a frio, pode ser empregado como camada selante, impermeabilizante, regularizadora e rejuvenescedora ou camada antiderrapante de pavimentos.

Feita a definição das camadas constituintes do pavimento, é apresentada na Tabela 2.2 uma planilha que ilustra os tipos de serviços feitos na construção de pavimentos flexíveis e seus materiais constituintes.

Em geral, durante a construção das camadas dos pavimentos rodoviários, ocorrem cinco etapas bem definidas, que são a mistura das camadas na pista ou em usina, a carga e o transporte, o espalhamento, a compactação e o acabamento dos materiais e misturas resultantes, tal como ilustradas na Tabela 2.3.

Camadas constituintes dos pavimentos flexíveis	Tipo de material utilizado		
	Camadas com Solo (Camadas de Fundação)	Camadas Granulares (Sub-base e Base)	Camadas com Ligante Asfáltico (Base e Capa)
Regularização ou preparo do subleito	X		
Reforço do subleito	X		
Brita graduada simples		X	
Macadame hidráulico		X	
Solo estabilizado granulometricamente/Solo-brita (de granulometria descontínua)		X	
Solo arenoso fino laterítico (e argila laterítica e areia)		X	
Macadame betuminoso por penetração			X
Pré-misturado a quente			X
Pré-misturado a frio			X
Concreto betuminoso usinado a quente			X
Tratamentos superficiais (simples, duplo, triplo)			X
Imprimação/Pintura de ligação			X

Tabela 2.2 – Tipo de material - camadas constituintes dos pavimentos flexíveis.

Fonte: adaptado das Especificações Técnicas do DNIT [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], DER-SP [17], PMSP [55].

Camadas constituintes dos pavimentos rodoviários	Etapas construtivas					
	Mistura na Usina	Mistura na Pista	Carga e Transporte	Espalhamento	Compactação	Acabamento
Regularização ou preparo do subleito		X	X (1)		X	
Reforço do subleito		X	X		X	
Brita graduada simples	X	X	X	X	X	
Macadame hidráulico		X	X	X	X	
Solo estabilizado granulometricamente/Solo-brita (de granulometria descontínua)	X	X	X	X	X	
Solo arenoso fino laterítico (e argila laterítica e areia)		X	X	X	X	
Macadame betuminoso por penetração		X	X	X	X	
Pré-misturado a quente	X		X		X	X
Pré-misturado a frio	X		X	X	X	X
Concreto betuminoso usinado a quente	X		X		X	X
Tratamentos superficiais (simples, duplo, triplo)			X	X	X	
Imprimação/Pintura de ligação				X		

(1) – Apenas quando ocorre subleito a ser substituído

Tabela 2.3 – Etapa construtiva - camadas constituintes dos pavimentos flexíveis.

Fonte: adaptado das Especificações Técnicas do DNIT [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], DER-SP [17], PMSP [55]

3. EQUIPAMENTOS PARA A EXECUÇÃO DE CAMADAS VIÁRIAS E SUA ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO

3.1. Principais equipamentos por tipo de serviço

Para determinar quais são os principais equipamentos empregados na construção de pavimentos flexíveis foi feita uma pesquisa nas especificações técnicas do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte (DNIT); do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP) e da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP). O resultado desta pesquisa é apresentado nas planilhas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 a seguir.

Foi identificado que dos equipamentos recomendados pelas especificações consultadas, a motoniveladora é a máquina mais versátil no trabalho de mistura de materiais na pista, reunindo todas as propriedades dos outros equipamentos indicados para elaboração desta etapa construtiva.

Para a elaboração das misturas betuminosas quentes é necessária uma usina de asfalto apropriada.

Na compactação de misturas de solos e misturas betuminosas, os rolos compactadores são os equipamentos adequados para se atingir as densidades requeridas.

Para o espalhamento de agregados e material betuminoso, tanto o distribuidor de agregados como o caminhão espargidor de asfalto são os mais indicados para esses serviços.

Descrição do Tipo de Serviço	Tipo de Equipamento				
	Mistura na pista				
	Trator de esteira ou pneumático	Motoniveladora com escarificador	Tanque distribuidor de água	Grade ou arado de discos	Pulvi-misturador
Camadas com Solo (Camadas de Fundação)					
Regularização ou preparo do subleito	3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2	1, 2
Reforço do subleito	-	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
Camadas Granulares (Sub-base e Base)					
Brita graduada simples	-	3	2, 3	-	-
Macadame hidráulico	3	1, 3	1, 2, 3	-	-
Solo estabilizado granulometricamente/Solo-brita (de granulometria descontínua)	-	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
Solo arenoso fino laterítico/Argila laterítica e areia	-	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3
Camadas com Ligante Asfáltico (Base e Capa)					
Macadame betuminoso por penetração	-	2	-	-	-
Pré-misturado a frio	-	2	-	-	-
(1) - Especificação Técnica do DNIT; (2) - Especificação Técnica do DER-SP; (3) - Especificação Técnica da PMSP.					

Tabela 3.1 – Equipamentos por tipo de serviço – mistura na pista.

Fonte: adaptado das Especificações Técnicas do DNIT, DER-SP, PMSP.

Descrição do Tipo de Serviço	Tipo de Equipamento		
	Mistura na Usina		
	Depósito (tanques) para material betuminoso	Depósito para agregados (silos)	Central de mistura ou usina
Camadas Granulares (Sub-base e Base)			
Brita graduada simples	-	-	2, 3
Solo estabilizado granulometricamente/Solo-brita (de granulometria descontínua)	-	-	1, 2, 3
Camadas com Ligante Asfáltico (Base e Capa)			
Macadame betuminoso por penetração	2	-	-
Pré-misturado a quente	1, 2, 3	1, 3	1, 2, 3
Pré-misturado a frio	1, 3	1, 3	1, 2, 3
Concreto betuminoso usinado a quente	1, 2, 3	1, 3	1, 2, 3
Tratamentos superficiais (simples, duplo, triplo)	2	-	-
Imprimação/Pintura de ligação	1, 2, 3	-	-
(1) - Especificação Técnica do DNIT; (2) - Especificação Técnica do DER-SP; (3) - Especificação Técnica da PMSP.			

Tabela 3.2 – Equipamentos por tipo de serviço – mistura na usina.

Fonte: adaptado das Especificações Técnicas do DNIT, DER-SP, PMSP.

Descrição do Tipo de Serviço	Tipo de Equipamento	
	Carga e Transporte	
	Caminhões para transporte de materiais e misturas	Pá carregadeira sobre pneu
Camadas com Solo (Camadas de Fundação)		
Regularização ou preparo do subleito	3	3
Reforço do subleito	2, 3	2, 3
Camadas Granulares (Sub-base e Base)		
Brita graduada simples	2, 3	2, 3
Macadame hidráulico	2, 3	3
Solo estabilizado granulometricamente/Solo-brita (de granulometria descontínua)	2, 3	2, 3
Solo arenoso fino laterítico/Argila laterítica e areia	2, 3	-
Camadas com Ligante Asfáltico (Base e Capa)		
Macadame betuminoso por penetração	2	-
Pré-misturado a quente	1, 2, 3	2
Pré-misturado a frio	1, 2, 3	-
Concreto betuminoso usinado a quente	1, 2, 3	2
Tratamentos superficiais (simples, duplo, triplo)	2	-
(1) - Especificação Técnica do DNIT; (2) - Especificação Técnica do DER-SP; (3) - Especificação Técnica da PMSP.		

Tabela 3.3 – Equipamentos por tipo de serviço – carga e transporte.

Fonte: adaptado das Especificações Técnicas do DNIT, DER-SP, PMSP.

Descrição do Tipo de Serviço	Tipo de Equipamento		
	Espalhamento		
	Distribuidor de agregados	Vassouras mecânicas rotativas	Carro distribuidor de material betuminoso
Camadas Granulares (Sub-base e Base)			
Brita graduada simples	2, 3		
Macadame hidráulico	1, 2, 3	1, 2	-
Solo estabilizado granulometricamente/Solo-brita (de granulometria descontínua)	2	-	-
Solo arenoso fino laterítico/Argila laterítica e areia	-	2, 3	-
Camadas com Ligante Asfáltico (Base e Capa)			
Macadame betuminoso por penetração	1, 2, 3	2, 3	1, 2, 3
Tratamentos superficiais (simples, duplo, triplo)	1, 2, 3	2, 3	1, 2, 3
Imprimação/Pintura de ligação	-	1, 2, 3	1, 2, 3
(1) - Especificação Técnica do DNIT; (2) - Especificação Técnica do DER-SP; (3) - Especificação Técnica da PMSP.			

Tabela 3.4 – Equipamentos por tipo de serviço – espalhamento.

Fonte: adaptado das Especificações Técnicas do DNIT, DER-SP, PMSP.

Descrição do Tipo de Serviço	Tipo de Equipamento			
	Compactação			
	Rolo pé-de-carneiro	Rolo liso estático	Rolo liso vibratório	Rolo pneumático
Camadas com Solo (Camadas de Fundação)				
Regularização ou preparo do subleito	1, 2, 3	2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
Reforço do subleito	1, 2, 3	2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
Camadas Granulares (Sub-base e Base)				
Brita graduada simples	-	3	2, 3	2, 3
Macadame hidráulico	-	1, 2, 3	1, 3	1, 3
Solo estabilizado granulometricamente/Solo-brita (de granulometria descontínua)	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
Solo arenoso fino laterítico/Argila laterítica e areia	2, 3	2, 3	2, 3	2, 3
Camadas com Ligante Asfáltico (Base e Capa)				
Macadame betuminoso por penetração	-	1, 2, 3	1, 3	1, 3
Pré-misturado a quente	-	1, 2, 3	-	2, 3
Pré-misturado a frio	-	1, 2, 3	1, 3	1, 2, 3
Concreto betuminoso usinado a quente	-	1, 2, 3	1, 2	1, 2, 3
Tratamentos superficiais (simples, duplo, triplo)	-	1, 2, 3	-	1, 2, 3
(1) - Especificação Técnica do DNIT; (2) - Especificação Técnica do DER-SP; (3) - Especificação Técnica da PMSP.				

Tabela 3.5 – Equipamentos por tipo de serviço – compactação.

Fonte: adaptado das Especificações Técnicas do DNIT, DER-SP, PMSP.

Descrição do Tipo de Serviço	Tipo de Equipamento
	Acabamento
	Equipamento para espalhamento da mistura (pavimentadoras)
Camadas com Ligante Asfáltico (Base e Capa)	
Pré-misturado a quente	1, 2, 3
Pré-misturado a frio	1, 2, 3
Concreto betuminoso usinado a quente	1, 2, 3
(1) - Especificação Técnica do DNIT; (2) - Especificação Técnica do DER-SP; (3) - Especificação Técnica da PMSP.	

Tabela 3.6 – Equipamentos por tipo de serviço – acabamento.

Fonte: adaptado das Especificações Técnicas do DNIT, DER-SP, PMSP.

Para o espalhamento e acabamento das camadas betuminosas, as pavimentadoras de asfalto são os equipamentos mais indicados. Nos últimos tempos, com os avanços tecnológicos, as pavimentadoras conseguem realizar facilmente o trabalho dos distribuidores de agregados, havendo diminuído o emprego desses últimos equipamentos.

A carga e transporte dos materiais não fazem parte da análise do presente estudo.

3.2. Produção dos equipamentos estudados

Com base no descrito anteriormente foram selecionados os equipamentos a serem analisados, sendo eles: as motoniveladoras, os rolos compactadores de solo e asfalto, os espargidores, as pavimentadoras e usinas de asfalto.

A seguir, é apresentada uma descrição geral desses equipamentos, indicando definições, componentes principais, campos de aplicação, equações e variáveis de produção.

3.2.1. Motoniveladoras

Segundo Day (1989), a motoniveladora é um equipamento que se utiliza para mover terra ou outro material solto. Geralmente, sua função consiste em nivelar, modelar ou dar a declividade necessária ao material em que se trabalha, para dar-lhe uma configuração predeterminada.

Baesso (2003), descreve que a lâmina da motoniveladora, que se constitui em seu componente de maior importância, tem seu trabalho monitorado por uma barra de tração cujo objetivo é o de controlar o esforço impellido pela máquina. Possui uma movimentação livre em quase todos os sentidos, de modo a permitir seu emprego nas mais variadas posições.

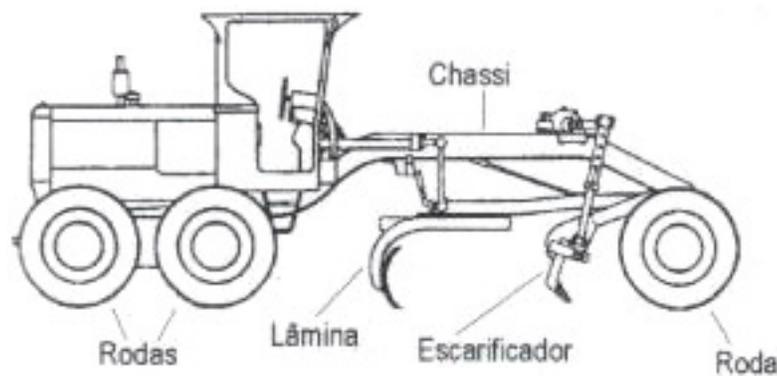


Figura 3.1 – Principais partes conformantes de uma motoniveladora.

Fonte: Guimarães (2001).

Esses equipamentos podem ser rígidos ou articulados. Os primeiros apresentam melhores resultados para os serviços de regularização ou de patrolagem, mas, por outro lado, não permitem um grande deslocamento lateral da lâmina, normalmente necessário para trabalhos visando à execução de sarjetas e em operações de conformação de taludes. Os articulados, por sua vez, são dotados de maior poder de mobilidade. São próprios para operar em espaços pequenos ou de movimentação limitada, quando há necessidade de deslocamento do eixo dianteiro para dentro dos dispositivos laterais de drenagem, sem deslocar o eixo tandem do leito da rodovia. Essa operação permite um alcance maior, sem perda de tração.

Segundo Guimarães (2001), nos trabalhos de manutenção de rodovias de terra em tráfego, é imprescindível o emprego de motoniveladoras para o trabalho de alisamento de superfície. Nessa aplicação, a lâmina é disposta formando um ângulo de aproximadamente 50° em relação ao eixo de deslocamento da máquina. Desse modo, com a mesma profundidade de penetração na superfície a ser nivelada, a lâmina corta a superfície e arrasta o material, enchendo com este, os buracos e depressões existentes a sua frente.

Na construção de pavimentos rodoviários, as principais aplicações das motoniveladoras são espalhar materiais para formar as camadas do pavimento e dar acabamento das superfícies de solos estabilizados.



Figura 3.2 – Motoniveladora no trabalho de regularização de camadas do pavimento.

Fonte: foto feita pelo autor.

Day (1989), afirma que a produtividade de uma motoniveladora, em sua operação básica de nivelamento, se calcula de acordo com o tempo utilizado para fazer seu trabalho. Essa é a diferença com a produtividade de um trator de lâmina frontal e de outros equipamentos empregados para a movimentação de terras, os quais se calculam baseando-se nos metros cúbicos movimentados por hora. No caso de uma motoniveladora, o volume real de material movido é demasiado variável e não é considerado de primeira importância. O que é mais significativo para esse equipamento é o número de passadas que se requerem para nivelar uma área dada, ou seja, as vezes que a motoniveladora tem que percorrer a área até nivelá-la completamente. O número de passadas depende do estado inicial da superfície a ser nivelada e da precisão no acabamento.

Segundo Helio de Souza e Catalani G. (2002), as motoniveladoras, por serem máquinas para acabamento de terraplenagem, sendo seu emprego muito diversificado, tornam impraticável a determinação da estimativa de produção, a não ser para algumas tarefas simples, como o

espalhamento e regularização de camadas de terra para a compactação, através de muitas passadas de ida e retorno da lâmina do equipamento.

Pereira (1961), Day (1989), Helio de Souza e Catalani G (2002) e Peurifoy e Schexnayder (2002), apresentam a seguinte equação empregada para determinar o tempo requerido para realizar a tarefa de espalhamento e regularização de uma motoniveladora:

$$T_{motoniv} = \left(\frac{D_i}{V_i} + \frac{D_r}{V_r} \right) \frac{N}{E} \dots (\text{min}) \dots \dots \dots \text{Equação 3.1}$$

Sendo:

$T_{motoniv}$ = Tempo empregado na operação de espalhamento, em minutos;

D_i = Distância percorrida avante numa direção por ciclo, em metros;

D_r = Distância percorrida a ré para começar o seguinte ciclo de nivelamento, em metros;

V_i = Velocidade do trajeto de ida durante o espalhamento (fase produtiva), em metros por minuto;

V_r = Velocidade do trajeto de retorno (fase não produtiva), em metros por minuto;

N = Número total de passadas para regularizar cada camada, na largura total de trabalho;

E = Fator de eficiência de operação da motoniveladora.

Com base na equação 3.1, a produção da motoniveladora, segundo os autores citados anteriormente, será calculada pela seguinte expressão:

$$Q_{motoniv} = \frac{L \times C \times e \times 60}{T_m} \dots (m^3 / h) \dots \dots \dots \text{Equação 3.2}$$

Sendo:

$Q_{motoniv}$ = Produção da motoniveladora na tarefa de espalhamento e regularização, em metros cúbicos por hora;

L = Largura da área a ser regularizada, em metros;

C = Comprimento da área a ser regularizada, em metros;

e = Espessura solta da camada, em metros.

Outra técnica, segundo Nelson Guimarães (2001), Helio de Souza e Catalani G (2002) e Peurifoy e Schexnayder (2002), que pode ser empregada é a passagem contínua da lâmina entre o início e o término da área a ser regularizada, sendo feito o giro na extremidade e retomando em sentido contrário, podendo a produção das motoniveladoras ser caracterizada pelo volume de material espalhado por unidade de tempo, expressada pela seguinte equação:

$$Q_{motoniv} = \frac{l \times V_m \times e \times E \times 1000}{n} \dots (m^3 / h) \dots \dots \dots \text{Equação 3.3}$$

Sendo:

$Q_{motoniv}$ = Produção da motoniveladora na regularização, em metros cúbicos por hora;

l = Largura da lâmina, em metros;

V_m = Velocidade média da motoniveladora, em quilômetros por hora;

e = Espessura solta da camada, em metros;

n = Número de passadas para regularizar cada camada, na largura da lamina da motoniveladora;

E = Fator de eficiência do equipamento.

3.2.2. Rolos compactadores

A compactação é definida como o processo para incrementar a densidade de um material através da aplicação de forças externas, tanto estáticas quanto dinâmicas, realizadas pelos rolos compactadores. (DYNAPAC, 1989).

Rico e Del Castillo (1982), afirmam que o objetivo principal da compactação é obter um solo bem estruturado, que possa manter um comportamento mecânico adequado por toda a vida útil do pavimento.

A compactação tradicional de solos, até a década de 1930, era feita por pressão (carga estática), amassado, impacto ou por uma combinação das três. A primeira aplicação prática do princípio de vibração foi feita na Alemanha e não foi senão até o fim da década de 1960, em que se utilizou para a compactação de misturas asfálticas quentes, sendo hoje um dos métodos de compactação mais usados, tanto em solos como em concreto asfáltico. (VIVAR, 1991).

O Instituto de Asfalto (1989), indica que o objetivo da compactação de revestimentos asfálticos é conseguir o teor ótimo de vazios de ar e prover uma superfície de rolamento suave. Atrás da pavimentadora, o revestimento asfáltico tem entre 15% e 20% de vazios de ar. É tarefa dos rolos a redução do teor de vazios, por exemplo, a 8% ou menos, nas misturas densamente graduadas.

Segundo a Dynapac (1981), mediante a compactação dinâmica ou vibratória, os rolos trabalham com uma rápida sucessão de impactos contra a superfície do solo, entre 500 e 700 vibrações por minuto, dependendo do tipo de máquina. Com a compactação por vibração, é possível obter as seguintes vantagens:

- O princípio da compactação dinâmica torna possível o trabalho com compactadores mais leves e muito menores que os rolos estáticos.
- O efeito de penetração da compactação dinâmica torna possível o trabalho em espessuras mais elevadas de camadas do que com compactadores estáticos.
- Em cada passada sobre a superfície, um compactador vibratório transmite uma série de impactos ao solo. Um rolo estático fornece apenas um ciclo de pressão com cada passada. A vibração pode, desse modo, dar a necessária compactação com menos passadas do que os rolos estáticos.

A compactação de camadas de solos e misturas asfálticas conformantes dos pavimentos rodoviários pode ser feita mediante a utilização dos seguintes equipamentos:

- Rolos pé-de-carneiro

Os rolos pé-de-carneiro têm como elementos ativos cilindros metálicos erigidos de protuberâncias geralmente fixas, chamados pé-de-carneiro. A ação do compactador é semelhante ao passo de um rebanho aonde seus inumeráveis pés penetram ao solo e o compactam. (ARQUIE, 1972).

Segundo Rico e Del Castillo (1982), esses rolos concentram seu peso sobre a pequena superfície de todo um conjunto de pontas de forma variada, exercendo pressões estáticas maiores nos pontos em que as mencionadas protuberâncias penetram ao solo. Conforme se vão dando passadas e o material vai se compactando, os pés aprofundam cada vez menos no solo, chegando um momento em que já não se produz nenhuma compactação adicional, numa profundidade da ordem dos 6 centímetros. A esta peculiar maneira de compactar, denomina-se ação de “amassado”.



Figura 3.3 – Rolos pé-de-carneiro durante o processo de compactação de camadas viárias.

Fonte: foto feita pelo autor.

Os rolos pé-de-carneiro, agora também dotados de movimento vibratório, cuja combinação das conhecidas vantagens dos rolos pé-de-carneiro estáticos com as características da compactação dinâmica produz um efeito de amassamento que impede formação de cascas dando uma estrutura homogênea ao solo. (GUIMARÃES, 2001).

Esses rolos são úteis em solos finos mais ou menos coesivos. Não é recomendável para materiais pulverulentos nem para materiais pétreos. (JEUFFROY, 1973).

- Rolos lisos

Segundo Guimarães (2001), são os rolos nos quais a parte que entra em contato com o material a ser comprimido, responsável pela operação e componente da parte rodante, é constituída por rodas metálicas aonde o peso do equipamento é transferido ao material.

Dividem-se em dois grupos: rebocáveis e autopropelidos. Os primeiros constam geralmente de dois tambores montados num marco ao que se sujeitam os eixos; seu peso varia comumente de 14 a 20 toneladas e podem se incrementar enchendo um depósito sobre o marco com água ou areia úmida. Os autopropelidos constam de uma roda dianteira e uma ou duas traseiras, se fabricam com pesos de 3 a 13 toneladas.

Os rolos lisos têm seu campo de aplicação restrito aos materiais que não requerem concentrações elevadas de pressão. Geralmente, são aplicados em areias e britas relativamente limpas. Também são muito utilizados para o acabamento da superfície superior das camadas compactadas (acabamento do subleito, da base e de misturas asfálticas). (RICO E DEL CASTILLO, 1982).

O efeito da compactação dos rolos lisos é reduzido consideravelmente à medida que se aprofunda a camada que se compacta. O efeito da compactação é produzido de cima para baixo.

Para os rolos lisos vibratórios, seu uso depende da frequência e amplitude. Geralmente a frequência mantém-se fixa entre 45 e 50 Hz, podendo ajustar-se a amplitude, que oscila em geral entre 0,40 e 0,85 milímetros. A força centrífuga varia entre 40 kN, em amplitude baixa com os modelos pequenos, e 190 kN em máquinas maiores com amplitude alta. (FERNANDEZ, 2006).

Segundo Rico e Del Castillo (1982), as características principais dos rolos lisos são sua disposição, diâmetro (com o qual se incrementa a eficiência), a largura e o peso total. A espessura solta da camada de material, que é possível compactar com o rolo liso, está na ordem de 10 a 20 centímetros.



Figura 3.4 – Rolo liso tandem durante o processo de compactação de uma camada asfáltica.

Fonte: TRB (2006).

A Caterpillar (1995), recomenda que na compactação de camadas asfálticas, um bom método para determinar a velocidade dos rolos vibratórios é mediante o ajuste da velocidade de compactação (metros/minuto ou pés/min.) para produzir cerca de 10 impactos por pé. A média de dez impactos por pé assegura a obtenção de um pavimento liso. Os resultados da compactação estão em função da frequência desses impactos, como também da força dos impactos e do tempo em que eles são aplicados. A relação frequência/tempo explica as menores velocidades dos compactadores vibratórios. A velocidade do trabalho é importante porque determina quanto tempo levará para se compactar uma parte determinada da obra.

- Rolos pneumáticos

São aqueles que procedem à compactação de materiais através da ação de contato de pneumáticos, convenientemente inflados, que transmitem o peso de uma carga estática, em virtude do seu deslocamento contínuo sobre a superfície do material. (GUIMARÃES, 2001).

Os rolos pneumáticos são empregados, principalmente, em solos arenosos com finos pouco plásticos, cuja desagregação requer grandes concentrações de pressão, como as que produzem os rolos pé-de-carneiro. (RICO E DEL CASTILLO, 1982).



Figura 3.5 – Rolo pneumático durante o processo de compactação de uma camada asfáltica.

Fonte: Iowa Asphalt Paving (2007)

Segundo o Instituto de Asfalto (1989), na compactação de misturas asfálticas, os rolos de rodas pneumáticas têm várias vantagens:

- ❖ Proporcionam um grau de compactação mais uniforme do que os rolos lisos de rodas de aço;
- ❖ Melhoram a selagem próxima à superfície, desse modo diminuindo a permeabilidade da camada; e
- ❖ Orientam as partículas de agregado no sentido de maior estabilidade, como fazem os pneus de alta pressão de caminhões, depois de solicitarem a superfície asfáltica por algum tempo.

Rolos sobre pneus são considerados atualmente o tipo mais versátil e que mais recursos oferecem, principalmente após o advento da pressão controlada, que permite o seu emprego na maioria dos trabalhos de compactação de aterros, de solos estabilizados e de misturas betuminosas. (GUIMARÃES, 2001).

Rico e Del Castillo (1982), indicam que influenciam no rendimento dos rolos pneumáticos a carga por roda, a pressão de inflado, a largura do rolo, o percentual de recobrimento por passada, o traspasse entre passadas e a velocidade do compactador.

Segundo Fernandez (2006), os compactadores pneumáticos têm entre sete e nove rodas, com larguras geralmente entre 1,80 e 2,45 metros. As rodas têm um certo traspasse entre si. As cargas por roda oscilam entre 12 kN com o peso mínimo, 26 kN com lastro de areia úmida e 30 kN ou mais com lastro máximo de lingotes de ferro. A eficiência da compactação é proporcional à carga por roda, sendo muito importante o uso da máquina com lastro.

Em resumo, a forma apropriada de usar o equipamento selecionado depende de uma série de fatores, como a frequência e amplitude no caso de rolos vibratórios; pressão de inflado, no caso de rolos pneumáticos; peso, no caso de rolos estáticos; área dos pés, no caso dos rolos pé-de-carneiro; e velocidade, número de passadas e esquema de compactação em todos os casos. (VIVAR, 1991).

A produção de um equipamento de compactação, num solo determinado e para uma densidade especificada fixada como objetivo, é o número de metros cúbicos que o compactador pode conseguir com essa densidade específica em uma unidade de tempo. (ARQUIE, 1972).

Vivar (1991), indica que, apesar de ter sido comprovada que a vibração é um fator importante para obter a densidade requerida de uma maneira mais rápida, tem se determinado também que a velocidade de rolamento é o parâmetro talvez mais importante na compactação de solos. Quanto mais lento se movimenta o rolo sobre a superfície que se compacta, mais perto estarão os pontos de impacto devidos à vibração e, pelo contrário, quanto mais rápido se movimenta o rolo, mais apartados estarão os pontos de impacto. Isto significa que de dois rolos

com as mesmas amplitudes, o de maior velocidade necessitará dar maior número de passadas para conseguir os mesmos resultados que o de menor velocidade.

Segundo Jeuffroy (1973), os problemas essenciais da compactação estão na escolha do equipamento que melhor se adapte aos solos ou aos materiais a compactar e determinação do número de passadas mais econômico.

A capacidade de compactação é muito importante para decidir o tipo e número de rolos necessários para um serviço. Normalmente, a decisão a respeito de quantos rolos deve ser utilizados é tomada no estágio de orçamento, quando os cálculos de capacidade, juntamente com os cálculos de custo, formam a base do custo de compactação estimado do serviço em questão. (DYNAPAC, 1981).

Segundo Arquie (1972), Jeuffroy (1973), Dynapac (1981), Rico e Del Castillo (1982), Guimarães (2001) e Helio de Souza e Catalani G. (2002), a produção das unidades compactadoras pode ser estimada mediante a seguinte equação:

$$Q_{\text{rolos}} = \frac{l \times e \times V \times E \times 1000}{n} \dots (m^3 / h) \dots \dots \dots \text{Equação 3.4}$$

Onde:

Q = capacidade de compactação, em metros cúbicos/hora;

l = largura útil do rolo, em metros;

e = espessura da camada após compactação, em metros;

V = velocidade do equipamento, em quilômetros/hora;

n = número de passadas para atingir o grau de compactação por camada, na largura útil do rolo compactador;

E = fator de eficiência do equipamento;

Para a compactação de misturas betuminosas, esta se expressa em toneladas/hora como indicado a seguir:

$$Q_{rolos} = \frac{l \times e \times V \times E \times 1000}{n} \times \rho \dots (ton / h) \dots \dots \dots \text{Equação 3.5}$$

Sendo ρ = densidade da mistura compactada, em toneladas/metro cúbico.

Segundo o Instituto de Asfalto (1989), a rolagem das camadas asfálticas devem começar logo que possível após se ter espalhado a mistura quente. A rolagem compreende três fases consecutivas: acomodamento ou rolagem inicial, rolagem intermédia, e rolagem final. A rolagem de acomodamento compacta o material, além da compactação conferida pela pavimentadora, quando se obtém quase toda a densidade que se quer. A rolagem intermédia densifica e sela a superfície. A rolagem final apaga as marcas dos rolos e outras imperfeições deixadas na rolagem anterior.

A rolagem de acomodamento realiza-se melhor com os rolos lisos de rodas de aço. Os rolos pneumáticos e os tandem vibratórios podem ser utilizados na compactação intermediária. A rolagem final faz-se, sobretudo, para melhorar o aspecto da superfície. Deve ser realizada com rolos lisos tandem, rolos de carga estática e rolos vibratórios tandem (sem usar a vibração). (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989).

3.2.3. Distribuidor ou caminhão espargidor de asfalto

O distribuidor de asfalto é o equipamento que tem por objetivo específico a aplicação do produto asfáltico uniformemente e nas quantidades especificadas.

O distribuidor de asfalto consiste num tanque isolado, montado num caminhão (carro-tanque) ou num reboque, de capacidade de 3 mil a 20.8 mil litros. A maioria dos

distribuidores é equipamentos com sistema de aquecimento que mantém o asfalto na temperatura adequada de aspersão. Aplica tanto uma capa ou pintura de imprimação como de ligação numa superfície a ser pavimentada. As capas de imprimação são aplicações de asfalto diluído, numa superfície absorvente, como a base granular. As capas ou pinturas de ligação são aplicações muito leves de emulsão asfáltica, numa superfície pavimentada.

Uma das partes mais importantes do distribuidor é a barra espargidora. É através da barra espargidora e seus bicos, que a quantidade apropriada de asfalto é forçada sob pressão contra a superfície da camada. Para se obter resultados, devem-se selecionar o tamanho correto de bicos para o tipo e grau do asfalto e a taxa de aplicação.

O ângulo do eixo maior da abertura dos bicos deve ser ajustado de modo que os leques espargidores não interfiram uns com os outros. O ângulo de bico varia de acordo com a marca do distribuidor, porém, são típicos os valores entre 0,26 a 0,52 radianos (15 a 30 graus). É importante que todos os bicos sejam ajustados ao ângulo apropriado dentro dos leques pela ação do vento. (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989).

As barras espargidoras usuais são de três tipos: barras de pulverizadores; barras Eure-et-Loir e barras de jatos múltiplos.

As barras de pulverização são simples e formam cones de ligante, com repartição pouco regular.

As barras Eure-et-Loir estão constituídas por tubos concêntricos, rodando o tubo interior sobre o exterior que está perfurado com buracos de 3 milímetros de diâmetro e separados 1 centímetro. O ligante se estende a baixa pressão (200 a 500 g/m²).

As barras de jatos múltiplos estão constituídas por grupos de dois bicos que estendem jatos triangulares para assegurar um recobrimento triplo. A largura da barra é variável. Essas barras são usadas para ligantes a frio e a quente. (JEUFFROY, 1973).

Segundo o Instituto de Asfalto (1989), para obter a taxa de aplicação que se deseja, a velocidade do distribuidor deve ser determinada para uma dada vazão da bomba e comprimento de cobertura. A barra espargidora deve exercer uma pressão constante e uniforme ao longo de todo o comprimento para que a saída seja igual por todos os bicos.

A distribuição do produto asfáltico pode ser realizada pela barra traseira do caminhão ou pelo distribuidor manual mediante uma mangueira de aplicação.



Figura 3.6 – Distribuidores de asfalto com barra espargidora.

Fonte: TRB (2000).

O Instituto de Asfalto (1989), indica que a velocidade do distribuidor e o comprimento da carga de asfalto espalhado são determinados antes de começar o espargimento. Podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$V_{distrib.asf} = \frac{q}{l \times t} \dots (m / min) \dots \dots \dots \text{Equação 3.6}$$

Onde:

$V_{\text{distrib asf}}$ = velocidade do distribuidor, em metros/minuto;

q = vazão da barra distribuidora, em litros/minuto;

l = largura do espargimento, em metros;

t = taxa de aplicação, em litros/metro quadrado.

$$C = \frac{lt}{l \times t} \dots (m) \dots \dots \dots \text{Equação 3.7}$$

Onde:

C = comprimento do espargimento, em metros;

lt = total de litros a serem aplicados pelos distribuidores sobre a superfície;

l = largura do espargimento, em metros; e

t = taxa de aplicação, em litros/metro quadrado.

Uma vez determinado o comprimento da descarga de asfalto, o distribuidor tem que manter a velocidade preestabelecida constante. Embora o distribuidor contenha vários dispositivos medidores da taxa de aplicação de asfalto, é necessário que cálculos específicos sejam feitos após cada carga.

Para se verificar a taxa de aplicação, é necessário que o número de litros de asfalto aspergido seja conhecido junto com o comprimento e a largura do espargimento.

$$t = \frac{It \times m}{l \times C} \dots (\text{lit} / \text{m}^2) \dots \text{Equação 3.8}$$

Onde:

t = taxa de aplicação, em litros/metro quadrado;

It = total de litros aspergidos do distribuidor à temperatura de espargimento (leitura da haste de medição antes do espargimento menos a leitura da haste de medição após o espargimento);

m = Multiplicador de correção do volume de asfalto para a base de 15,6°C de tabelas de volume – temperatura;

l = Largura do espargimento, em metros;

C = Comprimento do espargimento, em metros.

3.2.4. Pavimentadoras de asfalto

Segundo a *National Asphalt Pavement Association – NAPA* (1996), o conhecimento sobre como trabalha uma pavimentadora e a forma em que a mesma produz material uniforme pode ser reduzido a dois conceitos básicos: a ação do autonivelamento da mesa pavimentadora e o procedimento para mover o material recebido, desde a caçamba receptora na frente da pavimentadora até a área antes da mesa.

As máquinas pavimentadoras foram introduzidas durante os anos de 1930, sendo capazes de colocar uma ampla gama de consistências e espessuras de materiais. A largura da máquina pode ser alterada para satisfazer o desenho da via e sua produção potencial era consideravelmente maior que os métodos manuais. (HARRIS, 1994).

A função da pavimentadora de asfalto é colocar uma determinada mistura de projeto sobre uma superfície irregular, enquanto reúne as especificações de superfície, textura e uniformidade. (NAPA, 1996).

Segundo o Instituto de Asfalto (1989), as acabadoras modernas movimentam-se sobre esteiras ou com rodas pneumáticas. Esses equipamentos podem colocar uma camada de pelo menos 25 milímetros até, aproximadamente, 250 milímetros de espessura, na largura de 1,8 metro a 9,8 metros. A velocidade de execução está geralmente na gama de 3 metros a 20 metros por minuto.

Esses equipamentos são compostos essencialmente de uma unidade tratora e uma unidade de mesa acabadora. A unidade tratora fornece a força motriz através das esteiras e rodas pneumáticas que se deslocam sobre a base da estrada. Incluem o motor, a tremonha receptora, a transportadora de alimentação, os parafusos de espalhamento, os controles e o assento do operador. A unidade de mesa acabadora raspa, compacta parcialmente e alisa a superfície do “pano” asfáltico, quando puxada para a frente.

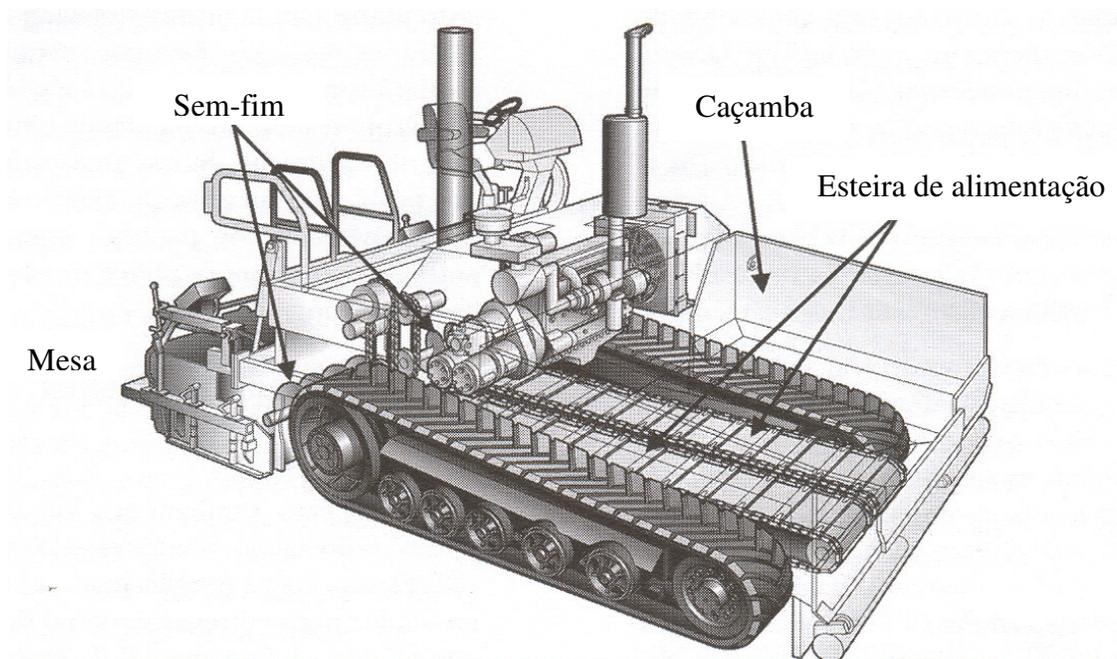


Figura 3.7 – Partes conformantes da pavimentadora de asfalto.

Fonte: adaptado da NAPA (1996)

Jeuffroy (1973) indica que, a parte ativa da pavimentadora é a viga alisadora ou *screed*, que está unida a um braço de tração, articulado sobre o bastidor da máquina. O conjunto de braço e viga, flota sobre o aglomerado e está em equilíbrio sob o efeito de três forças: o peso do equipamento, o esforço de tração na articulação e a reação da mistura sob o *screed*.

Scherocman e Materson (1984), indicam que o *screed* vibratório desses equipamentos permite que a mistura seja pré-compactada. Esta pré-compactação, antes da compactação convencional do rolo, reduz o esforço de compactação necessário pelos rolos antes de alcançar a densidade e teor de vazios apropriados.



Figura 3.8 – Pavimentadora de esteiras colocando mistura asfáltica.

Fonte: cedido pela CIBER (2007)

Atualmente, as pavimentadoras também cumprem a função dos espalhadores de agregados. Como é conhecido, o uso de agregados pétreos em obras de pavimentação asfáltica é bastante comum. Esses agregados minerais são aplicados em camadas, devendo ser espalhados em espessuras determinadas e uniformes. Os dispositivos para essa finalidade são os espalhadores de agregados (*spreader*), que se diferenciam em função da espessura da camada de pedra britada que

se deseja obter. Os espalhadores de agregados são empregados para a execução de tratamentos superficiais betuminosos, no caso de camadas finas ou delgadas. Para as camadas mais grossas, são empregados para o espalhamento britas graduadas, misturas estabilizadas granulometricamente, solo-cimento, solo-brita, pré-misturados a frios com ligantes betuminosos, entre outros. (GUIMARÃES, 2001).

A NAPA (1996), indica que um aspecto fundamental de uma pavimentação uniforme é manter uma velocidade constante. Isto é um fator variável, o qual pode ser controlado pelo operador do equipamento. A maior parte das pavimentadoras de asfalto modernas é equipada com dispositivos de “controle de velocidade”, os quais facilitam o trabalho do operador de manter uma velocidade de pavimentação estabelecida.

Segundo a Dynapac (1989), o Instituto de Asfalto (1989), a Caterpillar (1995), e a TRB (2000), a velocidade da pavimentadora é determinada pelo volume de material fornecido à máquina que depende da taxa de produção da usina de asfalto. A velocidade da pavimentadora deve ser a mais constante possível, já que variações na velocidade trazem como resultado diferentes níveis de pré-compactação. Os melhores resultados são obtidos quando há equilíbrio entre a taxa de produção na usina e a taxa de colocação na pista.

Segundo a Caterpillar (1995), o índice de compactação depende de diversos fatores: projeto da mistura, velocidade de pavimentação, espessura da camada e velocidade dos vibradores.

A *Australian Asphalt Pavement Association – AAPA* (2001) e a Dynapac (1989) indicam que a velocidade de avanço de uma pavimentadora necessária para equilibrar a produção na usina obtém-se pela seguinte expressão:

$$V_{pav} = \frac{Q_{usina} \times 1000}{60 \times l \times e \times \rho} \dots (m/min) \dots \dots \dots \text{Equação 3.9}$$

Onde:

V_{pav} = velocidade de avanço da pavimentadora, em metros/minuto;

Q_{usina} = taxa de produção da usina, em toneladas/hora;

l = largura do espalhamento do equipamento, em metros;

e = espessura da camada compactada, em milímetros;

ρ = densidade da mistura compactada, em toneladas/metro cúbico.

Alternativamente, a taxa de entrega ou capacidade de uma pavimentadora para uma determinada velocidade pode ser calculada a partir de:

$$Q_{pav} = \frac{60 \times V_{pav} \times l \times e \times \rho \times E}{1000} \dots (ton/h) \dots \dots \dots \text{Equação 3.10}$$

Nesta equação, a Dynapac (1989), incorpora o fator de eficiência do equipamento (E).

Além disso, o Instituto de Asfalto (1987) apresentou o *Speed Number* ou Números de Velocidades para a determinação das velocidades das pavimentadoras em função da taxa de produção da usina e da densidade da mistura compactada. As velocidades do equipamento são expressas na seguinte equação:

$$V_{pav} = \frac{SpeedNumber}{l \times e} \dots (m/min) \dots \dots \dots \text{Equação 3.11}$$

Onde:

V_{pav} = velocidade do equipamento, em metros/minuto;

Speed Number = números de velocidade indicados na tabela 3.7;

l = largura de espalhamento, em metros;

e = espessura da camada compactada, em centímetros.

Densidade da mistura (ton./m ³)	Taxa de Produção (ton./h)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
2.0	83.3	166.7	250.0	333.3	416.7	500.0	583.3	666.7	750.0	833.3
2.1	79.4	158.7	238.1	317.5	396.8	476.2	555.6	634.9	714.3	793.6
2.2	75.8	151.5	227.3	303.0	378.8	454.5	530.3	606.1	681.8	757.6
2.3	72.5	144.9	217.4	289.8	362.3	434.9	507.2	579.7	652.2	724.6
2.4	69.4	138.9	208.3	277.8	347.2	416.7	486.1	555.6	625.0	694.4

Tabela 3.7 – Speed Number para uso na equação da velocidade da pavimentadora.

Fonte: adaptado do Instituto de Asfalto (1987)

Segundo Geller (1984), as misturas asfálticas quando colocadas na pista deverão ter uma porcentagem de empolamento dependendo da granulometria do agregado que as compõe. A seguir são ilustradas estas características:

Espessura colocada mm (pol)	Espessura compactada mm (pol)	Quantidade total a ser compactada mm (pol)
32 a 38 (1,25 a 1,50)	25 (1,0)	6 a 13 (0,25 a 0,50)
51 a 57 (2,00 a 2,25)	38 (1,5)	13 a 19 (0,50 a 0,75)
64 a 79 (2,50 a 2,75)	51 (2,0)	13 a 19 (0,50 a 0,75)
83 a 89 (3,25 a 3,50)	64 (2,5)	19 a 25 (0,75 a 1,00)
102 (4,0)	76 (3,0)	25 (1,0)

Tabela 3.8 – Espessura típicas de colocação de misturas betuminosas considerando o empolamento.

Fonte: adaptado de Geller (1984)

3.2.5. Usinas de asfalto

Utilizada na produção de misturas asfálticas, as usinas de asfalto são instalações mecânicas que secam e aquecem os agregados e os dosificam com o objetivo de obter uma curva granulométrica estabelecida, além de aquecer e promover a dosagem do betume, que é misturado com os agregados.

A massa asfáltica constitui-se de uma combinação de agregados, pó e ligante betuminoso, de maneira que a superfície de todas as partículas minerais fique coberta de forma homogênea por uma película de ligante. (ABAD, 1991).

Segundo Day (1989), o diagrama de uma usina de asfalto apresenta três processos gerais:

- Alimentação em frio e transporte;
- Secagem e coleta de pó;
- Dosagem e mistura dos agregados e os materiais betuminosos.

O DNIT (2006), no seu *Manual de Pavimentação*, divide as usinas de asfalto em dois tipos básicos: as usinas gravimétricas e volumétricas e as usinas TSM (tambor – secador – misturador) ou *Drum Mixer*.

Todas elas podem ser estacionárias (localizadas em um sítio permanente) ou portáteis (transladadas de obra em obra) e são classificadas pelas toneladas de mistura que podem produzir por hora. (INSTITUTO DE ASFALTO, 1983).

- Usinas gravimétricas e volumétricas

As usinas gravimétricas, também chamadas de descontínuas são as usinas que apresentam produção descontínua, já que os fluxos dos agregados, do ligante e da mistura são intermitentes.

Segundo a *Wirtgen Group/Ciber* (2006), os principais componentes de uma usina gravimétrica são:

- ❖ Dosador de agregados frios;
- ❖ Secador de agregados;

- ❖ Peneira classificadora;
- ❖ Silos quentes;
- ❖ Balanças (agregados, CAP, *filler* e pó);
- ❖ Misturador (*pug mill*);
- ❖ Filtro.

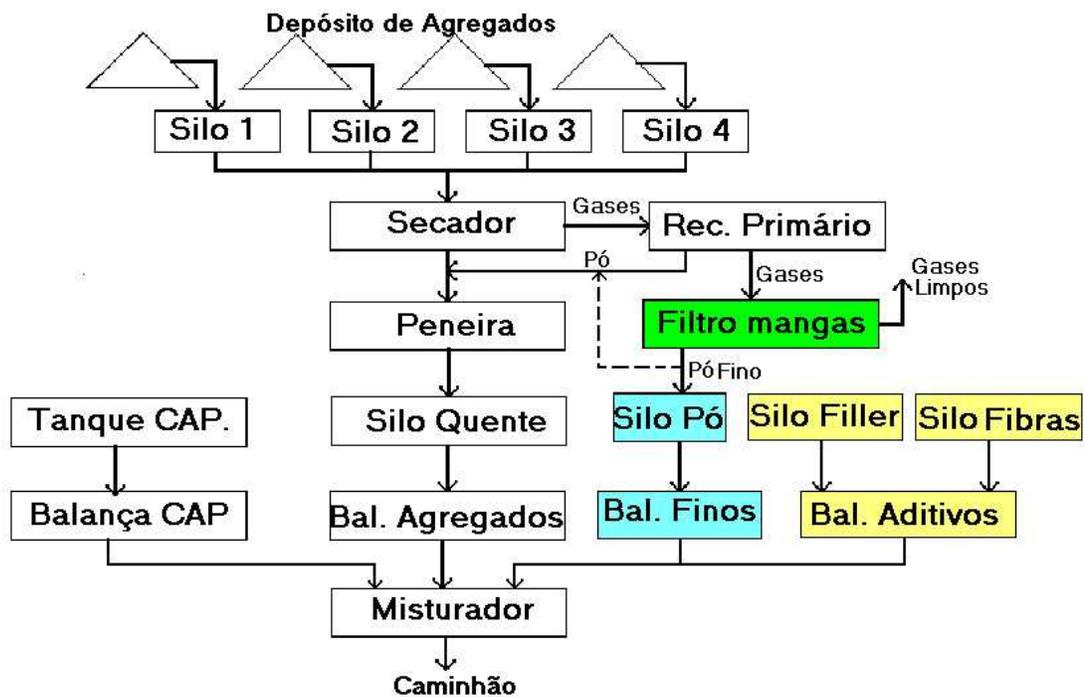


Figura 3.9 – Fluxograma de uma usina gravimétrica ou descontínua.

Fonte: Wirtgen Group/Ciber (2006).

Ao contrário, as usinas volumétricas também chamadas de contínuas, são as usinas que apresentam produção contínua ou constante, já que os fluxos dos agregados do ligante e da mistura são ininterruptos.

A Wirtgen Group/Ciber (2006), indica que os principais componentes de uma usina volumétrica são:

- ❖ Dosador de agregados;
- ❖ Secador;
- ❖ Misturador (*pug mill*);
- ❖ Filtro;
- ❖ Silo de descarga.

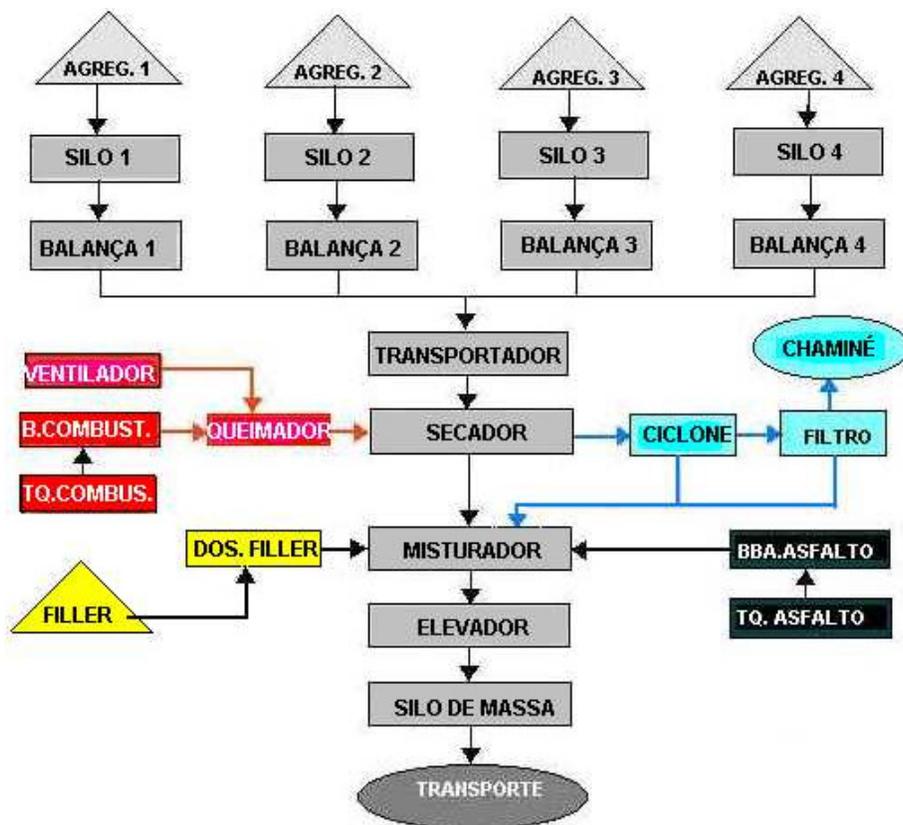


Figura 3.10 – Fluxograma de uma usina volumétrica ou contínua.

Fonte: Wirtgen Group/Ciber (2006).

A produção da mistura asfáltica nessas usinas inicia-se com a carga dos diferentes tamanhos de agregado nos silos e alimentadores, geralmente para três ou quatro materiais. Os alimentadores são adequadamente calibrados para fornecer a quantidade conveniente de cada agregado, para a composição da granulometria especificada. Todo o material é coletado em uma correia transportadora e é lançado no interior do tambor secador.

O Instituto de Asfalto (1974), indica que o secador executa duas funções:

- ❖ Ele vaporiza e remove a umidade, e
- ❖ Ele aquece o agregado à temperatura de mistura.

O secador, usualmente com 0,90 a 3,00 metros de diâmetro e 4,50 a 12,00 metros de comprimento, é equipado com depressões ou canais longitudinais, chamados aletas, que levantam o agregado e o deixam cair sobre as máscaras, através da chama e dos gases do queimador. A inclinação do cilindro, sua velocidade de rotação, diâmetro, comprimento a disposição e o número das aletas controlam o espaço de tempo necessário para o agregado atravessar o secador. (INSTITUTO DE ASFALTO, 1974).

Além disso, a capacidade do secador está diretamente ligada ao teor de umidade dos agregados e à quantidade de finos (partículas menores que 0,075 milímetros). Assim, o agregado com excesso de umidade ou grande quantidade de finos, solicita o aumento de chama no queimador ou a redução da quantidade de alimentação. Logo, a capacidade da usina não depende somente de um fator, mas de um conjunto de condições do agregado. (FAÇO, 1975).

Segundo o DNIT (2006), no seu *Manual de Pavimentação*, o secador deve deixar a mistura dos agregados com um teor de umidade inferior a 1,0%. Na prática, obtém-se agregados com um teor de umidade de 0,5%, pois a remoção da água restante é extremamente difícil. Quando a temperatura especificada para a mistura não é atingida, após a regulagem do queimador, impõe-se diminuir o fluxo dos agregados, o que se

consegue por intermédio de uma redução proporcional das aberturas dos portões dos alimentadores frios, ocasionando um decréscimo de produção.

A fim de se reduzir os inconvenientes que resultariam do lançamento do pó na atmosfera, são instalados sistemas coletores de pó nas usinas, bem como para possibilitar a recuperação de uma parcela dos finos que são retirados dos agregados no secador. O sistema coletor é constituído fundamentalmente por uma tubulação na qual são instalados, pela ordem, uma ventoinha e um ciclone. A mistura de gases mais pó succionada no interior do secador, por intermédio da ventoinha, é encaminhada para o ciclone, onde os finos são separados dos gases pela força centrífuga. Em certos tipos de usina, a fração de pó recuperada no ciclone retorna ao fluxo de agregado geralmente na base do elevador quente. Em outras usinas tal não ocorre, havendo, porém, a possibilidade de estocar-se, à parte, a parcela de finos recuperada. Os gases são expelidos pela chaminé. (DNIT, 2006)

Segundo o Instituto de Asfalto (1974), nas usinas gravimétricas, o agregado seco e quente, ao sair do secador, é introduzido num elevador de canecas, e descarregado na peneira vibratória montada sobre os silos de estocagem de material quente, na torre da usina. A função das peneiras quentes é separar com exatidão os agregados nos tamanhos especificados. A capacidade das peneiras depende do seu tipo, área útil, limpeza das peneiras e das características de peneiramento do agregado.

Os agregados aquecidos provenientes do peneiramento são descarregados nos silos quentes, no caso das usinas gravimétricas, e do secador, nas usinas volumétricas.

A Faço (1975), indica que nas usinas gravimétricas, dos silos de agregado quente, o material é pesado na balança, conforme as proporções indicadas, para compor as especificações e descarregado no misturador. O *filler* mineral é adicionado quando necessário. O agregado é então misturado a seco durante alguns segundos, antes da introdução da quantidade pré-fixada de cimento asfáltico quente.

Para o caso das usinas volumétricas, o material proveniente do secador e o asfalto em conjunto são introduzidos volumetricamente no misturador e a mistura produzida é

descarregada de forma contínua. Os dispositivos para abastecimento de asfalto e agregado são interligados para manterem automaticamente as proporções corretas. (INSTITUTO DE ASFALTO, 1974).

O DNIT (2006), sinaliza que a capacidade do misturador é dada pelo volume do sólido formado entre o plano que passa pela seção média dos eixos e o seu fundo. Como função desse volume, da densidade dos materiais e do tempo de mistura, inferior a 40 segundos, tem-se a capacidade da usina.

Nas usinas gravimétricas ou descontínuas, os agregados e o *filler* são, inicialmente, misturados sem ligante. O intervalo de tempo que decorre entre a abertura da comporta da balança, e o início da injeção do ligante, através da barra distribuidora, é denominado “tempo de mistura seca”. Este intervalo deve ser fixado de forma a ser suficiente para que se possa processar uma homogeneização perfeita entre os agregados e o *filler*. O “tempo de mistura úmida” será, por sua vez, o intervalo decorrido entre o término da injeção do ligante e o momento da abertura da comporta do misturador. A delimitação de “tempo de mistura úmida” deve ser feita de forma que, ao cabo do mesmo, todas as partículas da mistura de agregados mais *filler* estejam recobertas uniformemente pelo ligante.

No entanto, o tempo de mistura úmida não poderá ser menor que 20 segundos. A soma dos “tempos” de mistura seca e de úmida não poderá ser menor que 40 segundos. Diante disso, a produção horária de uma usina será o produto da capacidade do misturador em toneladas por 80 (número das misturas feitas, no intervalo de tempo de 45 segundos, em uma hora). (DNIT, 2006).

- Usinas TSM (tambor secador – misturador) ou *Drum Mixer*

Neste tipo de usinas a grande alteração, em relação às gravimétricas, é a eliminação das peneiras, silos quentes e principalmente do misturador, já que o tambor do secador também faz a função de misturador.

Como foi classificada, a TSM é uma usina volumétrica ou contínua. Conseqüentemente, a sua calibração é feita através das alturas das comportas dos silos frios. Na correia que alimenta o secador com os agregados dos silos frios, pode-se adaptar o chamado controle ponderal, que pesa eletronicamente a quantidade de agregado em um determinado comprimento da correia, dada uma determinada velocidade dela. (DNIT, 2006).

Segundo a *Wirtgen Group/Ciber* (2006), os principais componentes de uma usina tipo *Drum Mixer* são:

- ❖ Dosador de agregados;
- ❖ Secador - misturador;
- ❖ Homogeneizador;
- ❖ Silo de descarga.

A capacidade de produção destas usinas é normalmente relacionada com a temperatura do agregado, a temperatura de descarga da mistura, o calor específico do agregado e o teor médio de umidade do agregado de 5% para uma usina operando no nível do mar. As capacidades das usinas também são afetadas por uma série de outras variáveis, incluindo diâmetro do tambor, tipo de combustível, a velocidade do fluxo de gás, a capacidade do exaustor, excesso de ar no queimador, quantidade de ar de fuga no sistema e condições atmosféricas. (TRB, 2000).

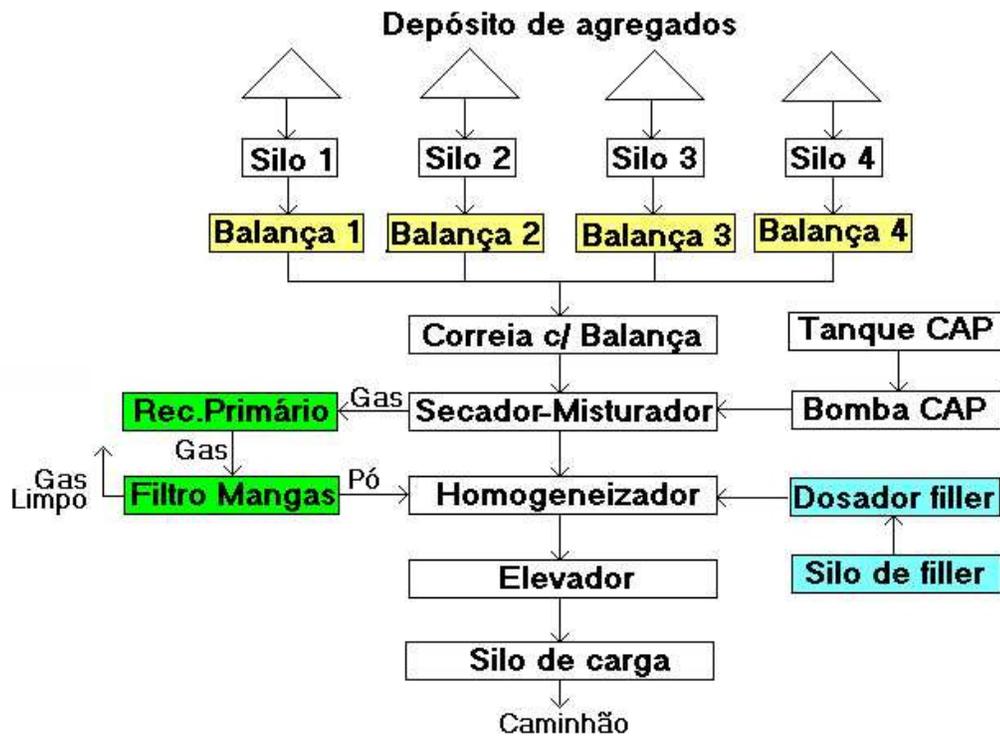


Figura 3.11 – Fluxograma de uma usina *Drum Mixer*

Fonte: Wirtgen Group/Ciber (2006).

As primeiras usinas *Drum Mixer* foram de fluxo paralelo, nas quais os agregados e os gases quentes movimentam-se no mesmo sentido como mostrado na figura 3.12 a seguir:

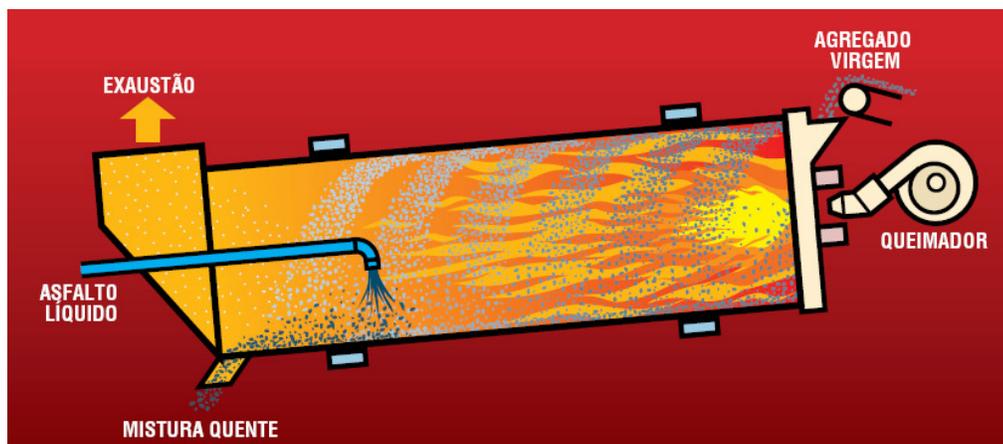


Figura 3.12 – Misturador de tambor de fluxo paralelo.

Fonte: Don Brock (1998).

A grande solução mecânica para o funcionamento das usinas *Drum Mixer* de fluxo paralelo está dentro do secador, através da configuração das aletas. No início do tambor do secador, quando ocorre a carga, as aletas têm a forma de espirais, que contêm parte do material, evitando, com um véu de pouco material, o afogamento da chama do queimador. Na parte média do tambor, as aletas com formato de um “J” promovem a queda do material formando um véu completo que impede a penetração da chama do queimador a partir desta seção. O formato das aletas, pois, cria duas zonas no tambor, a zona de radiação e a zona de convecção. A zona de radiação tem a maior quantidade de energia calorífica, através da chama do queimador a óleo de baixa pressão, e conseqüentemente, onde o agregado sofre maiores aquecimento e secagem. Na zona de convecção, o asfalto é injetado no melhor ponto dentro do tambor, iniciando-se a mistura que continua na zona de revestimento, onde os agregados são melhor envolvidos pela ação espumante do ligante. (DNIT, 2006).

Posteriormente, foram introduzidas no mercado as usinas contrafluxo, nas que os agregados e os gases quentes movimentam-se em sentidos opostos, como mostrado na figura 3.13 a seguir:

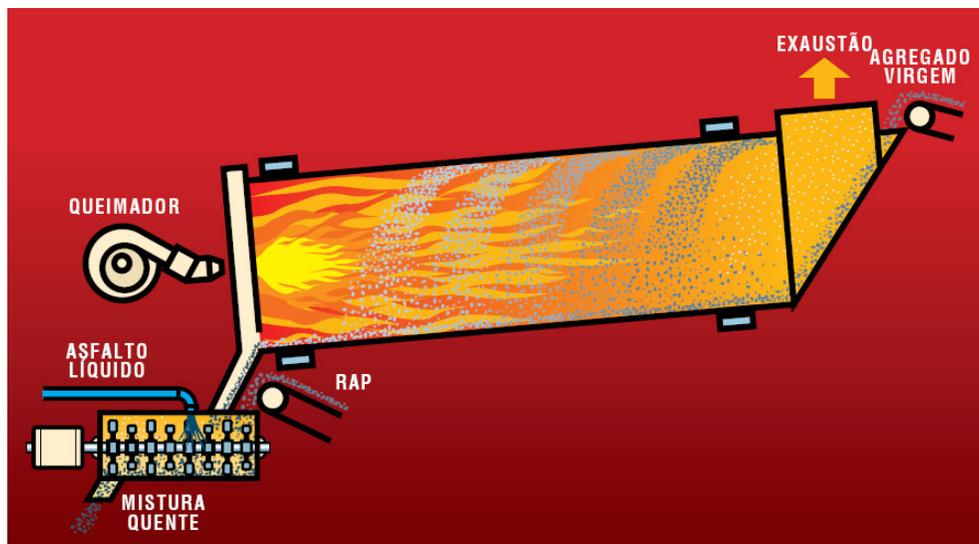


Figura 3.13 – Misturador de tambor contrafluxo.

Fonte: Don Brock (1998).

3.2.5.1. Previsão da taxa de produção de usinas de asfalto

Apesar de existirem muitos componentes em uma instalação de mistura a quente de asfalto, são os componentes listados abaixo que desempenham as principais tarefas na produção da mistura a quente – secagem e aquecimento do agregado. O resto do equipamento em uma instalação é dedicado ou a introduzir o agregado no processo de secagem, ou a levar o agregado seco para produzir a mistura a quente. (NAPA, 1998).

- Queimador;
- Secador (em usinas gravimétricas), ou secador/misturador (em usinas *Drum Mixers* ou outros tipos de instalação de fluxo contínuo);
- Coletores primário e secundário de pó;
- Exaustor.

Em muitos aspectos, o processo de secagem, ou os componentes do fluxo de gás processado, são o coração da planta. (NAPA, 1998).

Segundo o DNIT (2006), no seu *Manual de Pavimentação*, os fatores mais importantes na produção de mistura asfáltica quente, além do teor de umidade que os agregados encerram, são a temperatura ambiente, o correto dimensionamento do secador quanto ao diâmetro e o comprimento, a quantidade de calor do combustível usado no queimador e a velocidade do gás no tambor.

Segundo a NAPA (1998), para se determinar a capacidade de produção dos componentes de um fluxo de gás processado, é importante saber que as peças primárias do equipamento que merecem atenção são o queimador, secador e exaustor. Apesar de os coletores primários e secundários serem importantes, sob um ponto de vista prático, seus tamanhos não contribuem para a produção, mas somente afetam a capacidade de produção se seus tamanhos forem muito

pequenos. Aconselha o uso do secador de agregado como ponto inicial na verificação do dimensionamento dos outros componentes.

A indústria reconhece certas velocidades máximas de gás para o secador de agregado e para o secador/misturador. Estas velocidades indicarão o máximo fluxo de gás recomendável para o secador:

- Este fluxo de gás indicará certos requisitos para o exaustor;
- O máximo fluxo de gás recomendável para o secador também dará previsões para a taxa de produção;
- Essa previsão da taxa de produção indicará certos requisitos para o queimador;
- Depois de ter em consideração a saída e outros requisitos do exaustor, o fluxo total de gás indicará o tamanho do equipamento requerido para o controle da poluição do ar;
- Quando for analisada a previsão de taxa de produção de uma instalação existente, é necessário se começar pelo tamanho do secador.

Passo 1: Máximo fluxo de gás para o secador de agregado

A NAPA (1998), indica que a faixa de velocidades em metros/minuto, atualmente usada como prática padrão, é:

- Contrafluxo no secador de agregado: 244 m/min. a 305 m/min;
- Fluxo paralelo no secador de agregado (típico de um tambor secador misturador – *Drum Mixer*): 305 m/min. a 366 m/min.

O fluxo máximo de gás recomendável pode ser determinado para um dado secador multiplicando-se a área da seção transversal do secador pela máxima velocidade de ar recomendável.

$$V_{gás} = [\pi \times r^2] \times v \dots (m^3 / \text{min}) \dots \dots \dots \text{Equação 3.12}$$

Onde:

$V_{gás}$ = Máximo fluxo de gás para o secador em metros cúbicos/minuto;

r = Raio do secador em metros;

v = Velocidade de gás recomendada no secador em metros/minuto.

As tabelas 3.9 e 3.10 a seguir resumem os máximos valores de fluxo de gás recomendados, em m³/min, para vários tamanhos de secadores e de tambores secadores misturadores – *Drum Mixer*, usando faixas de velocidade de 244 m/min a 305 m/min, para secadores de contrafluxo, e 305 m/min a 366 m/min, para tambores secadores misturadores de fluxo paralelo.

Diâmetro de secador contrafluxo	Fluxo de gás no secador (m ³ /min.) com velocidade de:		
	244 m/min.	274 m/min.	305 m/min.
1,80 m	621	697	776
2,10 m	845	949	1056
2,40 m	1104	1240	1380
2,70 m	1397	1569	1746
3,00 m	1725	1937	2156

Tabela 3.9 – Máximos valores de fluxo de gás recomendados para secadores contrafluxo.

Fonte: adaptado da NAPA (1998)

Diâmetro de secador fluxo paralelo	Fluxo de gás no secador (m ³ /min.) com velocidade de:		
	305 m/min.	335 m/min.	366 m/min.
1,80 m	776	852	931
2,10 m	1056	1160	1268
2,40 m	1380	1516	1656
2,70 m	1746	1918	2096
3,00 m	2156	2368	2587

Tabela 3.10 – Máximos valores de fluxo de gás recomendados para secadores fluxo paralelo.

Fonte: adaptado da NAPA (1998)

Passo 2: Capacidade do exaustor para o tamanho do secador e os requisitos totais do sistema

Segundo a NAPA (1998), sem um exaustor propriamente dimensionado, o fluxo de gás requerido não pode ser mantido no secador. Se não for possível manter o fluxo alvo de gás para o secador, então a taxa de produção será afetada. O trabalho de manter o fluxo de gás delineado para secador cai sobre o exaustor.

Potência, velocidade do ventilador e a habilidade deste de lidar com a pressão estática são os elementos principais para se determinar a capacidade do ventilador.

Ventiladores são projetados para agüentar certa quantidade de gás, com certa quantidade de potência, contra uma dada pressão estática. Esse grau de sucção (pressão estática) é muito importante na análise da capacidade do ventilador. Se o ventilador não for capaz de lidar com os requisitos de sucção de todo o sistema, então o resultado será um fluxo de gás reduzido.

É importante, portanto, na análise se o ventilador está propriamente dimensionado para o secador, se levar em conta a capacidade de pressão estática do ventilador. Fabricantes de ventilador podem fornecer gráficos para auxiliar nesta análise. Se obtida esta curva para um respectivo ventilador e feita a análise da pressão estática acumulada ao longo da instalação, determinando-se se o exaustor da instalação está preparado para o serviço requerido.

Para os requisitos de pressão estática do sistema (ventilador), a NAPA (1998), apresenta as pressões estáticas de campo em *inches of water gauge* – w.g. (*inches of water column*: pressão medida em polegadas de coluna de água) no contra-fluxo de uma instalação gravimétrica e em um fluxo paralelo em um tambor misturador (*Drum Mixer*), depois das condições de operação terem sido corrigidas para 21°C, que é a temperatura na qual a maioria das curvas do ventilador é calculada:

- Usinas gravimétricas com lavadores de gases: 22” w.g. (*inches of water gauge*);
- Usinas gravimétricas com casa de filtro: 17” w.g.;
- Usina TSM com lavadores de gases: 17” w.g.;
- Usina TSM com casa de filtro: 12” w.g.

Depois de ser feito isso, a capacidade do ventilador deve ser confrontada com a finalidade de lidar com essa pressão estática, na potência conectada e na velocidade de operação deste, com a curva fornecida pelo fabricante.

Passo 3: Expectativas de produção do secador de agregados

A tabela 3.11, a seguir, apresenta importante informação para o entendimento do efeito que o excesso de ar tem no exaustor e na demanda de calor. A quantidade de ar requerido para se queimar combustível é referido ao volume estequiométrico (*Stoic.*) de ar. Para se assegurar uma combustão completa, tipicamente 25% a 50% adicionais de excesso de ar são requeridos. A tabela 3.11 mostra que com um queimador propriamente dimensionado e ajustado, para 25% de excesso de ar, o produtor precisa de 3,85 m³/min. para cada tonelada de produção em uma planta gravimétrica contrafluxo, e 3,88 m³/min. por tonelada de produção em fluxo paralelo em um *Drum Mixer*.

Excesso de ar (% de Stoic)	Usina gravimétrica Exaustor a 124°C Secador a 135°C		Drum Mixer Exaustor a 144°C Secador a 155°C	
	Calor requerido (1000 kcal/ton.)	Volume de ventilação requerido [(m³/min.)/(ton./hora)]*	Calor requerido (1000 kcal/ton.)	Volume de ventilação requerido [(m³/min.)/(ton./hora)]**
0	67,6	3,38	65,2	3,40
25	68,4	3,85	66,2	3,88
50	69,4	4,32	67,2	4,36
75	70,3	4,80	68,2	4,84
100	71,1	5,27	69,2	5,32
125	72,0	5,74	70,2	5,80
150	73,0	6,21	71,1	6,28
175	73,9	6,68	72,1	6,76
200	74,7	7,16	73,1	7,25
225	75,7	7,63	74,1	7,72
250	76,6	8,10	75,1	8,21
275	77,4	8,57	76,1	8,69
300	78,3	9,04	77,1	9,17

* Produção de toneladas por hora de agregado seco
** Produção de toneladas por hora de mistura

Tabela 3.11 – Efeito do excesso de ar, no secador e na demanda de calor requerido.

Fonte: adaptado da NAPA (1998).

Com esta informação útil, pode-se chegar a taxas de produção esperadas para cada tamanho de secador de agregado, tomando o máximo fluxo de gás recomendado para o secador ($V_{gás}$) e dividindo-o pelo volume de ventilação requerido para uma tonelada de produção.

$$Q_{usina} = \frac{V_{gás}}{V_v} \dots (ton/h) \dots \dots \dots \text{Equação 3.13}$$

Onde:

Q_{usina} = Taxa de produção esperada da usina de asfalto, em toneladas/hora;

$V_{gás}$ = Máximo fluxo de gás para o secador em metros cúbicos/minuto;

V_v = Volume de ventilação requerido, em [(m³/min.)/(ton./hora)].

A NAPA (1998), apresenta as Tabelas 3.12 e 3.13 com ambas condições de 25% e 50% de excesso de ar. Em vista da proximidade dos dados apresentados na tabela 3.11 foram selecionados 3,90 m³/min. para 25% de excesso de ar e 4,40 m³/min. para 50% de excesso de ar no desenvolvimento das tabelas 3.12 e 3.13 a seguir. O seu arredondamento não afeta a precisão relativa das taxas de produção resultantes.

É importante apontar que os cálculos para estas tabelas foram baseados na instalação típica usada pela NAPA (1998), operando a 163 metros acima do nível do mar, com uma descarga de mistura a uma temperatura de 149°C e com 5 % de remoção de umidade superficial do agregado.

Para o caso de condições locais diferentes das estabelecidas pela NAPA (1998), recomenda-se fazer as correções de elevação, umidade do agregado e temperatura da mistura aplicando as seguintes regras práticas:

- Quando aumenta a altitude, reduzir a taxa de produção padrão de 10% para cada 1000 metros de aumento na altitude.
- Quando diminui a altitude, aumentar a taxa de produção padrão em 1,65% quando muda a condição padrão de 163 metros de elevação acima do mar.
- Quando aumenta a temperatura de descarga do material, reduzir a taxa de produção padrão de 2,50% por 10°C de mudança.
- Quando diminui a temperatura de descarga do material, aumentar a taxa de produção padrão em 2,50% por 10°C de mudança.
- Quando aumenta a umidade do agregado, reduzir a taxa de produção padrão em 13% para cada 1% de incremento de umidade.

- Quando diminui a umidade do agregado, aumentar a taxa de produção padrão em 13% para cada 1% de diminuição de umidade.

Diâmetro de secador contrafluxo	Taxa de produção esperada (ton./h) com velocidade do gás no secador de:					
	244 m/min.		274 m/min.		305 m/min.	
	25% excesso de ar	50% excesso de ar	25% excesso de ar	50% excesso de ar	25% excesso de ar	50% excesso de ar
	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.
1,80 m	159	141	179	158	199	176
2,10 m	217	192	243	216	271	240
2,40 m	283	251	318	282	354	314
2,70 m	358	318	402	357	448	397
3,00 m	442	392	497	440	553	490
<p>Condições de operação padrão para a instalação: 149°C de temperatura de descarga do material 5% de umidade (remoção do agregado) 163 metros acima do nível do mar 135°C de descarga de gás no secador de contrafluxo 155°C de descarga de gás no secador de fluxo paralelo</p> <p>Fator de correção para taxas de produção: Para corrigir as diferenças de umidade: subtrai 13% para cada 1% de incremento de umidade, e incorpora 13% para cada 1% de diminuição de umidade. Para corrigir as diferenças de elevação do secador: subtrai 10% para cada 1000 m de incremento de elevação, e incorpora 1,65% para condições sobre o nível do mar. Para corrigir as diferenças na temperatura do agregado: subtrai 2,5% para cada 10°C de incremento de temperatura, e incorpora 2,5% para cada 10°C de diminuição de temperatura.</p>						

Tabela 3.12 – Taxa de produção esperada para secador contrafluxo.

Fonte: adaptado da NAPA (1998).

Diâmetro de secador fluxo paralelo	Taxa de produção esperada (ton./h) com velocidade do gás no secador de:					
	305 m/min.		335 m/min.		366 m/min.	
	25% excesso de ar	50% excesso de ar	25% excesso de ar	50% excesso de ar	25% excesso de ar	50% excesso de ar
	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.
1,80 m	199	176	219	194	239	212
2,10 m	271	240	298	264	325	288
2,40 m	354	314	389	344	425	376
2,70 m	448	397	492	436	537	476
3,00 m	553	490	607	538	663	588

Condições de operação padrão para a instalação:
149°C de temperatura de descarga do material
5% de umidade (remoção do agregado)
163 metros acima do nível do mar
135°C de descarga de gás no secador de contrafluxo
155°C de descarga de gás no secador de fluxo paralelo

Fator de correção para taxas de produção:
Para corrigir as diferenças de umidade: subtrai 13% para cada 1% de incremento de umidade, e incorpora 13% para cada 1% de diminuição de umidade.
Para corrigir as diferenças de elevação do secador: subtrai 10% para cada 1000 m de incremento de elevação, e incorpora 1,65% para condições sobre o nível do mar.
Para corrigir as diferenças na temperatura do agregado: subtrai 2,5% para cada 10°C de incremento de temperatura, e incorpora 2,5% para cada 10°C de diminuição de temperatura.

Tabela 3.13 – Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo.

Fonte: adaptado da NAPA (1998).

As tabelas 3.12 e 3.13 reproduzem a taxa de produção esperada de uma usina com secador contrafluxo e fluxo paralelo, para diferentes diâmetros de secador e diferentes velocidades de gás no secador. Os valores foram baseados considerando condições de operação padronizadas pela NAPA (1998).

Os cálculos da velocidade de gás, do volume de gás e do dimensionamento do exaustor são feitos para assegurar que o secador possa produzir o esperado. Se o exaustor não for

propriamente dimensionado para prover o volume de gás necessário para o secador, além dos outros requisitos do exaustor, taxas de produção reduzidas podem ser esperadas e os números expressos nas tabelas anteriores não poderão ser mantidos.

Passo 4: Tamanho do queimador

Segundo a NAPA (1998), o queimador é uma das peças-chave do equipamento no sistema de fluxo de gás que afeta a capacidade de produção. Tem de ser propriamente dimensionado a fim de não restringir a produção. Um queimador muito pequeno pode restringir a produção. Um queimador muito grande pode causar um controle de temperatura ineficiente, queda insuficiente de calor e possíveis problemas de emissão de gás. É muito importante, portanto, ao se analisar a capacidade da instalação de secar e aquecer o agregado, verificar se o queimador está adequadamente dimensionado.

Para calcular os requisitos mínimos do queimador é mediante o emprego da Tabela 3.11 para determinar o calor requerido para se produzir mistura asfáltica quente em 1000 kcal/hora. Para o uso deste método simplesmente se deverá multiplicar a expectativa de taxa de produção, para o secador (Q_{usina}), e da Tabela 3.11, pelo Calor requerido em 1000 kcal/ton. para casos de 25% e 50% de excesso de ar. Conservadoramente, é melhor usar o fator de 50% se excesso de ar quando usar este método, uma vez que é o maior e mais razoável número.

$$C_{Queimador} = Q_{usina} \times C_r \dots (kcal / ton) \dots \dots \dots \text{Equação 3.14}$$

Onde:

$C_{queimador}$ = Capacidade do queimador, em quilocalorias/tonelada;

Q_{usina} = Taxa de produção esperada da usina de asfalto, em toneladas/hora;

C_r = Calor requerido para se produzir a mistura asfáltica quente em 1000 kcal/hora.

Ao se selecionar um queimador novo para a instalação se usando este método, é melhor escolher a queimador que é pelo menos 20% maior do que o indicado. Isto é consistente com a conclusão, usando o método da NAPA.

Em resumo, para a previsão da taxa de produção das usinas de asfalto se deverá realizar os seguintes passos:

- Determinar o máximo fluxo de gás para o secador ($V_{\text{gás}}$) com auxílio da equação 3.12;
- Determinar a capacidade do exaustor com auxílio de ábacos fornecidos pelos fabricantes;
- Determinar a expectativa de produção do secador de agregados (Q_{usina}), com auxílio da equação 3.13;
- Determinar a capacidade do queimador ($C_{\text{queimador}}$), com auxílio da equação 3.14.

4. ANÁLISE CRÍTICA ÀS VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO

4.1. Considerações iniciais

No capítulo 03, além de ter sido feita uma descrição geral dos equipamentos estudados, foram definidas e identificadas também suas equações de produção. O objetivo do presente capítulo é realizar uma análise crítica a todas as variáveis de produção identificadas, mediante a análise das equações, pesquisa bibliográfica referente às variáveis estudadas, proposta de faixa de valores recomendados para as variáveis de cada equação, criação de ábacos para a determinação rápida da produção do equipamento estudado, entre outros.

4.2. Motoniveladoras

As equações pesquisadas e indicadas no capítulo 3 referente à produção das motoniveladoras são princípios básicos da física.

Tempo = distância/velocidade;

Produção = Volume/tempo.

Na equação 3.1 se ilustram as distâncias percorridas avante (D_i) e distância percorridas a ré (D_r) e as velocidades do equipamento se diferenciam em velocidade do trajeto de ida durante o espalhamento na fase produtiva (V_i) e velocidade do trajeto de retorno na fase não produtiva (V_r).

Pelas variáveis da equação analisada fica claro então que a “ D_r ” percorrida numa velocidade “ V_r ” não influencia na produção do motoniveladora, por isso pode se deduzir que as distâncias percorridas “ D_i ” e “ D_r ” não podem ser interpretadas como uma somatória de distâncias, mas, sim, poderiam se traduzir como a distância média percorrida pelo equipamento (D_m) numa determinada área de regularização.

A variável “ N ” é o resultado de dividir a largura da área a ser regularizada pela largura da lâmina e multiplicar pelo número necessário de passadas que o equipamento precisa fazer para regularizar a camada.

Day (1989) afirma que, a velocidade de avanço durante o trabalho ou fase produtiva da motoniveladora é relativamente lenta e constante, para permitir ao operador manter o bom controle de seu nivelamento. A experiência do operador sob as diferentes condições de nivelamento fará possível estimar o número de passadas que são necessárias para realizar a operação de nivelamento. Podem ser empregados valores estimados destas variáveis, para determinar a produção de uma motoniveladora.

A equação 3.2 está em função das dimensões da área de trabalho, da espessura da camada a regularizar e do tempo empregado pelo equipamento para realizar esse trabalho, fornecido pela equação 3.1. Isto quer dizer que os valores de produção obtidos da equação 3.2 consideram que a lâmina da motoniveladora faz o trabalho de regularização no trajeto de ida. Na figura 4.1 se ilustra o trabalho de uma motoniveladora considerando as variáveis descritas na equação 3.1 e 3.2.

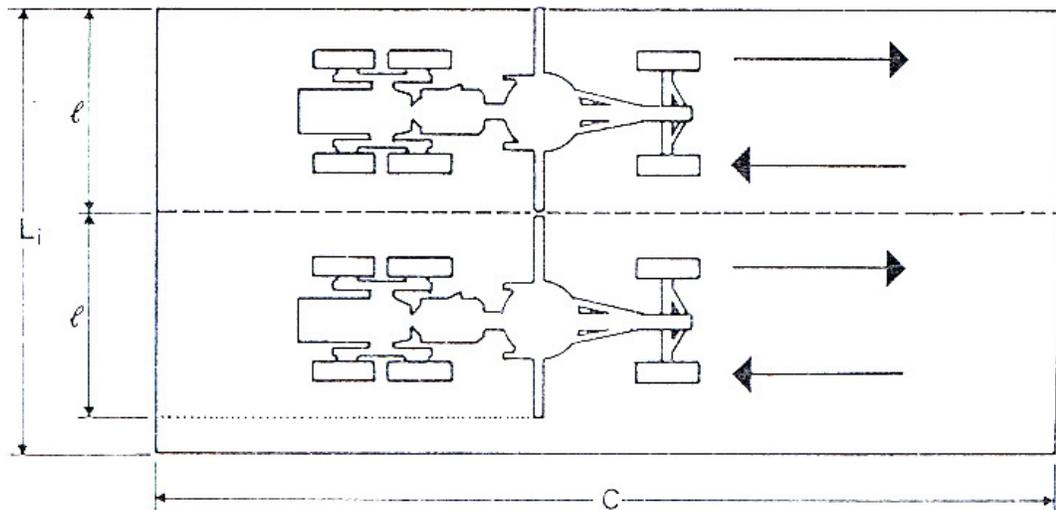


Figura 4.1 – Técnica empregada pela motoniveladora - passagem da lâmina em trajeto de ida

Fonte: Helio de Souza e Catalani G. (2002)

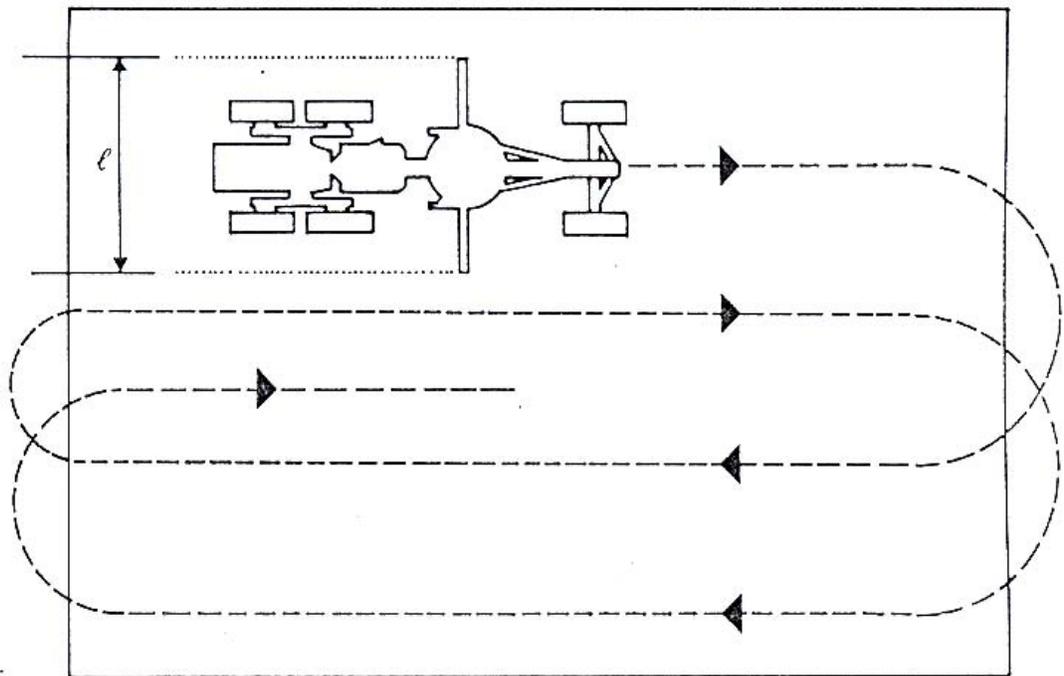


Figura 4.2 – Técnica empregada pela motoniveladora - passagem contínua da lâmina entre o início e o término da área a ser regularizada

Fonte: Helio de Souza e Catalani G. (2002)

Os valores de produção obtidos pela equação 3.3 consideram que a motoniveladora possui uma boa área de movimentação e o trabalho é realizado mediante a passagem contínua entre o início e o término da área a ser regularizada. Na determinação da produção mediante esta metodologia, as dimensões da área de trabalho não são variáveis envolvidas, mas, sim, a velocidade média “Vm” na fase produtiva do equipamento e a largura da lâmina como uma das principais variáveis. Na figura 4.2 se ilustra o trabalho descrito.

Outras características da equação 3.1, é que caso se aumente a velocidade, tanto nas fases produtiva “Vi” e não produtiva “Vr”, isso acarreta uma queda no tempo de trabalho “T” incrementando-se a produção do equipamento. Fica claro que o inverso também é válido, ou seja, diminuindo-se as velocidades “Vi” e “Vr”, um decréscimo na produção será ocasionado.

Comparada à equação 3.3 percebe-se a semelhança com a equação 3.4 dos rolos compactadores. Como mencionado por Archie (1972), para o caso dos rolos compactadores, analogamente para as motoniveladoras, as variáveis “n” e “e” são dependentes entre si. Isso quer dizer que o incremento ou a redução da espessura da camada “e” a regularizar, ocasionará maior ou menor número de passadas “n” necessário à homogeneização e ao nivelamento da camada na qual trabalha a motoniveladora.

Logo, identificadas as variáveis de produção das motoniveladoras, foi feita uma pesquisa nos principais catálogos técnicos e manuais fornecidos pelos fabricantes e tirou-se como resultado a Tabela 4.1, onde são apresentadas as principais características técnicas desses equipamentos.

Analisada a Tabela 4.1 percebeu-se que os fabricantes fornecem duas variáveis de produção ligadas diretamente com o equipamento, como são a largura da lâmina e a faixa de velocidades de movimentação.

A largura da lâmina se apresenta em dois tamanhos definidos: 3,658 metros e 4,267 metros.

As velocidades, apresentadas nos catálogos são as mínimas e máximas, tanto à frente como a ré, segundo a capacidade de cada equipamento. A média das velocidades mínimas é de 3,0 km/h e a máxima é de 46 km/h.

Esta informação é muito abrangente, já que os trabalhos de movimentação de terra feitos pelas motoniveladoras são realizados com velocidades bem menores do que 46 km/h.

Com o inconveniente descrito no parágrafo anterior, além de se precisar de uma bibliografia que recomende uma faixa de valores das outras variáveis envolvidas na produção das motoniveladoras, foi feita uma pesquisa nos livros e manuais técnicos disponíveis no mercado brasileiro, obtendo-se como resultado a Tabela 4.2.

Fabricante	Modelo	Potência líquida	Largura da lâmina (mm)	Velocidade (km/h)			
				À frente		A ré	
Caterpillar *com tração em todas as rodas	120H Global	93 kW / 125 HP	3658	3,6	42,6	2,9	33,7
	12H Global	108 kW / 145 HP	3658	3,8	44,0	3,0	34,7
	135H Global	101 kW / 135 HP	3658	3,6	41,9	2,9	33,1
	140H Global	123 kW / 165 HP	3658	3,8	44,0	3,0	34,7
	14H Global	164 kW / 220 HP	4267	4,0	46,1	4,5	51,1
	160H Global	134 kW / 180 HP	4267	3,8	43,6	3,0	34,4
	143H Global*	variável	3658	3,8	44,0	3,0	34,7
	163H Global*	variável	4267	3,8	43,6	3,0	34,4
Case	845	104 kW / 140 HP	3658	3,6	42,9	3,6	28,5
	845 DHP	104 kW - 123 kW	3658	3,6	42,9	3,6	28,5
New Holland	RG 140B	104 kW / 140 HP	3658	3,6	42,9	3,6	28,5
	RG 170B	127 kW / 170 HP	3962	3,6	42,9	3,6	28,5
	RG 200G	149 kW / 200 HP	4267	3,8	43,0	3,8	30,6
Volvo *com tração em todas as rodas	G930	116 kW - 145 kW	3658	4,3	45,4	4,2	32,0
	G940	131 kW - 160 kW	3658	4,3	45,4	4,2	32,0
	G946*	145 kW - 175 kW	3658	4,3	45,4	4,2	32,0
	G960	145 kW - 175 kW	3658	4,3	45,4	4,2	32,0
	G970	157 kW - 186 kW	3658	4,1	43,8	4,1	30,1
	G976*	168 kW - 198 kW	3658	4,1	43,8	4,1	30,1
	G990	168 kW - 198 kW	4267	4,2	44,9	4,2	31,6

Tabela 4.1 - Características Técnicas das Motoniveladoras.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos da Caterpillar [72], Case [64], New Holland [90] e Volvo [98].

Na Tabela 4.2, se apresenta a recomendação feita pelos diferentes autores consultados, referente às variáveis de produção das motoniveladoras.

Autor	Variável	Recomendação	
Abram I. (2001)	E	0,50 a 0,70	
Baesso D. P. (2003)	e	Até 0,35 m	
	V	Regularização de superfícies	3 a 5 km/h
Day, D. A. (1989)	E	0,70 a 0,90	
Guimarães, N. (2001)	E	0,70 a 0,75	
	n	Devem ser as necessárias, pois o rendimento da motoniveladora está na razão direta do número de passadas efetuadas.	
	V	Conservação de estradas	5 a 16 km/h
		Espalhamento de materiais	5 a 10 km/h
		Mistura de materiais	8 a 25 km/h
Acabamento de superfícies		5 a 8 km/h	
Helio de Souza e Catalani (2002)	n	Segundo exemplos ilustrativos	4 a 10
Harris F. (1994)	V	Nivelamento de greide	4 a 9 km/h
		Espalhamento de materiais	4 a 10 km/h
		Recorte e nivelamento	9 a 40 km/h

Tabela 4.2 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção das motoniveladoras.

Fonte: adaptado de Abram, Baesso, Day, Guimarães, Harris, e Helio de Souza e Catalani.

Da análise da tabela anterior foi desenvolvida a Tabela 4.3 que apresenta uma faixa de valores aceitáveis para a estimativa de produção das motoniveladoras.

Variáveis de produção das motoniveladoras	Valores recomendados
l (m)	3,658 e 4,267
V (km/h)	5 a 25
e (m)	0,15 a 0,35
E	0,70
n	4 a 10

Tabela 4.3 – Variáveis de produção recomendados para as motoniveladoras.

Definidas as faixas de valores que fazem parte da produção das motoniveladoras foram elaborados os seguintes ábacos para a determinação da estimativa de produção bruta.

A eficiência (E) deverá ser multiplicada ao valor obtido dos ábacos de produção bruta com a finalidade de se obter o valor da produção líquida.

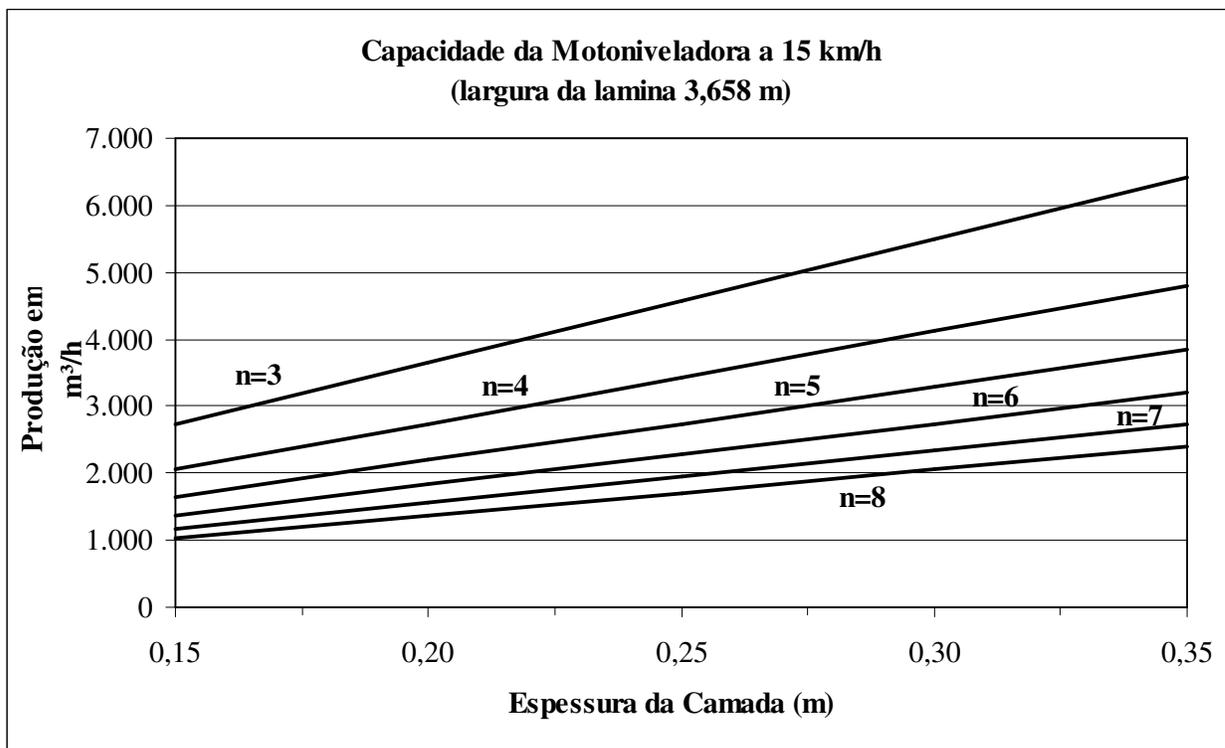


Figura 4.3 – Ábaco da capacidade de produção bruta de uma motoniveladora com velocidade média de 15 km/h e largura da lâmina de 3,658 metros.

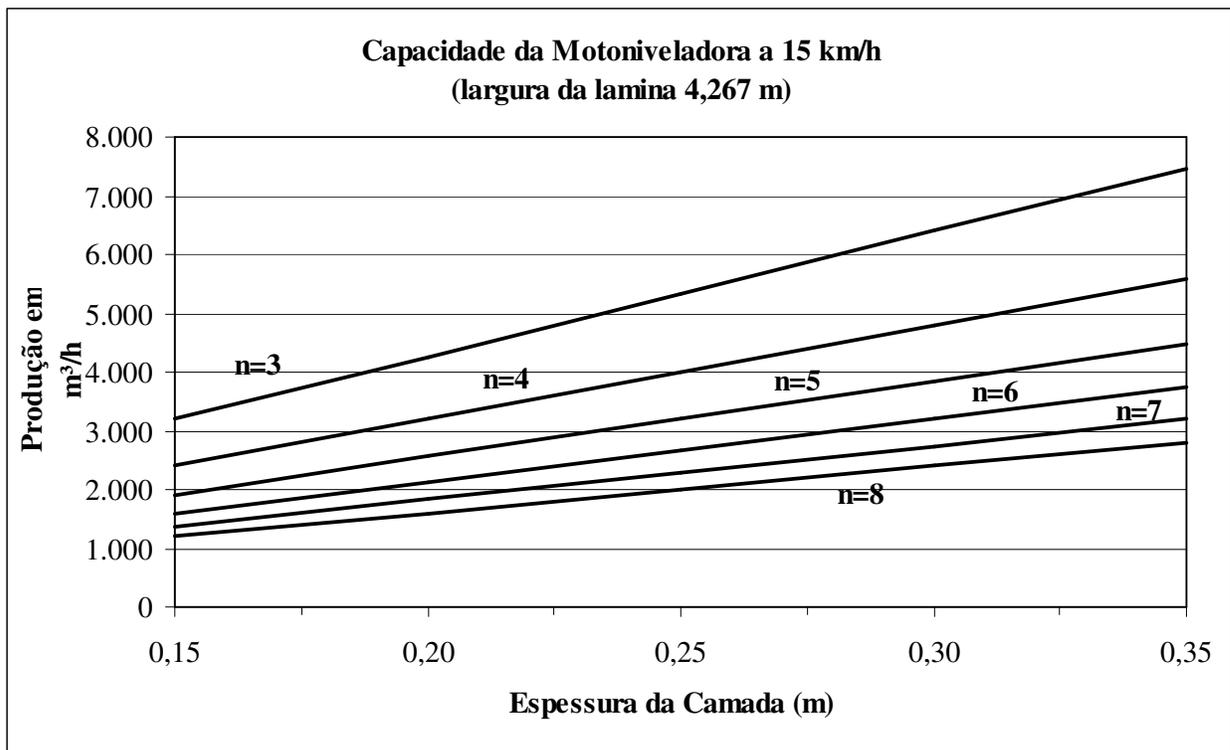


Figura 4.4 – Ábaco da capacidade de produção bruta de uma motoniveladora com velocidade média de 15 km/h e largura da lâmina de 4,267 metros.

4.3. Rolos compactadores

Segundo Helio de Souza e Catalani G. (2002), as equações 3.4 e 3.5, embora forneçam resultados aceitáveis para a produção das unidades compactadoras, são aproximadas, porque alguns de seus parâmetros são interdependentes, como mencionado previamente nas motoniveladoras, para as variáveis “e” e “n”. Isto é: aumentando-se ou diminuindo-se a espessura da camada “n”, haverá necessidade de maior ou menor número de passadas para se atingir a homogeneidade da massa específica adotada em toda a camada. Além disso, indicam que “v” e “n” são também interligadas, conforme se constata na operação de rolos vibratórios já que, aumentando-se a velocidade de rolamento, é necessário maior número de passadas para se alcançar a compactação desejada.

A variável “n” refere-se ao número de passadas de ida e a ré até atingir o grau de compactação desejado por camada.

Para a compactação das camadas de solos, o DER-SP (2000), especifica que a compactação será iniciada sempre pelas bordas, tomando-se o cuidado nas primeiras passadas de fazer com que os rolos compactadores se apoiem metade na camada em construção e metade no acostamento. Nos trechos em tangente, a compactação prosseguirá das duas bordas para o centro, em percursos equidistantes da linha da base (eixo). Os percursos ou passadas de cada rolo compactador serão distanciados entre si de tal forma que em cada percurso seja coberto a metade do rastro deixado no percurso anterior.

A Caterpillar (1995), na operação típica de compactação das camadas asfálticas indica que a máquina começará sobre a camada asfáltica recém-estendido sobre o material previamente compactado e à direita ou à esquerda de uma junta longitudinal. O operador deve acionar o sistema vibratório quando se alcança a velocidade de compactação. A operação tem de ser em linha reta e em velocidade constante e a uma distância predeterminada atrás da pavimentadora. Deverá se mudar o sentido de direção do compactador e o operador deverá executar a segunda passada na trilha da primeira. Quando se aproxima do ponto de partida, o operador terá que girar a máquina até um novo ponto de início que permite a superposição de 150 milímetros da camada, sem compactar sobre a recém-acabada. A terceira passada é feita igual à primeira, exceto que o ponto onde se muda o sentido está mais adiante que o ponto de parada da primeira passada. Como a pavimentadora avançou mais adiante, para manter um intervalo constante, cada ponto de retrocesso do compactador também será mais à frente que o anterior.

Esta seqüência continua até a total compactação que se está pavimentando. Ao se começar uma nova série de passadas, o compactador deverá girar através da camada recém-compactada e começar logo atrás do ponto oposto da primeira passada.

Na figura 4.5 a seguir, se ilustra a operação típica de compactação de camadas betuminosas, segundo o especificado pela Caterpillar (1995) e a AAPA (2007).

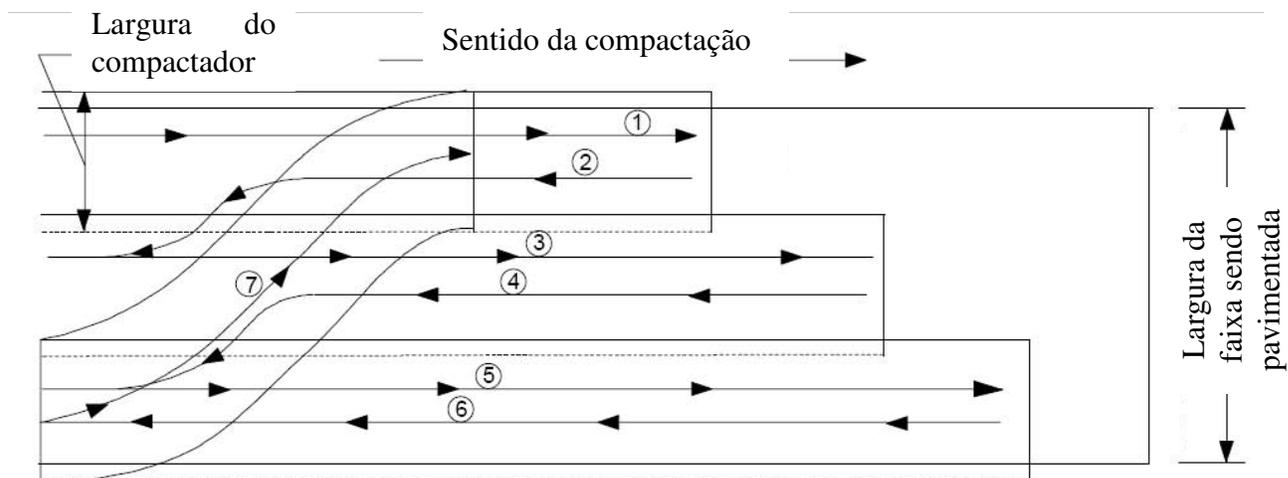


Figura 4.5 – Operação típica de compactação.

Fonte: adaptado da AAPA (2007)

Com os critérios e metodologias comumente empregadas na compactação de solos e materiais betuminosos descritos anteriormente, conclui-se que o valor “n” representa o número efetivo de passadas de ida e a ré para compactar uma camada.

Identificadas as variáveis de produção dos rolos que compõem as equações 3.4 e 3.5, se apresentam nas Tabelas 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, as principais características técnicas fornecidas pelos fabricantes, nos catálogos de rolos compactadores.

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Largura de compactação (mm)	Velocidade máxima de trabalho (km/h)
Caterpillar	CP-323C	52 kW / 70 HP	1270	8,90
	CP-433C	78 kW / 105 HP	1676	11,50
	CP-533D	108 kW / 145 HP	2134	12,00
	CP-563D	114 kW / 153 HP	2134	11,60
Hamm *Fabricado no Brasil	3205 P	45 kW / 65,2 HP	1370	9,20
	3307 P	65 kW / 87,1 HP	1680	7,20
	3410 P*	98 kW / 131,3 HP	2140	8,40
	3411 P*	98 kW / 131,3 HP	2140	8,40
	3412 P	98 kW / 131,3 HP	2140	6,80
	3414 P	98 kW / 131,3 HP	2140	6,80
	3516 P	147 kW / 197 HP	2140	7,60
	3518 P	147 kW / 197 HP	2220	5,90
Dynapac	3520 P	147 kW / 197 HP	2220	5,90
	CA 121PD	53 kW / 72 HP	1365	6,00
	CA 134PD	62 kW / 84 HP	1370	6,00
	CA 141 PD	53 kW / 72 HP	1524	7,00
	CA 144PD	62 kW / 84 HP	1676	6,00
	CA 150PD	60 kW / 80 HP	1676	5,00
	CA 152PD	74 kW / 99 HP	1676	6,50
	CA 182PD	74 kW / 99 HP	1676	6,50
	CA 250PD	82 kW / 110 HP	2130	5,00
	CA 260PD	112 kW / 150 HP	2130	9,00
	CA 302PD	93 Kw / 125 HP	2130	9,00
	CA 362PD	112 kW / 150 HP	2130	9,00
	CA 500PD	129 kW / 175 HP	2130	11,00
	CA 512PD	129 kW / 175 HP	2130	11,00
CA 600PD	129 kW / 175 HP	2130	11,00	
CA 702PD	164 kW / 220 HP	2130	8,00	
Muller	VAP 70	93 Kw / 125 HP	2150	8,50
	VAP 120	93 Kw / 125 HP	2150	8,50

Tabela 4.4 - Características técnicas dos rolos pé-de-carneiro.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos Caterpillar [65], [66], [71], Hamm [116], [117], [123], Dynapac [76], [77], [81], Muller [86], [87].

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Largura de compactação (mm)	Velocidade máx. de trabalho km/h)
Caterpillar	CS-323C	52 kW / 70 HP	1270	8,90
	CS-431C	78 kW / 105 HP	1676	11,50
	CS-433C	78 kW / 105 HP	1676	11,50
	CS-531D	108 kW / 145 HP	2134	12,00
	CS-533D	108 kW / 145 HP	2134	12,00
	CS-563D	114 kW / 153 HP	2134	11,40
	CS-583D	114 kW / 153 HP	2134	11,40
Hamm *Fabricado no Brasil	3205	45 kW / 65,2 HP	1370	9,20
	3307	65 kW / 87,1 HP	1680	6,70
	3410*	98 kW / 131,3 HP	2140	7,90
	3411*	98 kW / 131,3 HP	2140	7,90
	3412	98 kW / 131,3 HP	2140	6,40
	3414	98 kW / 131,3 HP	2140	6,40
	3516	147 kW / 197 HP	2140	7,30
	3518	147 kW / 197 HP	2220	6,70
	3520	147 kW / 197 HP	2220	6,70
	3625HT	174 kW / 233,2 HP	2220	12,50
Dynapac	CA 121D	53 kW / 72 HP	1365	6,00
	CA 141 D	53 kW / 72 HP	1524	7,00
	CA 144D	62 kW / 84 HP	1676	6,00
	CA 150D	60 kW / 80 HP	1676	5,00
	CA 152D	74 kW / 99 HP	1676	9,00
	CA 182D	74 kW / 99 HP	1676	9,00
	CA 250D	82 kW / 110 HP	2130	5,00
	CA 262D	112 kW / 150 HP	2130	9,00
	CA 300D	82 kW / 110 HP	2130	5,00
	CA 362D	112 kW / 150 HP	2130	9,00
	CA 402D	93 Kw / 125 HP	2130	9,00
	CA 500D	129 kW / 175 HP	2130	11,00
	CA 600D	129 kW / 175 HP	2130	11,00
	CA 702D	164 kW / 220 HP	2130	8,00
Muller	VAP 55	61 Kw / 83 cv	1680	12,00

Tabela 4.5 – Características técnicas de rolos lisos para solos.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos Caterpillar [65], [66], [71], Hamm [114], [115], [124], Dynapac [76], [77], [81], Muller [85].

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Largura de compactação (mm)	Velocidade máxima de trabalho (km/h)
Caterpillar	CB-214D	23,5 kW / 31,5 HP	1000	10,00
	CB-224D	23,5 kW / 31,5 HP	1200	10,00
	CB-334D	32 kW / 43 HP	1300	11,50
	CB-434C	52 kW / 70 HP	1422	11,60
	CB-534C	78 kW / 105 HP	1700	13,00
	CB-634C	108 kW / 145 HP	2130	12,20
Hamm	HD10	20,1 kW / 26,9 HP	1000	10,40
	HD12	20,1 kW / 26,9 HP	1200	10,40
	HD13	22,5 kW / 30,2 HP	1300	9,20
	HD70	60 kW / 80,4 HP	1500	6,30
	HD75	60 kW / 80,4 HP	1680	6,30
	HD90	80 kW / 117,9 HP	1680	7,40
	HD110	80 kW / 117,9 HP	1680	7,40
	HD120	98 kW / 131,3 HP	1980	6,20
	HD130	98 kW / 131,3 HP	2140	6,20
Dynapac	CC 800	17 kW / 23,5 HP	800	9,00
	CC 900	17 kW / 23,5 HP	900	9,00
	CC 1000	17 kW / 23,5 HP	1000	9,00
	CC 102	23 kW / 29 HP	1070	10,00
	CC 122	23 kW / 29 HP	1200	10,00
	CC 142	34 kW / 45 HP	1300	10,00
	CG 223HF	62 kW / 84 HP	1450	12,00
	CC 222HF	60 kW / 82 HP	1450	13,00
	CG 233HF	62 kW / 84 HP	1450	12,00
	CC 232HF	60 kW / 82 HP	1450	13,00
	CC 322	60 kW / 82 HP	1680	13,00
	CC 422	93 kW / 125 HP	1680	11,00
	CC 522	93 kW / 125 HP	1950	12,00
	CC 622HF	93 kW / 125 HP	2130	11,00
CC 722	170 kW / 280 HP	2130	11,00	
Muller	VT 10	14 cv	930	9,60

Tabela 4.6 – Características técnicas dos rolos lisos para asfalto.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos Caterpillar [71], Hamm [118], [119], [120], [121], [122], [125], Dynapac [82], Muller [88].

Fabricante	Modelo	Número de Pneus	Potência bruta	Largura de compactação (mm)	Velocidade máxima de trabalho (km/h)
Caterpillar	PS-150B	11 Pneus	52 kW / 70 HP	1727	26,50
	PS-200B	9 Pneus	78 kW /105 HP	1727	19,30
	PS-300B	7 Pneus	78 kW /105 HP	1900	19,00
	PF-300B	7 Pneus	78 kW /105 HP	1900	19,00
	PS-360B	7 Pneus	78 kW /105 HP	2275	18,00
Hamm	GRW 10	7 Pneus	80 kW /117,9 HP	1986	11,50
	GRW 15	7 Pneus	80 kW /117,9 HP	1986	11,50
	GRW 18	7 Pneus	80 kW /117,9 HP	1986	11,50
Dynapac	CP 221	9 Pneus	74 kW /99 HP	1820	18,00
	CP 142	7 Pneus	74 kW /99 HP	1760	19,00
	CP 271	7 Pneus	74 kW /99 HP	2350	18,00
Muller	AP 26	9 Pneus	83 kW / 111 HP	1900	25,50
	AP 30	7 Pneus	83 kW / 111 HP	2400	25,50

Tabela 4.7 – Características técnicas dos rolos pneumáticos

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos Caterpillar [71], Hamm [126], Dynapac [78], [79], [80], Muller [89].

Da análise das tabelas, percebeu-se que os fabricantes fornecem duas variáveis de produção ligadas diretamente ao equipamento, que são a largura de compactação e a velocidade máxima de trabalho.

As larguras de compactação se apresentam em tamanhos que variam dos 0,80 metros, nos rolos tandem lisos, até os 2,40 metros, nos rolos pneumáticos.

Para as velocidades, os catálogos apresentam as máximas velocidades de trabalho segundo capacidade de cada equipamento. As velocidades máximas variam entre 6,00 km/h e 13,00 km/h, para os rolos lisos tanto os utilizados em solo como em asfalto, e 11,50 km/h a 26,50 km/h, para os rolos pneumáticos. Esta informação é muito abrangente, já que os trabalhos de compactação de solos e camadas asfálticas feitos pelos rolos compactadores são realizados com velocidades bem menores.

Tipo de equipamento	Autor	Variável	Recomendação
Compactador vibratório de solo com tambor protegido (pé-de-carneiro)	Abram I. (2001)	V	4 a 6,4 km/h
		e	0,15 a 0,30 m
		n	3 a 5
	Baesso D. P. (2003)	e	0,20 a 0,30 m
	Caterpillar (1998)	V	4 a 6,5 km/h
		e	0,15 a 0,30 m
		n	3 a 5
	Dynapac (1981)	V	3 a 6 km/h
		e	0,15 a 0,35 m
		n	4 a 6
		E	0,60 a 0,80
	H. de Souza e C. (2002)	E	0,75
	Guimarães N. (2001)	V	4,5 km/h
		e	0,10 m
		n	6
Jeuffroy G. (1973)	E	0,70	
Compactador vibratório de solo com tambor liso	Abram I. (2001)	V	4 a 6,4 km/h
		e	0,15 a 0,30 m
		n	3 a 5
	Baesso D. P. (2003)	e	0,20 a 0,30 m
	Caterpillar (1998)	V	4 a 6,5 km/h
		e	0,15 a 0,30 m
		n	3 a 5
	Dynapac (1981)	V	3 a 6 km/h
		e	0,15 a 0,35 m
		n	4 a 6
		E	0,60 a 0,80
	Guimarães N. (2001)	V	4,5 km/h
		e	0,20 m
		n	6
	H. de Souza e C. (2002)	E	0,75
Jeuffroy G. (1973)	E	0,70	

Tabela 4.8 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção dos compactadores vibratórios de solos.

Fonte: adaptado de Abram, Baesso, Caterpillar, Dynapac, Helio de Souza e Catalani, Guimarães e Jeuffroy.

Tipo de equipamento	Autor	Variável	Recomendação
Compactador vibratório de asfalto com tambor duplo	AAPA (2001)	V	Camada de ligação ou <i>binder</i> de 3 a 6 km/h
			Camadas delgadas maior a 10 km/h
		E	0,70 a 075
	Caterpillar (1998)	V	5 km/h
		e	3,8 a 10 centímetros (1,5" a 4")
		n	2 a 4
		E	0,83 (hora de 50 minutos)
	Fernández J.A. (2006)	V	A velocidade está ligada à frequência de impactos. A distância entre impactos consecutivos deve ser no máximo 3 centímetros, o que corresponde a uns 5 km/h, com uma frequência de vibração de 45 a 50 Hz.
		E	0,60 (hora de 50 minutos + perdas por traspases + mudanças de faixa)
	Guimarães N. (2001)	V	5 km/h
		e	0,05 m
		n	4 a 6
	Instituto de Asfalto (1989)	V	4 a 5 km/h
	NAPA (1996)	V	V (pés/min)= Frequência ou Vibração por minuto/(10 a 12 impactos/pé)
	TRB (2000)	V	Acomodamento ou Rolagem Inicial: 3,2 a 4,8 km/h
			Rolagem Intermediária: 4,0 a 5,6 km/h
Rolagem Final: não empregado			
Vivar R. G. (1991)	V	4 a 5 km/h	

Tabela 4.9 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção dos compactadores vibratórios de asfalto.

Fonte: adaptado da AAPA, Caterpillar, Fernández, Guimarães, Instituto de Asfalto, NAPA, TRB e Vivar.

Tipo de equipamento	Autor	Variável	Recomendação
Compactador estático de asfalto com tambor duplo	Guimarães N. (2001)	V	4 km/h
		e	0,10 m
		n	2 a 4
	I. de Asfalto (1989)	V	3 a 5 km/h
	NAPA (1996)	V	3,2 a 5,6 km/h
	TRB (2000)	V	Acomodamento ou Rolagem Inicial: 3,2 a 5,6 km/h
			Rolagem Intermediária: 4,0 a 6,5 km/h
Rolagem Final: 4,8 a 8,0 km/h			
Compactador de solo com rodas pneumáticas	Abram I. (2001)	V	4,8 a 5,3 km/h
		e	0,10 a 0,25 m
		n	3 a 5
	Caterpillar (1995)	V	6,4 km/h
		e	0,30 m
		n	6 a 9
	Guimarães N. (2001)	V	8 km/h
		e	0,20 m
		n	10
Compactador de asfalto com rodas pneumáticas	Caterpillar (1998)	V	1,6 a 12,9 km/h
		e	2,54 centímetros a 20,3 centímetros (1" a 8")
		E	0,83 (hora de 50 minutos)
	Guimarães N. (2001)	V	8 km/h
		e	0,05 m
		n	12
	I. de Asfalto (1989)	V	3 a 8 km/h
	NAPA (1996)	V	3,2 a 5,6 km/h
	TRB (2000)	V	Acomodamento ou Rolagem Inicial: 3,2 a 5,6 km/h
			Rolagem Intermediária: 4,0 a 6,5 km/h
			Rolagem Final: 6,4 a 11,2 km/h

Tabela 4.10 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção dos compactadores estáticos lisos e pneumáticos.

Fonte: adaptado de Abram, Caterpillar, Guimarães, Instituto de Asfalto, NAPA e TRB.

Com o inconveniente descrito no parágrafo anterior, além de se precisar de uma bibliografia que recomende uma faixa de valores das outras variáveis envolvidas na produção dos rolos compactadores foi feita uma pesquisa nos livros e manuais técnicos disponíveis no mercado brasileiro, obtendo-se como resultado as Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10.

Na Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10, se apresentam as recomendações feitas pelos diferentes autores consultados, referente às variáveis de produção dos rolos compactadores.

Da análise das tabelas anteriores foi desenvolvida a Tabela 4.11 que apresenta uma faixa de valores aceitáveis para a estimativa de produção dos rolos compactadores.

Tipo de Rolo Compactador	Variáveis de produção dos rolos compactadores				
	l (m)	e (m)	V (km/h)	E	n
Vibratórios para solos	1,35 / 1,65 / 2,10	0,15 a 0,35	4 a 6	0,70	3 a 6
Vibratórios para asfalto	1,00 / 1,20 / 1,30 / 1,40 / 1,65 / 1,95 / 2,10	0,038 a 0,10 (1,5" a 4")	3 a 6	0,70	2 a 6
Estáticos para asfalto	1,00 / 1,20 / 1,30 / 1,40 / 1,65 / 1,95 / 2,10	0,10	3 a 5	0,70	2 a 4
Pneumáticos para Solos	1,70 / 1,90 / 2,30	0,10 a 0,30	5 a 8	0,70	3 a 10
Pneumáticos para asfalto	1,70 / 1,90 / 2,30	0,025 a 0,20 (1" a 8")	3 a 8	0,70	Até 12

Tabela 4.11 – Variáveis de produção recomendados para os rolos compactadores.

Definidas as faixas de valores que fazem parte de produção dos rolos compactadores, foram elaborados os seguintes ábacos para a determinação da estimativa de produção.

A eficiência (E) deverá ser multiplicada ao valor obtido dos ábacos de produção bruta com a finalidade de obter o valor da produção líquida.

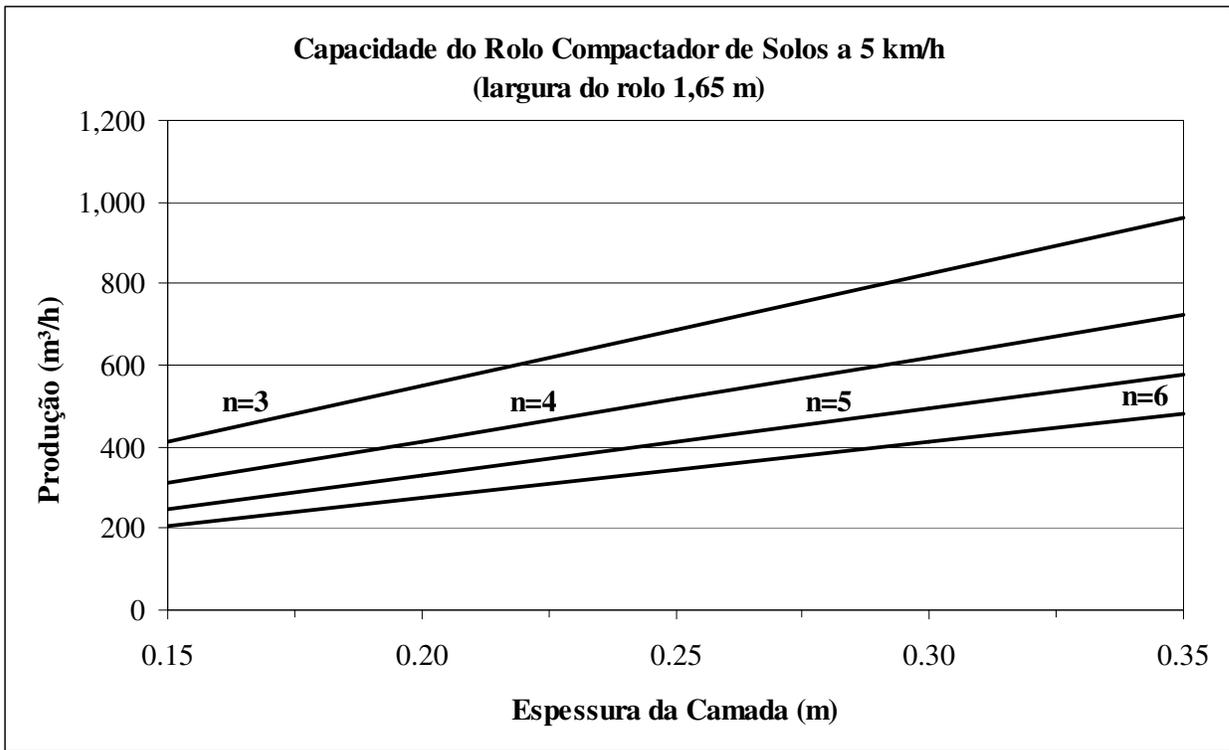


Figura 4.6 – Ábaco da capacidade de produção bruta de um rolo compactador de solos com velocidade média de 5 km/h e largura de compactação de 1,65 metro.

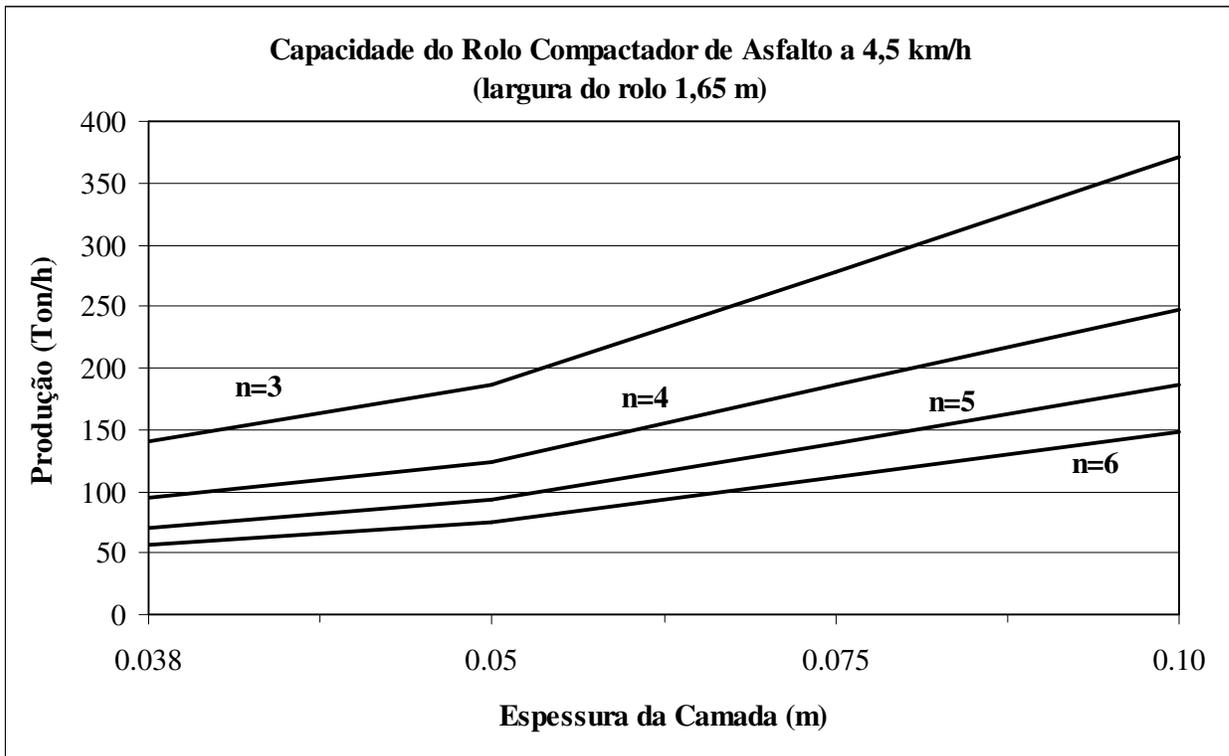


Figura 4.7 – Ábaco da capacidade de produção bruta de um rolo compactador de asfalto com velocidade média de 4,5 km/h e largura de compactação de 1,65 metro.

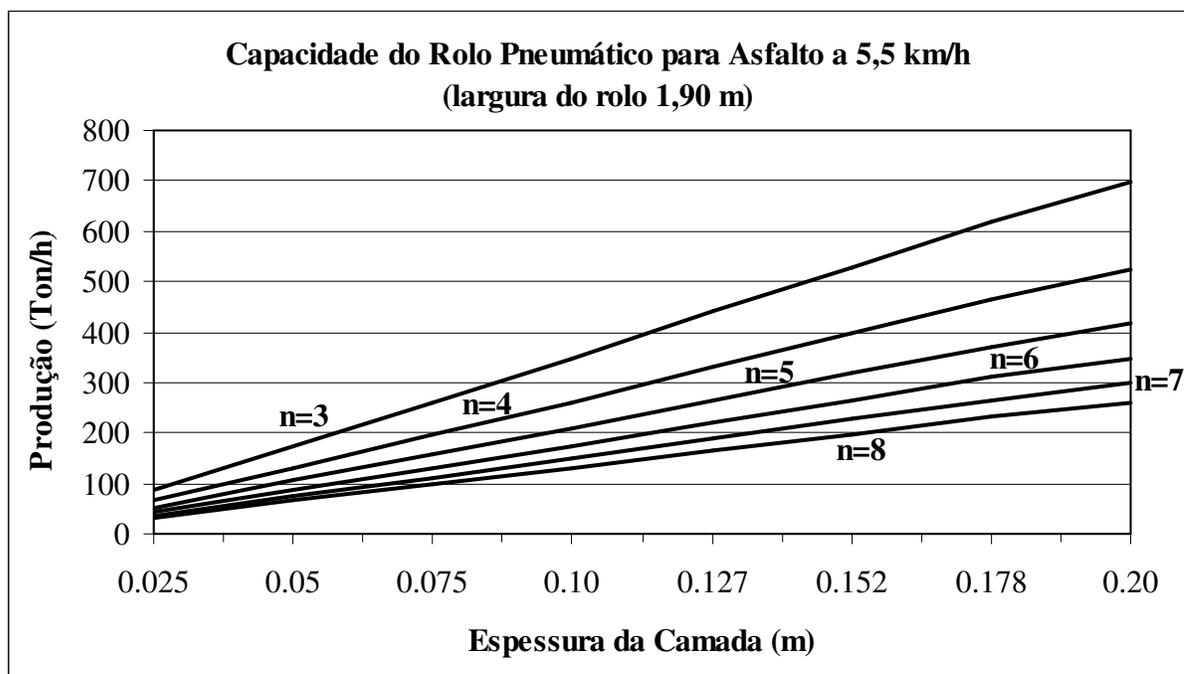


Figura 4.8 – Ábaco da capacidade de produção bruta de um rolo pneumático de asfalto com velocidade média de 5,5 km/h e largura de compactação de 1,90 metro.

4.4. Distribuidor de asfalto

Analizadas as equações 3.6, 3.7 e 3.8, foi observado que as variáveis que estão diretamente ligadas ao equipamento são a largura da barra espargidora e a taxa de aplicação do ligante asfáltico. O valor da taxa de aplicação vai depender do tipo e característica de cada projeto.

Na Tabela 4.12 são apresentadas as principais características técnicas dos espargidores de asfalto fabricados no Brasil.

Fabricante	Modelo	Comprimento barra espargidora (m)	Número de bicos	Capacidade do tanque (litros)
Romanelli	EHR 100	Caneta manual	-	5000 a 8000
	EHR 400	3,60	36	5000 a 10000
	EHR 501	3,60	36	5000 a 10000
	EHR 600	3,60	36	5000 a 10000
	EHR 700	3,60	36	5000 a 10000
	EHR 800	4,00	40	5000 a 10000

Tabela 4.12 – Características técnicas do distribuidor de asfalto.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos Romanelli [92].

As larguras das barras espargidoras são fabricadas em comprimentos de 3,60 metro e 4,00 metros, mas podem trabalhar com comprimentos menores, já que apresentam dispositivos para diminuir sua extensão.

Para o presente item, não se apresentam ábacos de produção devido ao fato que a determinação da produção dos distribuidores de asfalto está ligada principalmente a variáveis diretamente relacionadas com a natureza do projeto, sendo que a única variável diretamente relacionada com o equipamento é o comprimento da barra espargidora.

4.5. Pavimentadora de asfalto

Como indicado no capítulo 3, a velocidade da pavimentadora e a taxa de produção da usina, as quais estão diretamente ligadas, são as variáveis mais importantes para o correto cálculo de produção de uma pavimentadora. Incrementando-se a velocidade de pavimentação de acordo com a faixa recomendada na Tabela 3.25, poderá se incrementar a produção das pavimentadoras com a devida segurança. As outras variáveis como largura do espalhamento e espessura da camada dependem do acondicionamento do equipamento.

Depois de identificadas as variáveis que conformam a equação 3.9, se apresentam nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15, as principais características técnicas fornecidas pelos fabricantes, nos catálogos de pavimentadoras de asfalto, inclusive a produção teórica sugerida.

Da análise feita das Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15, pode-se perceber que os fabricantes fornecem as duas variáveis de produção ligadas diretamente com o equipamento: a faixa de larguras e velocidades de operação.

A largura de pavimentação, pelos catálogos consultados, se apresenta entre 1,70 metro até 9,00 metros, para as pavimentadoras sobre pneus, e entre 1,70 metro e 16,00 metros, para as pavimentadoras sobre esteiras.

Para as velocidades, os catálogos apresentam seus valores máximos, segundo a capacidade de cada equipamento. As máximas velocidades variam entre 18 m/min. e 114 m/min., para as pavimentadoras sobre pneus, e entre 16 m/min. a 67 m/min., para as pavimentadoras sobre esteiras. Esta informação é muito abrangente, já que os trabalhos de pavimentação são realizados com velocidades bem menores do que 114 m/min.

Com o inconveniente descrito no parágrafo anterior, além de se precisar de uma bibliografia que recomende uma faixa de valores das outras variáveis envolvidas na produção das pavimentadoras, foi feita uma pesquisa nos livros e manuais técnicos disponíveis no mercado brasileiro, obtendo-se como resultado a Tabela 4.16.

Na Tabela 4.16, se apresenta a recomendação feita pelos diferentes autores consultados, referente às variáveis de produção das pavimentadoras.

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Larg. padrão de pavimentação (m)	Larg. máx.de pavimentação (m)	Vel. máxima de pavimentação (m/min)	Produção teórica (ton./h)
Caterpillar	AP-800D	97 kW / 130 HP	2,44	6,10	76,00	-
	BG-230	80 kW / 107 HP	2,44	6,10	76,00	-
	BG-240C	114 kW / 153 HP	3,05	7,40	122,00	-
	BG-260C	118 kW / 158 HP	3,05	7,40	114,00	-
	AP-1000B	118 kW / 158 HP	3,05	9,14	114,00	-
Terex	VD 421	54 kW / 73 cv	2,50	4,55	48,00	400,00
	VD 621	117 HP	2,60	6,00	54,00	450,00
	VD 721	113 kW / 154 HP	2,60	6,00	54,00	600,00
Dynapac	F6W	50 kW / 68 HP	1,70	4,10	32,00	250,00
	F8W	66 kW / 90 HP	2,00	5,00	35,00	350,00
	F9W	78 kW / 106 HP	2,00	5,25	35,00	400,00
	F121W	116 kW / 158 HP	2,50	6,50	32,00	600,00
	F161W	116 kW / 158 HP	2,50	7,00	26,50	650,00
Ciber	SA 230	31 Kw / 45 cv	2,00	3,84	30,00	100,00
	SA 115CR	78 kW / 105 cv	2,55	4,75	40,00	400,00
	AF 4500	105 cv	1,70	4,20	30,00	300,00
	AF 5500	105 cv	1,90	5,30	30,00	450,00
Vogele	SUPER 1203	57 kW / 78PS	1,70	4,00	25,00	150,00
	SPER 1603-2	84 kW / 114 PS	2,55	7,00	18,00	400,00
	SUPER 1803-2	121 kW / 165 PS	2,55	8,00	18,00	600,00

Tabela 4.13 - Características técnicas das pavimentadoras de rodas.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos Caterpillar [71], [73], Terex [95], [96], [97], Dynapac [83], Ciber [99], [100], [109], [110], [113], Vogele [129].

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Larg. padrão de pavimentação (m)	Larg. máx.de pavimentação (m)	Vel. máxima de pavimentação (m/min)	Produção teórica (ton./h)
Caterpillar (*Movil-Track Pavers)	BG-225C	90 kW / 121 HP	2,44	6,10	67,00	-
	AP-650B	97 kW / 130 HP	2,44	6,10	67,00	-
	BG-245C	130 kW / 174 HP	3,05	7,40	60,10	-
	AP-1050B	130 kW / 174 HP	3,05	9,14	65,60	-
	AP-1055B*	130 kW / 174 HP	3,05	9,14	65,60	-
	BG-2455C*	130 kW / 174 HP	3,05	7,40	60,10	-
Terex	VD 400	54 kW / 73 cv	2,50	4,55	30,00	400,00
	VD 600	117 HP	2,60	6,00	33,00	450,00
	VD 700	113 kW / 154 HP	2,60	6,00	33,00	600,00
Dynapac	F4C	33 kW / 45 HP	1,20	3,10	20,00	200,00
	F5C	33 kW / 45 HP	1,20	3,10	20,00	200,00
	F5CS	39 kW / 53 HP	1,20	4,40	16,00	300,00
	F6C	50 kW / 68 HP	1,70	4,60	32,00	300,00
	F8C	74 kW / 100 HP	2,00	7,50	22,40	400,00
	F121C	116 kW / 158 HP	2,50	9,00	20,00	600,00
	F141C	129 kW / 173 HP	2,50	9,00	20,00	750,00
	F150C	131 kW / 178 HP	2,50	9,00	20,00	750,00
	F181C	153 kW / 205 HP	2,50	9,00	20,00	800,00
	F182CS	172 kW / 230 HP	2,50	13,50	23,00	900,00
	F300CS	259 kW	3,00	16,00	20,00	1500,00

Tabela 4.14 – Características técnicas das pavimentadoras de esteiras.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos Caterpillar [71], [74], [75], Terex [95], [96], [97], Dynapac [84].

Fabricante	Modelo	Potência bruta	Largura padrão de pavimentação (m)	Largura máxima de pavimentação (m)	Velocidade máxima de pavimentação (m/min)	Produção teórica (ton./h)
Ciber	SA 114CR	78 kW / 105 cv	2,55	4,75	23,00	400,00
	AF 4000	105 cv	1,70	4,20	27,00	300,00
	AF 5000	105 cv	1,90	5,30	30,00	450,00
	AF 6000	155 cv	2,55	6,00	30,00	600,00
Vogele	SUPER 1600-2	84 kW / 114 PS	2,55	8,00	24,00	600,00
	SUPER 1800-2	121 kW / 165 PS	2,55	10,00	24,00	700,00
	SUPER 1800SF	133 kW / 181 PS	2,55	6,50	18,00	400,00
	SUPER 1900-2	129 kW / 175 PS	2,55	11,00	25,00	900,00
	SUPER 2100-2	160 kW / 218 PS	2,55	13,00	25,00	1100,00
	SUPER 2500	209 kW / 284 PS	3,00	16,00	18,00	1500,00

Tabela 4.15 – Características técnicas das pavimentadoras de esteiras (continuação).

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos Ciber [99], [100], [108], [110], [112], [113], Vogele [127], [128], [130].

Autor	Variável	Recomendação
AAPA (2001)	V	3 a 15 m/min.
	e	25 a 100 milímetros
Abram I. (2001)	E	0,60 a 0,80
Caterpillar (1995)	V	A velocidade é determinada pelo volume de material fornecido à máquina. A velocidade ótima em uma operação de pavimentação é a que proporciona deslocamento da máquina a velocidade constante.
Dynapac (1989)	V	Com <i>screed</i> não vibratório: 4 a 10 m/min.
		Com <i>screed</i> vibratório: > 20 m/min.
Instituto de Asfalto (1989)	V	3 a 20 m/min.
	e	25 até 250 milímetros
NAPA (1996)	E	0,75 a 0,85

Tabela 4.16 – Recomendações para o emprego de variáveis de produção das pavimentadoras de asfalto.

Fonte: adaptado de Abram, Caterpillar, Dynapac, Instituto de Asfalto e NAPA.

Da análise das tabelas anteriores, foi desenvolvida a Tabela 4.17, que apresenta uma faixa de valores aceitáveis para a estimativa de produção das pavimentadoras.

Variáveis de produção das pavimentadoras de asfalto	Valores recomendados
l (m)	Pavimentadoras de pneus: 1,70 até 9,00
	Pavimentadoras de Esteiras: 1,20 até 16,00
V (m/min)	3 a 10
e (m)	0,025 a 0,10 (1" a 4")
E	0,75

Tabela 4.17 – Variáveis de produção recomendados para as pavimentadoras de asfalto.

Definidas as faixas de valores que fazem parte de produção das pavimentadoras de asfalto, foram elaborados os seguintes ábacos para a determinação da estimativa de produção.

A eficiência (E) deverá ser multiplicada ao valor obtido dos ábacos de produção bruta com a finalidade de se obter o valor da produção líquida.

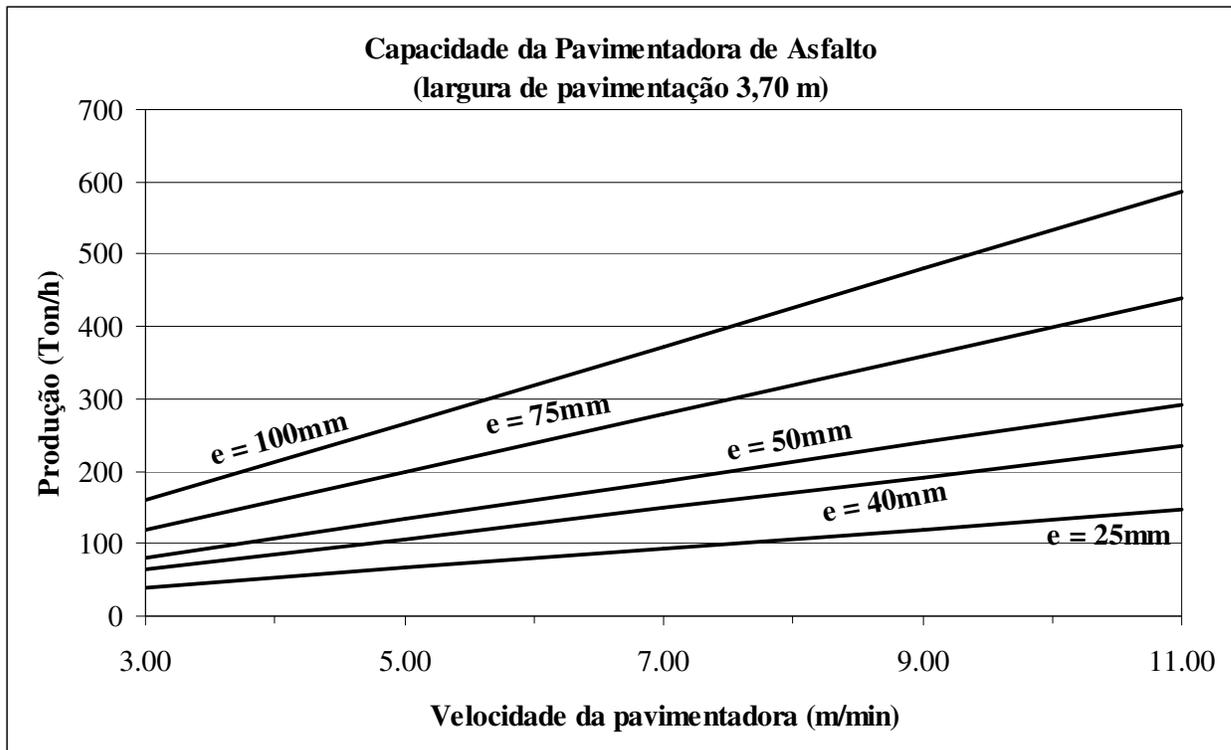


Figura 4.9 – Ábaco da capacidade de produção bruta de uma pavimentadora de asfalto para uma densidade de compactação de 2,4 ton./m³ e largura de pavimentação de 3,70 metros.

No gráfico acima da figura 4.9, ilustram-se as velocidades de pavimentação para várias espessuras de asfalto, largura de espargimento e densidade típica de compactação.

4.6. Usina de asfalto

Para a previsão da taxa de produção das usinas de asfalto, as principais variáveis envolvidas são o diâmetro do secador, a capacidade do queimador e a capacidade do exaustor.

As outras variáveis envolvidas, caso seja necessário calcular a produção de alguma usina com diferentes variáveis às indicadas pela NAPA (1998), são: a umidade do agregado, a temperatura da mistura, a altitude da usina, a velocidade do gás no secador, o excesso de ar no secador, o tipo de secagem dos agregados (contrafluxo ou fluxo paralelo), entre outras variáveis.

Logo depois de identificadas as equações 3.12, 3.13 e 3.14, se apresentam nas Tabelas 4.18, 4.19 e 4.20, as principais características técnicas fornecidas pelos fabricantes, nos catálogos de usinas de asfalto.

Da análise feita das tabelas 4.18, 4.19 e 4.20 reproduzidas, pode-se perceber que os fabricantes fornecem duas variáveis de produção ligadas diretamente com as usinas de asfalto: o diâmetro do secador e a capacidade do queimador.

O diâmetro dos secadores, pelos catálogos consultados, se apresenta entre 1,20 metro até 2,20 metros, seja a usina descontínua ou contínua.

As capacidades do queimador variam entre 6.000.000 kcal e 17.540.000 kcal.

Fabricante	Modelo	Faixa de produção (ton./h)	Silos dosadores	Cap. individual dos silos dosadores (m ³)	Cap. queimador (kcal/h)	Diâm. x comp. secador (mm)	Cap. ventilador (Nm ³ /h)	Cap. exaustor (Nm ³ /h)
Ciber	UAB 18E	100 - 140	-	5,60 (std)	10.000.000	2100 x 7500	6600	6600
Terex	H50C	150 - 240	3 a 6	6 a 8	17.640.000	2200 x 10000	-	-

Tabela 4.18 - Características técnicas da usina de asfalto gravimétrica ou descontínua.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos da Ciber [99], [100], [101], [107] e Terex [94].

Fabricante	Modelo	Faixa de produção (ton/h)	Silos dosadores	Capacidade individual dos silos dosadores (m ³)	Cap. queimador (kcal/h)	Diâm. x comp. secador (mm)
Ciber	UACF 12P	25 - 50	3	5,6 (std), 7 (exten.)	6.000.000	1200 x 5000
	UACF 15P	40 - 80	3 a 5	7,2 (std), 10 (exten.)	8.000.000	1650 x 6800
	UACF 17P	80 - 120	3 a 5	7,2 (std), 10 (exten.)	10.000.000	1900 x 5800
	UACF 19P	100 - 150	4 a 6	7,2 (std), 10 (exten.)	10.000.000	1900 x 7500
Terex	MAGNUM 80	60 - 80	3	5,50	10.000.000	1500 x 6000
	MAGNUM 140	100 - 140	4	5,50	10.000.000	1800 x 6600

Tabela 4.19 - Características técnicas da usina de asfalto contínua contra - fluxo.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos da Ciber [99], [100], [102], [103], [104], [106] e Terex [93].

Fabricante	Modelo	Faixa de produção (ton./h)	Cap. queimador (kcal/h)	Diâm. x comp. secador (mm)	Cap. individual dos silos dosadores (m³)
Ciber	UADM 12P/E ME	25 - 50	6.000.000	-	-
	UADM 14E	80	8.000.000	1400 x 6500	4,5 (std), 8,4 (exten.)
	UADM 14P	80	8.000.000	1400 x 6500	4,5 (std), 8,4 (exten.)
	UADM 16E	100	15.000.000	1650 x 7500	4,5 (std), 8,4 (exten.)
	UADM 16P	100	15.000.000	1650 x 7500	4,5 (std), 8,4 (exten.)
	UADM 19E	150	15.000.000	2100 x 7500	4,5 (std), 8,4 (exten.)
	UADM 19P	150	15.000.000	2100 x 7500	4,5 (std), 8,4 (exten.)

Tabela 4.20 - Características técnicas da usina de asfalto contínua *Drum Mixer*.

Fonte: adaptado de Catálogos Técnicos da Ciber [99], [100], [105].

No Brasil, as misturas asfálticas são trabalhadas em sua maioria com 3% na média de umidade dos agregados, os diâmetros comerciais dos secadores variam entre 1,20 metro e 2,10 metros e o restante das condições padrão das usinas são semelhantes às utilizadas pela NAPA. Com base nestas características foram desenvolvidas as Tabelas 4.21 e 4.22 a seguir, que ilustram a previsão da taxa de produção das usinas de asfalto com os parâmetros brasileiros.

Diâmetro de secador contrafluxo	Taxa de produção esperada (ton./h) com velocidade do gás no secador de:					
	244 m/min.		274 m/min.		305 m/min.	
	25% excesso de ar	50% excesso de ar	25% excesso de ar	50% excesso de ar	25% excesso de ar	50% excesso de ar
	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.
1,20 m	89	79	100	89	111	99
1,50 m	139	123	156	139	174	154
1,80 m	201	178	225	200	251	222
2,10 m	273	242	307	272	341	303
<p>Condições de operação padrão para a instalação: 149°C de temperatura de descarga do material 3% de umidade (remoção do agregado) 163 metros acima do nível do mar 135°C de descarga de gás no secador de contrafluxo 155°C de descarga de gás no secador de fluxo paralelo</p> <p>Fator de correção para taxas de produção: Para corrigir as diferenças de umidade: subtrai 13% para cada 1% de incremento de umidade, e incorpora 13% para cada 1% de diminuição de umidade. Para corrigir as diferenças de elevação do secador: subtrai 10% para cada 1000 metros de incremento de elevação, e incorpora 1,65% para condições sobre o nível do mar. Para corrigir as diferenças na temperatura do agregado: subtrai 2,5% para cada 10°C de incremento de temperatura, e incorpora 2,5% para cada 10°C de diminuição de temperatura.</p>						

Tabela 4.21 – Taxa de produção esperada para secador contrafluxo com 3% de umidade do agregado e diâmetros comerciais do secador.

Diâmetro de Secador Fluxo Paralelo	Taxa de produção esperada (ton./h) com velocidade do gás no secador de:					
	305 m/min.		335 m/min.		366 m/min.	
	25% excesso de ar	50% excesso de ar	25% excesso de ar	50% excesso de ar	25% excesso de ar	50% excesso de ar
	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.	3,90 (m ³ /min.) por ton.	4,40 (m ³ /min.) por ton.
1,20 m	111	99	122	108	134	119
1,50 m	174	154	191	170	209	185
1,80 m	251	222	275	244	301	267
2,10 m	341	303	375	332	410	363

Condições de operação padrão para a instalação:
149°C de temperatura de descarga do material
3% de umidade (remoção do agregado)
163 metros acima do nível do mar
135°C de descarga de gás no secador de contrafluxo
155°C de descarga de gás no secador de fluxo paralelo

Fator de correção para taxas de produção:
Para corrigir as diferenças de umidade: subtrai 13% para cada 1% de incremento de umidade, e incorpora 13% para cada 1% de diminuição de umidade.
Para corrigir as diferenças de elevação do secador: subtrai 10% para cada 1000 metros de incremento de elevação, e incorpora 1,65% para condições sobre o nível do mar.
Para corrigir as diferenças na temperatura do agregado: subtrai 2,5% para cada 10°C de incremento de temperatura, e incorpora 2,5% para cada 10°C de diminuição de temperatura.

Tabela 4.22 – Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo com 3% de umidade do agregado e diâmetros comerciais do secador.

Com o objetivo de se ter ábacos que possam auxiliar de forma rápida a determinação da estimativa da produção das usinas de asfalto, a seguir se apresentam a relação teórica entre a média do teor de umidade do agregado, diâmetro do secador e a previsão da taxa de produção de usinas com secador contrafluxo e fluxo paralelo, para uma velocidade de gás dada no secador e um conjunto de condições operacionais.

Diâmetro do secador	Taxa de produção esperada para secador contrafluxo (ton./h)					
	Umidade do agregado					
	2%	3%	4%	5%	6%	7%
1,20 m	98	89	80	70	61	52
1,50 m	153	139	124	110	96	81
1,80 m	220	200	179	158	138	117
2,10 m	300	272	244	216	188	160
2,40 m	392	355	318	282	245	208
2,70 m	496	449	403	357	310	264
3,00 m	612	555	497	440	383	326

Condições de operação padrão para a instalação:
149°C de temperatura de descarga do material
274 m/min. de velocidade do gás no secador
50% excesso de ar
163 metros acima do nível do mar
135°C de descarga de gás no secador de contrafluxo

Tabela 4.23 – Taxa de produção esperada para secador contrafluxo (ton./h) para diferentes umidades do agregado.

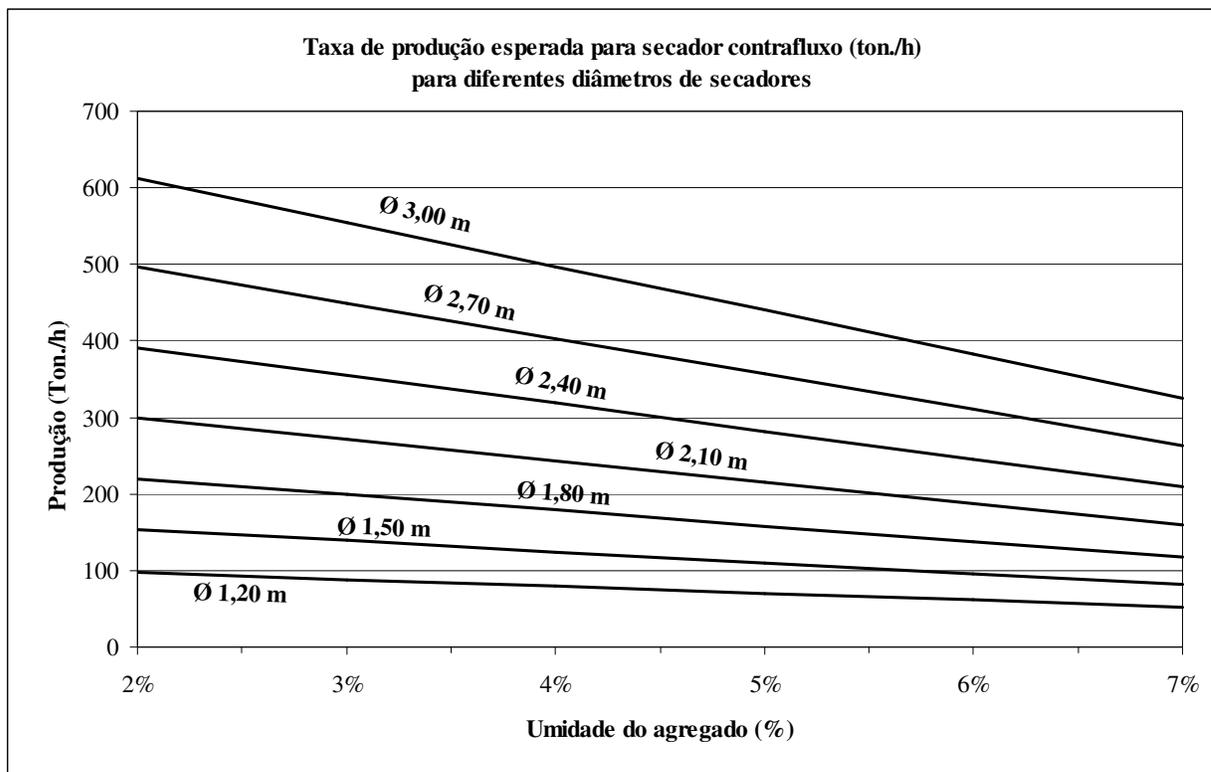


Figura 4.10 – Ábaco da capacidade de produção de uma usina de asfalto com diferentes diâmetros de secador contrafluxo (ton./h) para diferentes umidades do agregado.

Temperatura de descarga do material °C (°F)	Taxa de produção esperada para secador contrafluxo (ton./h)					
	Umidade do agregado					
	2%	3%	4%	5%	6%	7%
149 (300)	220	200	179	158	138	117
135 (275)	228	207	185	164	143	121
121 (250)	236	214	192	170	148	125
107 (225)	243	221	198	175	152	130

Condições de operação padrão para a instalação:

1,80 m de diâmetro do secador

274 m/min. de velocidade do gás no secador

50% excesso de ar

163 metros acima do nível do mar

135°C de descarga de gás no secador de contrafluxo

Tabela 4.24 – Taxa de produção esperada para secador contrafluxo (ton./h) para diferentes temperaturas de descarga do material.

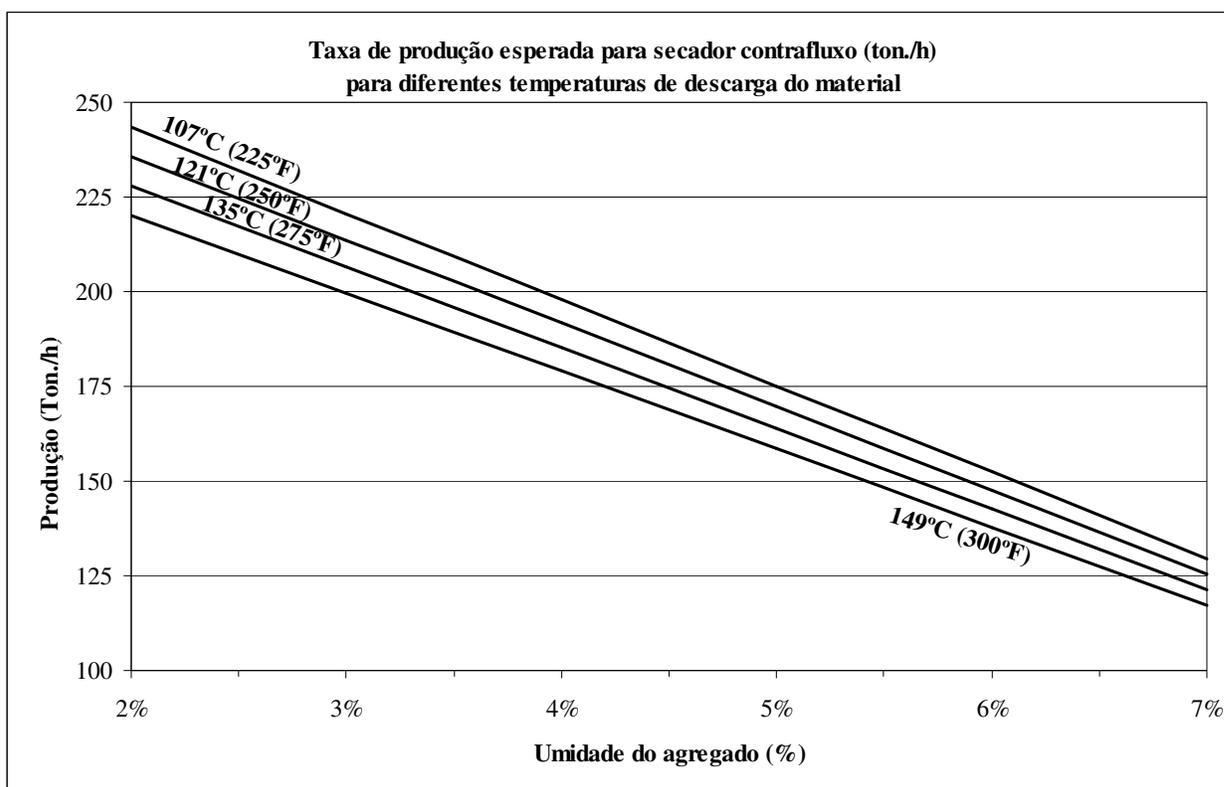


Figura 4.11 – Ábaco da capacidade de produção de uma usina de asfalto secador contrafluxo (ton./h) para diferentes umidades do agregado e temperaturas de descarga do material.

Diâmetro do secador	Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo (ton./h)					
	Umidade do agregado					
	2%	3%	4%	5%	6%	7%
1,20 m	120	108	97	86	75	64
1,50 m	187	170	152	135	117	100
1,80 m	269	244	219	194	169	143
2,10 m	367	332	298	264	229	195
2,40 m	479	434	389	344	300	255
2,70 m	606	549	493	436	379	323
3,00 m	748	678	608	538	468	398

Condições de operação padrão para a instalação:
149°C de temperatura de descarga do material
335 m/min. de velocidade do gás no secador
50% excesso de ar
163 metros acima do nível do mar
155°C de descarga de gás no secador de fluxo paralelo

Tabela 4.25 – Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo (ton./h) para diferentes umidades do agregado.

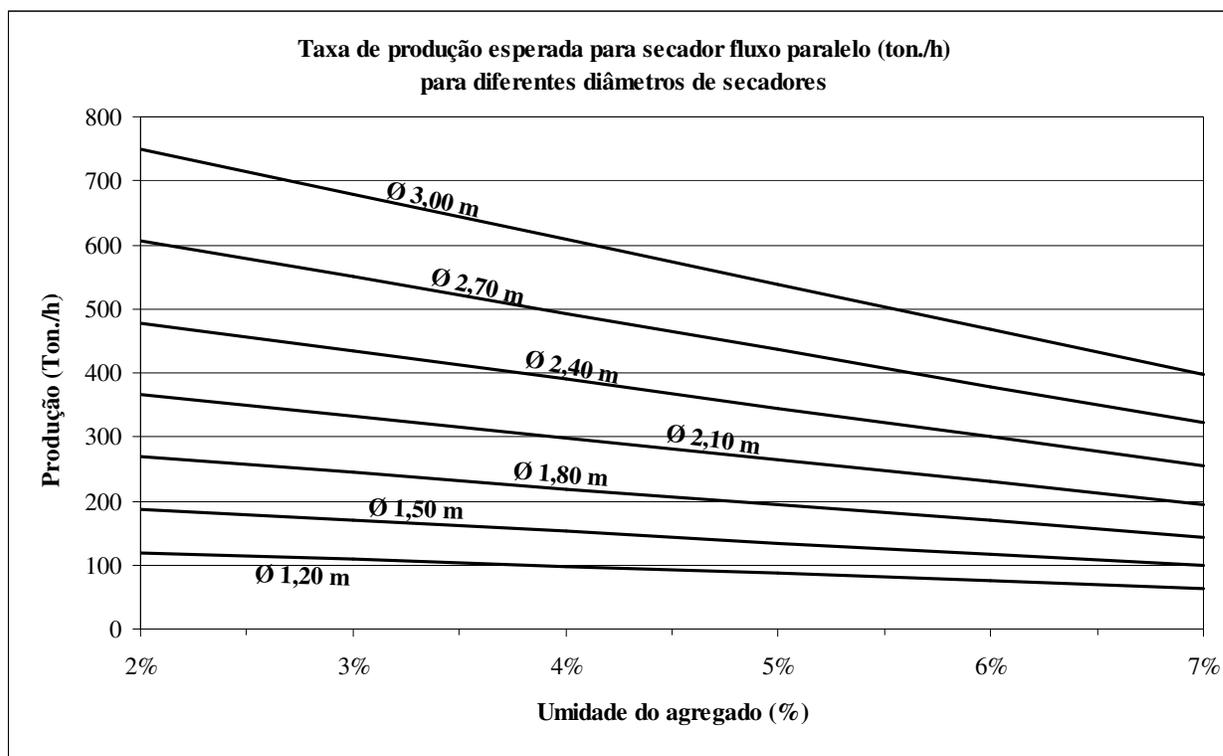


Figura 4.12 – Ábaco da capacidade de produção de uma usina de asfalto com diferentes diâmetros de secador fluxo paralelo (ton./h) para diferentes umidades do agregado.

Temperatura de descarga do material °C (°F)	Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo (ton./h)					
	Umidade do agregado					
	2%	3%	4%	5%	6%	7%
149 (300)	269	244	219	194	169	143
135 (275)	279	253	227	201	174	148
121 (250)	288	261	234	207	180	153
107 (225)	298	270	242	214	186	158

Condições de operação padrão para a instalação:
1,80 metro de diâmetro do secador
335 m/min. de velocidade do gás no secador
50% excesso de ar
163 metros acima do nível do mar
155°C de descarga de gás no secador de fluxo paralelo

Tabela 4.26 – Taxa de produção esperada para secador fluxo paralelo (ton./h) para diferentes temperaturas de descarga do material.

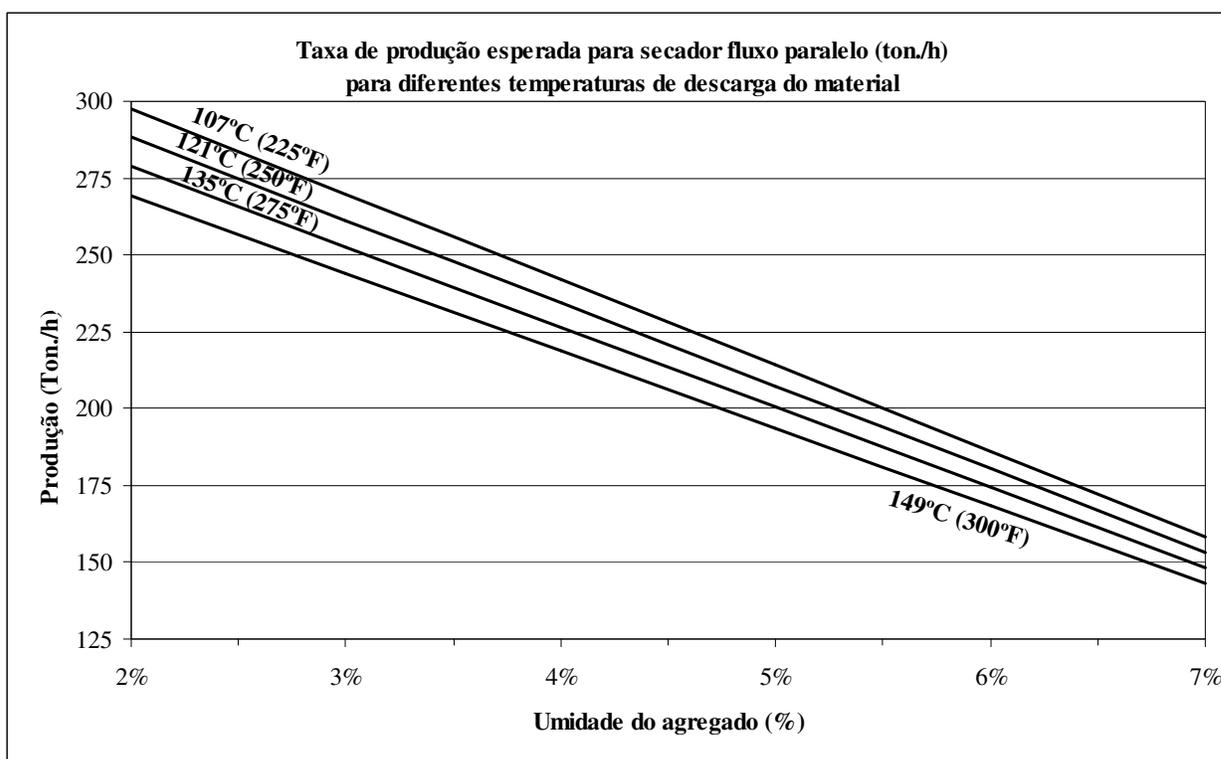


Figura 4.13 – Ábaco da capacidade de produção de uma usina de asfalto secador fluxo paralelo (ton./h) para diferentes umidades do agregado e temperaturas de descarga do material.

5. APLICAÇÃO PRÁTICA DAS EQUAÇÕES DE PRODUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS RODOVIÁRIOS

No presente capítulo se ilustra mediante um exemplo ilustrativo, a metodologia para determinar a produção dos equipamentos em estudo mediante a aplicação das equações indicadas no capítulo 3.

Durante a construção de um pavimento, normalmente são considerados dois fatores importantes para a determinação do tempo de execução da obra: os equipamentos disponíveis e os prazos de execução. Para o presente exemplo será tomado o prazo como fator determinante da obra.

A obra com as características indicadas a seguir, tem como prazo de execução 7 dias e consta de um pavimento com base granular e revestimento betuminoso:

- Comprimento da pista: 1000 metros;
- Largura da pista: 7 metros;
- Base de Brita Graduada Simples (BGS), com espessura compactada de 0,20 metros;
- Revestimento de Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ), com espessura compactada de 6 centímetros e densidade de compactação de 2,4 ton./m³.

- Os trabalhos de terraplenagem estão prontos com o subleito conformado e compactado.

A metodologia construtiva será dividida em dois processos: espalhamento e compactação da camada de base e a produção, espalhamento e compactação da camada de revestimento betuminosa.

O transporte dos materiais não foi estudado, já que é um fator que depende da capacidade dos caminhões basculantes e da distância desde a usina até a obra.

5.1. Espalhamento e compactação de camadas de solos.

Para o espalhamento da camada granular será necessário o emprego da motoniveladora e para a compactação será adotado um rolo compactador liso vibratório.

5.1.1. Estimativa de produção da motoniveladora

Segundo o exemplo escolhido, já que as dimensões da área de trabalho são conhecidas (largura e comprimento da pista), se aplicarão as equações 3.1 e 3.2 que utilizam estas variáveis.

Como já foi descrito anteriormente, a lâmina da motoniveladora é uma variável importante na produção desse equipamento. Segundo a pesquisa feita, as larguras se apresentam em 3,658 metros e 4,267 metros. Para o exemplo ilustrativo será utilizada a lâmina com largura “l” de 3,658 metros.

Segundo a Tabela 4.2, a faixa de velocidades recomendável (na fase produtiva) das motoniveladoras, para os trabalhos de espalhamento de materiais e nivelamento do greide está entre 5,0 e 10,0 km/h. Para o exemplo, será utilizada a velocidade de ida na fase produtiva “Vi” de 7,5 km/h (125 m/min.). Para a fase não produtiva ou velocidade a ré, “Vr” será considerada 20 km/h (333 m/min.).

A camada de base granular a ser espalhada possui 0,20 metros de espessura compactada, ou seja, sendo considerado um fator de empolamento de 25% para o material, a camada solta “e” a ser manipulada será de 0,25 metros.

O número de passadas recomendável “n” para o acerto de camadas entre 0,15 metros e 0,35 metros de espessura, segundo a tabela 4.3, varia entre 4 e 10. Para o exemplo, adotaram-se cinco passadas para espalhar e nivelar 0,25 metros de camada granular solta. Ressalta-se que o valor de n=5 representa unicamente ao trabalho que desenvolve a motoniveladora na fase produtiva (trajeto de ida). Portanto, o número total de passadas para regularizar a camada na largura total de trabalho será:

$$N = \frac{7,00}{3,66} \times 5 \cong 10$$

A eficiência adotada será de 70%.

Definidos os valores de trabalho e com o auxílio da equação 3.1, é determinado o tempo necessário para a operação de espalhamento e nivelamento da camada de base.

$$T = \left(\frac{1000}{125} + \frac{1000}{333} \right) \frac{10}{0,70} \cong 157 \text{ min}$$

A produção da motoniveladora na tarefa de espalhamento e regularização, com base na equação 3.2, será:

$$Q = \frac{7,0 \times 1000 \times 0,25 \times 60}{157} \cong 668,80 \text{ m}^3/\text{h}$$

Conclui-se que com uma jornada de 3 horas, a motoniveladora termina de espalhar e nivelar a camada granular em toda a área de trabalho.

5.1.2. Estimativa de produção do rolo compactador para solos

Concluído o espalhamento da camada granular deverá ser iniciado o processo de compactação para se atingir a espessura e densidade desejadas.

Os compactadores vibratórios para solos apresentam largura do rolo de 1,35 metro, 1,65 metro e 2,10 metros. Para o exemplo ilustrativo, se adotará a largura de 1,65 metro.

Segundo o DER-SP (2000), os percursos ou passadas de cada rolo compactador durante a compactação de solos deverão estar distanciados entre si de tal forma que, em cada percurso, seja coberto metade do rastro deixado no percurso anterior.

Portanto, a largura efetiva do rolo escolhido “l” será de 0,825 metro.

As faixas de velocidades recomendáveis pela tabela 4.11 são de 4 a 6 km/h, para a compactação de camadas de solos, entre 0,15 metro e 0,35 metro. Para o exemplo, será adotado “V” igual a 5 km/h.

O número de passadas recomendáveis “n” para compactar uma camada acabada de 0,20 metro de espessura, varia entre 3 a 6, segundo a Tabela 4.11. Para o exemplo, serão adotadas quatro passadas para se atingir a densidade desejada.

A eficiência adotada será de 70%.

Definidos os valores de trabalho para o rolo compactador e com o auxílio da equação 3.4, é determinada a produção do rolo para a compactação da camada de base.

$$Q = \frac{0,825 \times 0,20 \times 5 \times 0,70 \times 1000}{4} \cong 144,38 \text{ m}^3/\text{h}$$

Conhecendo que o volume a ser compactado do trecho em estudo é de 1400 m³, pode-se chegar à conclusão que com uma jornada de trabalho de dez horas é concluída a compactação.

Portanto, poderia se optar por utilizar uma frota de dois rolos compactadores para terminar o trabalho numa jornada de cinco horas.

5.2. Produção, espalhamento e compactação de camadas betuminosas a quente.

A produção do CAUQ será feita em usina. A mistura será espalhada com ajuda da pavimentadora e compactada com rolo liso vibratório e rolo pneumático, até se atingir a densidade almejada.

5.2.1. Estimativa de produção da usina de asfalto

Com base nas características descritas no exemplo ilustrativo, o volume total de CAUQ considerando 25% de empolamento da mistura (segundo a Tabela 3.8) será 1260 toneladas.

Para a produção desse volume será utilizada uma usina contrafluxo ou fluxo paralelo que atenda essa produção. Da bibliografia consultada as faixas de produção das usinas no Brasil variam entre 25 ton./h e 240 ton./h.

Para o exemplo estudado, considerando-se uma usina contrafluxo que possua um secador com 1,20 metro de diâmetro, velocidade média do gás no secador de 244 m/min. e 50% de excesso de ar, com auxílio da Tabela 4.21 se obtém uma taxa de produção de 79 ton./h.

5.2.2. Estimativa de produção do distribuidor de asfalto

Como já dito anteriormente, os distribuidores de asfalto são fabricados com barras espargidoras de 3,60 e 4,00 metros de largura. Para o exemplo se adotará “l” igual a 3,60 metros.

Com a finalidade de determinar a velocidade do distribuidor em metros/minuto, será assumido que a taxa de aplicação “t” necessária para realizar a imprimação é de 1.6 litros/m² e a vazão da barra distribuidora “q” é de 200 litros/minuto.

Com os dados definidos, a velocidade do distribuidor será de:

$$V = \frac{250}{3,6 \times 1,6} \cong 43 \text{ m/min}$$

Isto significa que o distribuidor de asfalto demorará 24 minutos para percorrer a metade da faixa total a ser imprimada. O trabalho total demora então menos de uma hora.

5.2.3. Estimativa de produção da pavimentadora de asfalto

Considerando-se que a usina de asfalto tem uma taxa de produção de 79 ton./h, determina-se, mediante a equação 3.9, a velocidade mínima da pavimentadora para se atender o volume fornecido.

Tratando-se de uma via com 7 metros de largura será empregada uma pavimentadora com largura de espalhamento “l” de 3,50 metros.

A espessura da camada compactada “e” será de 60 milímetros. Portanto, a espessura espalhada pela pavimentadora antes da compactação do rolo será de 75 milímetros, segundo a tabela 3.8. A densidade da mistura compactada será de 2,4 ton/m³.

Portanto, a velocidade mínima da pavimentadora para atender a taxa de produção da usina de asfalto será:

$$V = \frac{79 \times 1000}{60 \times 3,5 \times 60 \times 2,4} \cong 2,60 \text{ m/min}$$

A capacidade da pavimentadora é assim determinada pela equação 3.10, a partir da velocidade calculada e eficiência de 75%:

$$Q = \frac{60 \times 2,60 \times 3,5 \times 60 \times 2,4 \times 0,75}{1000} \cong 58,9 \text{ ton/h}$$

Finalmente, a pavimentadora necessitará de 17 horas para espalhar a totalidade de toneladas para a compactação do trecho.

5.2.4. Estimativa de produção dos rolos compactadores de asfalto

Logo após ser espalhada a mistura betuminosa na espessura correta, os compactadores de asfalto terão que iniciar seu trabalho, até atingir a densidade requerida.

Os compactadores lisos de asfalto apresentam largura do rolo de 1,00 metro, 1,25 metro, 1,30 metro, 1,40 metro, 1,65 metro, 1,95 metro, e 2,10 metros. Para o exemplo ilustrativo, se adotará a largura de 1,65 metro.

Segundo a NAPA (1996) e a AAPA (2001) deverá calcular-se a largura efetiva do rolo diminuindo-se 0,15 metro por conta dos traspases durante a compactação. Assim, a largura efetiva “l” do rolo é 1,50 metro.

As faixas de velocidades recomendáveis pela tabela 4.11 são de 3 a 6 km/h para compactação de camadas betuminosas com compactador vibratório. Para o exemplo será adotado “V” igual a 5 km/h ou seu equivalente 83 m/min.

O número de passadas recomendáveis “n” para compactar uma camada betuminosa de 6 centímetros varia entre 2 a 6, segundo a tabela 4.11. O número necessário adotado para atingir a densidade desejada será n = 4.

De igual forma a eficiência adotada será 70%.

Definidos os valores de trabalho para o rolo compactador e com auxílio da equação 3.5, é determinada a produção do rolo para a compactação da camada de revestimento.

$$Q = \frac{1,50 \times 0,06 \times 5 \times 0,70 \times 1000 \times 2,4}{4} \cong 189 \text{ ton/h}$$

Significa que com uma jornada de trabalho de seis horas se termina a compactação de trecho em estudo.

5.2.5. Estimativa de produção dos rolos pneumáticos de asfalto

Os rolos pneumáticos apresentam largura de compactação de 1,70 metro, 1,90 metro e 2,30 metros. Para o exemplo ilustrativo, se adotará a largura de 1,90 metro.

Segundo a NAPA (1996) e a AAPA (2001) deverá calcular-se a largura efetiva do rolo diminuindo-se 0.15 metro por conta dos traspases durante a compactação. Assim, a largura efetiva “I” do rolo é 1,75 metro.

As faixas de velocidades recomendáveis pela tabela 4.11 são de 3 a 8 km/h para compactação de camadas betuminosas com rolos de pneus. Para o exemplo será adotado “V” igual a 6 km/h ou seu equivalente 100 m/min.

O número de passadas recomendáveis “n” para compactar uma camada betuminosa de 6 centímetros pode-se apresentar até 12, segundo a tabela 4.11. O número necessário adotado para atingir a densidade desejada será n = 6.

De igual forma, a eficiência adotada será 70%.

Definidos os valores de trabalho para o rolo compactador e com auxílio da equação 3.5, é determinada a produção do rolo de pneus para compactação da camada de revestimento.

$$Q = \frac{1,75 \times 0,06 \times 6 \times 0,70 \times 1000 \times 2,4}{6} \cong 176.4 \text{ ton/h}$$

Significa que com uma jornada de trabalho de seis horas se termina a compactação de trecho em estudo.

Em resumo poderia se indicar que para a área a pavimentar indicada no exemplo, os equipamentos utilizam o seguinte tempo:

- A motoniveladora emprega três horas em espalhar e nivelar a camada;
- O rolo compactador de solos emprega dez horas em atingir a densidade desejada para a base granular.
- O distribuidor de asfalto emprega menos de uma hora em realizar a imprimação total.
- A pavimentadora de asfalto, em função da produção da usina, emprega dezesseis horas em espalhar toda a camada betuminosa.
- O rolo liso vibratório emprega seis horas em atingir a densidade desejada para a camada betuminosa;
- O rolo de pneus emprega seis horas em atingir a densidade desejada para a camada betuminosa.

Considerando que o trabalho de pavimentação da camada betuminosa é realizado em série com a pavimentadora e com os rolos liso e pneumático, só no trabalho de execução da camada betuminosa se empregam no mínimo três dias.

Os trabalhos feitos na base granular pela motoniveladora e o rolo de solos demoram no máximo dois dias.

A aplicação da imprimação betuminosa, segundo especificação DNER-ES 306-97, deverá ficar pronta no mínimo em 24 horas.

Portanto, quer dizer que para pavimentar uma pista de 1000 m de comprimento por 7 m de largura, com as características descritas linhas acima, e considerando a disponibilidade dos equipamentos alocados em obra, se empregará no mínimo seis dias.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1. Avaliação do trabalho desenvolvido.

Quando se inicia o planejamento da construção de um pavimento rodoviário vários itens são importantes, pois afetam diretamente a economia do projeto. Dentre eles, destaca-se a definição do equipamento mínimo necessário para sua execução.

Dependendo do tipo de projeto, dos prazos de execução e da importância da obra, a equipe de equipamentos poderá ser composta por duas ou mais frotas.

A determinação antecipada da estimativa de produção das máquinas envolvidas é crucial, já que com esta análise, se terá uma idéia do número de unidades de cada tipo de equipamento, da constituição de cada frota e se as metas serão alcançadas no prazo previsto.

A informação para o cálculo da produção dos equipamentos envolvidos na construção de um pavimento asfáltico rodoviário, como foi tratado neste trabalho, encontra-se muito dispersa. Faz-se necessário a procura de diferentes referências bibliográficas, não existindo uma que concentre de forma clara, concisa e de fácil acesso, como se determinar a produção dos equipamentos estudados, principalmente as referentes às usinas de asfalto.

Os manuais e especificações técnicas que se recebe quando se adquire um equipamento pesado, contêm uma série de informações, nem todas, no entanto, de interesse do engenheiro civil. As informações de caráter produtivo ficam meio a um conjunto de especificações mecânicas, nem

sempre estando disponíveis à grande parte dos engenheiros e pessoas ligadas à execução e a implantação da estrada. Os poucos manuais e especificações técnicas que chegam aos engenheiros nem sempre apresentam, passo-a-passo, como se determinar a produção de seus equipamentos.

No desenvolvimento deste trabalho, procurou-se coletar a maior quantidade de literatura disponível referente à produção dos equipamentos em estudo. A bibliografia baseou-se em manuais técnicos de órgãos internacionais como a NAPA, a TRB, a AAPA e o Instituto de Asfalto, referentes à produção e execução de camadas betuminosas, além dos manuais dos principais órgãos brasileiros como o DNIT, o DER-SP e a PMSP.

Catálogos, manuais e especificações técnicas de fabricantes como a Case, a Caterpillar, a Dynapac, a Muller, a New Holland, a Romanelli, a Terex Roadbuilding, a Volvo e a Wirtgen Group (Ciber, Hamm, Vogele), entre outros, fizeram parte da pesquisa.

Além disso, foram consultados informalmente engenheiros ligados ao tema, principalmente à produção de usinas de asfalto, por exemplo, da Ciber Equipamentos Rodoviários.

Com o estudo detalhado do processo construtivo procurou-se exemplificar uma metodologia de determinação da produtividade e do tempo dos equipamentos escopo.

Em face do exposto, os dados coletados apesar de estarem dispersos foram reunidos e compilados de forma ordenada e permitindo seu emprego posterior. Foi também desenvolvido um exemplo resolvido de um pavimento típico de forma a permitir a fácil aplicação das equações de produção.

É interessante ressaltar que o presente trabalho não possui a típica característica dos trabalhos acadêmicos tradicionais, mas em função da intensa pesquisa bibliográfica necessária para o desenvolvimento do conteúdo reunido e organizado, resultou um texto disponível para as consultas técnicas e acadêmicas futuras, e que poderá dar continuidade a outros trabalhos de igual objetivo.

6.2. Sugestões para futuras pesquisas.

Em futuras pesquisas seria importante a análise de outros tipos de pavimentos rodoviários, como exemplo, os equipamentos para a execução de pavimentos rígidos e semi-rígidos.

Além disso, com o aumento da conscientização ambiental, muitos pavimentos estão sendo reciclados, sendo a produção dos equipamentos envolvidos no processo de um tema interessante de pesquisa.

Um importante complemento ao presente trabalho seria a sua aplicação no planejamento real da produção de obras de pavimento flexível e no dimensionamento de suas frotas necessárias. Assim, ajustes eventuais às fórmulas poderiam ser feitos, além do desenvolvimento de novas ferramentas e ábacos.

7. BIBLIOGRAFIA

7.1. Referências bibliográficas

- [1] ABAD, I. M. *Plantas de Fabricación de Aglomerado Asfáltico*, Madrid, Espanha: 1991.
- [2] ABRAM I. *Planejamento de Obras Rodoviárias*, Brasil: Pini, 2001.
- [3] ARQUIE Georges. *Compactación en Carreteras y Aeropuertos*. Traduzido por VALERO A. L. Espanha: Editores Técnicos Asociados, 1972.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11170: Serviços de Pavimentação*. TB-372. Rio de Janeiro, 1990.
- [5] ASPHALT INSTITUTE. *Asphalt Plant Manual*, Manual Series N° 3 (MS-3). USA, 1974.
- [6] ASPHALT INSTITUTE. *The Asphalt Handbook*, Manual Series N° 4 (MS-4), USA, 1989.
- [7] ASPHALT INSTITUTE. *Asphalt Paving Manual*, Manual Series N° 8 (MS-8), 3ed. USA, 1987.
- [8] ASPHALT INSTITUTE. *Principles of Construction of Hot-Mix Asphalt Pavements*, Manual Series N° 22 (MS-22). USA, 1983.
- [9] AUSTRALIAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Asphalt Paving Speed*. Pavement work tips - N°31. Novembro 2001. Disponível em: <http://www.aapa.asn.au/content/aapa/download/worktips31.pdf>. Acesso em: 20 outubro 2007.

- [10] BAESSO, D. P. *Estradas Rurais, Técnicas Adequadas de Manutenção*. Florianópolis, Março 2003.
- [11] BALBO T. J. *Pavimentos Asfálticos – Patologias e Manutenção*, São Paulo: Plêiade, 1997.
- [12] CATERPILLAR. *Manual de Produção Caterpillar*, 29 ed. EUA: Caterpillar Inc. Peoria, 1998.
- [13] CATERPILLAR. *Manual de Compactação*. Brasil, 1995.
- [14] CATERPILLAR. *Manual de Pavimentação*. Brasil, 1995.
- [15] CORONADO, I. J. *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimento*. Convenio USAID/SIECA N°0596-0184.20. Guatemala, 2002. Disponível em: http://www.sieca.org.gt/Publico/Transporte/Manuales/Vulnerabilidad/Manual_normas/Manual_de_Pavimentos.pdf>. Acesso em: 05 março 2007.
- [16] DAY, D. A. *Construction Equipment Guide*. 2 ed. USA: John Wiley and Sons Inc, 1989.
- [17] DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DER-SP. *Manual de Normas – Pavimentação*. São Paulo, 2000.
- [18] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 299/97. *Pavimentação - Regularização do Subleito*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [19] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 300/97. *Pavimentação - Reforço do Subleito*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [20] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 301/97. *Pavimentação - Sub-Base Estabilizada Granulometricamente*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [21] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 303/97. *Pavimentação - Base Estabilizada Granulometricamente*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [22] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 306/97. *Pavimentação – Imprimação*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [23] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 307/97. *Pavimentação - Pintura de Ligação*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [24] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 308/97. *Pavimentação - Tratamento Superficial Simples*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.

- [25] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 309/97. *Pavimentação - Tratamento Superficial Duplo*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [26] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 310/97. *Pavimentação - Tratamento Superficial Triplo*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [27] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 311/97. *Pavimentação - Macadame Betuminoso por Penetração*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [28] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 314/97. *Pavimentação – Lama Asfáltica*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [29] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 316/97. *Pavimentação - Base de Macadame Hidráulico*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [30] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 317/97. “Pavimentação - pré-misturado a frio”. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [31] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER-ES 386/99. *Pavimentação - Pré-Misturado a Quente com Asfalto Polímero - Camada Porosa de Atrito*. Rio de Janeiro: IPR, 1997.
- [32] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 031/2004-ES. *Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico*. Rio de Janeiro: IPR, 2004.
- [33] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT 035/2005-ES. *Pavimentos Flexíveis – Micro Revestimento Asfáltico a Frio com Emulsão Modificada por Polímero*. Rio de Janeiro: IPR, 2005.
- [34] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. *Manual de Pavimentação*. 3ª ed. Rio de Janeiro: IPR – 719, 2006.
- [35] DON BROCK J. *Tambor Secador Mezclador*. Boletim técnico T-119S. USA: ASTEC, 1998. Disponível em: <http://www.astecinc.com/intl/literature/images/T119_SP.PDF>. Acesso em: 14 outubro 2007.
- [36] DYNAPAC. *Compaction and Paving, Theory and Practice*. Sweden: Dynapac AB, 1989.
- [37] DYNAPAC. *Manual de Compactação Vibratória*. Suécia: Dynapac Maskin AB, 1981.
- [38] FÁBRICA DE AÇO PAULISTA S.A. – FAÇO. *Manual de Britagem*. 2ª ed. São Paulo, 1975.

- [39] FERNÁNDEZ J. A. *Maquinaria de Fabricación, Extensión y Compactación de Mezclas Bituminosas en Caliente*. ASEFMA, 2006. Disponível em: www.asefma.com.es/doc/20050608/CONF%204%20Maquinaria%20de%20fabricacion.pdf. Acesso em: 25 julho 2007.
- [40] GELLER Myron. *Compaction Equipment for Asphalt Mixtures*. Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, ASTM STP 829, F.T. Wagner, Ed., American Society for Testing and Materials, 1984.
- [41] GUIMARÃES, N. *Equipamentos de Construção e Conservação*. Paraná: UFPR, 2001.
- [42] HELIO DE SOUZA, R; CATALANI G. *Manual Prático de Escavação: Terraplenagem e Escavações de Rocha*. 2^a ed. São Paulo: Pini, 2002.
- [43] HARRIS Frank. *Modern Construction and Ground Engineering Equipment and Methods*. 2^a ed. England: Longman Scientific and Technical, 1994.
- [44] HUNTER, Robert N. *Bituminous Mixtures in Road Construction*. London: Thomas Telford, 1994.
- [45] IOWA ASPHALT PAVING. *Best/Worst Construction Practices*. Apostila técnica. USA, 2007. Disponível em: www.ucs.iastate.edu/.../2007/asphalt/pdf/best%20worst%20construction%20practices%20-%20hourscht.pdf. Acesso em: 14 novembro 2007.
- [46] INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO. *Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos*. 4^a ed. rev. Rio de Janeiro: I.B.P./Comissão de Asfalto, 1990.
- [47] JEUFFROY G. *Proyecto y Construcción de Carreteras - Tomo II – Materiales, Maquinaria, Técnica de Ejecución de Obras*. Traduzido por Fonseca J.M. Espanha: Editores Técnicos Asociados, 1973.
- [48] NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Applying IS-52, Performance Expectations from Your Facility*. Training Aid Series 22. USA, 1998.
- [49] NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Balancing Production Rates in Hot Mix Asphalt Operations*. Information Series 120. USA, 1996.
- [50] NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Calidad en la Operación de Maquinas Pavimentadoras*. Serie informativa 125. USA, 1996.
- [51] NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos*. São Paulo: Villibor, 1995.

- [52] PEURIFOY, R.L.; SCHEXNAYDER C. *Construction Planning Equipment and Methods*. USA: Mc Graw Hill, 2002.
- [53] PEREIRA, A. L. *Equipamentos de Terraplenagem*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1961.
- [54] PINTO S.; PREUSSLER E. *Pavimentação Rodoviária - Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis*. Rio de Janeiro: Copiarte, 2001.
- [55] PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. *Diretrizes Executivas de Serviços de Pavimentação*, Tomo B, Volume 8. São Paulo, 1999.
- [56] RICO RODRÍGUEZ A.; DEL CASTILLO H. *La Ingeniería de Suelos en Vías Terrestres – Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas*, Volumen II. Mexico: Limusa, 1982.
- [57] SCHEROCMAN J. A.; MARTENSON E. D. *Placement of Asphalt Concrete Mixtures*. Placement and Compaction of Asphalt Mixtures, ASTM STP 829, F.T. Wagner, Ed., American Society for Testing and Materials, 1984.
- [58] SENÇO, Wlastermiler de. *Manual de Técnicas de Pavimentação*, Volume I. São Paulo: Pini, 1997.
- [59] THAGESEN, Bent. *Highway and Traffic Engineering in Developing Countries*. London: E and FN Spon, 1996.
- [60] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. *Factors Affecting Compaction of Asphalt Pavements*. Transportation research circular E-C105. Washington DC, 2006. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec105.pdf>. Acesso em: 19 abril 2007.
- [61] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. *Hot-Mix Asphalt Paving Handbook 2000*. TRB, National Research Council. Washington, D.C. 2000. Disponível em: http://www.airweb.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgAdvisoryCircular.nsf/0/84D53D0D6AAF8DCF8625721800554A26?OpenDocument&Highlight=ac%20150. Acesso em: 05 outubro 2007.
- [62] VIVAR ROMERO, G. *Diseño y Construcción de Pavimentos*. Capítulo de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú, 1991.
- [63] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Treinamento – Tipos de Usinas de Asfalto*. Apostila técnica. Brasil, 2006.

7.2. Catálogos técnicos consultados

- [64] CASE. *Motoniveladoras 845*. Catálogo técnico. Brasil, 2006.
- [65] CATERPILLAR. *Compactadores Vibratórios de Solo CS-533D, CS-531D e CP533D*. Catálogo técnico. Brasil, 2000.
- [66] CATERPILLAR. *Compactadores Vibratórios de Solo CS-431C, CS-433C e CP433C*. Catálogo técnico. Brasil, 1998.
- [67] CATERPILLAR. *AP-650B, Track Asphalt Paver*. Catálogo técnico. 1997.
- [68] CATERPILLAR. *AP-1050B, Track-type Asphalt Paver*. Catálogo técnico. 1997.
- [69] CATERPILLAR. *AP-1000B, Pavimentadora de Asfalto com Pneus de Borracha*. Catálogo técnico. Brasil, 1997.
- [70] CATERPILLAR. *AP-1055B, Asphalt Paver with Mobil-Ttrack System*. Catálogo técnico. 1996.
- [71] CATERPILLAR. *Caterpillar Paving Products – Solution Guide*. Catálogo técnico. 2000.
- [72] CATERPILLAR. *Motoniveladoras 120H, 12H, 135H, 140H, 14H, 169H, 143H e 163H*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: <http://brasil.cat.com/cda/layout?m=62803&x=12>. Acesso em: 05 março 2006.
- [73] CATERPILLAR. *Pavimentadoras de Asfalto AP 800D, BG 230, BG 240C, BG 260C*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: <http://brasil.cat.com/cda/layout?m=62803&x=12>. Acesso em: 15 janeiro 2006.
- [74] CATERPILLAR. *Asphalt Pavers – Track Pavers AP 1055D, AP 650B, BG 225C, BG 245C*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: <http://brasil.cat.com/cda/layout?m=62803&x=12>. Acesso em: 15 janeiro 2006.
- [75] CATERPILLAR. *Pavimentadoras de Asfalto – Sistema Movil Track BG 2455C*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: <http://brasil.cat.com/cda/layout?m=62803&x=12>. Acesso em: 15 janeiro 2006.
- [76] DYNAPAC. *Compactador Vibratório CA 150*. Catálogo técnico. Brasil, 2006.
- [77] DYNAPAC. *Compactador Vibratório CA 250*. Catálogo técnico. Brasil, 2006.

- [78] DYNAPAC. *Compactador de Pneus CP 142*. Folheto técnico. Brasil, 2006.
- [79] DYNAPAC. *Compactador de Pneus CP221*. Catálogo técnico. Brasil, 2006.
- [80] DYNAPAC. *Compactador de Pneus CP271*. Catálogo técnico. Brasil, 2006.
- [81] DYNAPAC. *Compactadores de Solo CA121, CA134, CA141, CA144, CA152, CA182, CA260, CA302, CA362, CA500, CA512, CA600, CA702*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: http://www.dynapac.com.br/templates/CategoryList_10590.aspx. Acesso em: 15 outubro 2006.
- [82] DYNAPAC. *Compactadores de Asfalto CC800, CC900, CC1000, CC102, CC122, CC142, CG223HF, CC222HF, CG233HF, CC232HF, CC322, CC422, CC522, CC622HF, CC722*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: http://www.dynapac.com.br/templates/CategoryList_10590.aspx. Acesso em: 15 outubro 2006.
- [83] DYNAPAC. *Pavimentadoras de Rodas F6W, F8W, F9W, F121W, F161W*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: http://www.dynapac.com.br/templates/CategoryList_11193.aspx. Acesso em: 15 outubro 2006.
- [84] DYNAPAC. *Pavimentadoras de Esteiras F4C, F5C, F5CS, F6C, F8C, F121C, F141C, F150C, F181C, F182CS, F300CS*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: http://www.dynapac.com.br/templates/CategoryList_11193.aspx. Acesso em: 15 outubro 2006.
- [85] MULLER. *Compactador Vibratório VAP 55*. Folheto técnico. Rio de Janeiro, Brasil.
- [86] MULLER. *Compactador Vibratório Autopropulsado VAP 70*. Folheto técnico. Rio de Janeiro, Brasil.
- [87] MULLER. *Compactador Vibratório VAP 120*. Folheto técnico. Rio de Janeiro, Brasil.
- [88] MULLER. *Compactador Vibratório Articulado VT 10*. Folheto técnico. Rio de Janeiro, Brasil.
- [89] MULLER. *Compactador de Pneus AP 26/30*. Folheto técnico. Rio de Janeiro, Brasil.
- [90] NEW HOLLAND. *Motoniveladoras RG 140.B, RG 170.B, RG 200.B*. Especificações Técnicas. Brasil, 2007. Disponível em: <http://construction.newholland.com/products/series.aspx?navid=112&RL=POLA&lineid=417&seriesid=2550>. Acesso em: 10 novembro 2005.

- [91] ROMANELLI. *Distribuidores de Agregado*. Catálogo Técnico. Brasil, 2006.
- [92] ROMANELLI. *Espargidores de Asfalto*. Catálogo Técnico. Brasil, 2006.
- [93] TEREX ROADBUILDING. *Usina de Asfalto Série Magnum*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [94] TEREX ROADBUILDING. *Usina de Asfalto Gravimétrica H50C*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006. Disponível em:
http://www.terex.com.br/admin/upload/arquivos/arquivo_BR20.pdf. Acesso em: 05 dezembro 2006.
- [95] TEREX ROADBUILDING. *Vibroacabadoras Série 400*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [96] TEREX ROADBUILDING. *Vibroacabadoras Série 600*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [97] TEREX ROADBUILDING. *Vibroacabadoras Série 700*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [98] VOLVO. *Motoniveladoras Volvo G930, G940, G946, G960*. Catálogo técnico. Brasil, 2006.
- [99] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Linha de Produtos América Latina*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2001.
- [100] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Linha de Produtos*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [101] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Plantas de Asfalto del Tipo Descontínuas*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [102] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Usinas de Asfalto Contrafluxo*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [103] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Usinas Contrafluxo mistura externa*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2001.
- [104] WIRTGEN GROUP/CIBER. *UACF 17P Advanced*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.

- [105] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Usinas de Asfalto Drum Mix UADM 12P/E ME*. Especificações Técnicas, Brasil, 2006. Disponível em: http://www.ciber.com.br/produtos/_usinas_drummix/index.asp. Acesso em: 04 outubro 2006.
- [106] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Usinas Contrafluxo UACF 12P ME, UACF 15P ME, UACF 17P Advanced, UACF 19P ME*. Especificações Técnicas, Brasil, 2006. Disponível em: http://www.ciber.com.br/produtos/_usinas_contrafluxo/index.asp. Acesso em: 04 outubro 2006.
- [107] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Usinas de Asfalto Gravimétrica UAB 18E*. Especificações Técnicas, Brasil, 2006. Disponível em: http://www.ciber.com.br/produtos/_usinas_gravimetricas/index.asp. Acesso em: 04 outubro 2006.
- [108] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Terminadora AF4000*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [109] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Vibro-Acabadora AF4500*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [110] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Vibro-Acabadora AF5000*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [111] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Terminadora AF5500*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [112] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Vibro-Acabadora AF6000M*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2006.
- [113] WIRTGEN GROUP/CIBER. *Vibro-Acabadoras de Asfalto – SA 114CR sobre Esteiras / SA 115CR sobre pneus*. Catálogo Técnico. Porto Alegre, Brasil, 2001.
- [114] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *3410 Compactador de Solos Vibratório*. Folheto Técnico. Brasil, 2006.
- [115] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *3411 Compactador de Solos Vibratório*. Folheto Técnico. Brasil, 2006.
- [116] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *3410P Compactador de Solos Tipo Pé-de-Carneiro*. Folheto Técnico. Brasil, 2006.

- [117] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *3411P Compactador de Solos Tipo Pé-de-Carneiro*. Folheto Técnico. Brasil, 2006.
- [118] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *HD 10/HD 12/HD 13 Compactador Articulado Tandem*. Folheto Técnico. Brasil, 2006.
- [119] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *HD 70 Compactador Articulado Tandem*. Folheto Técnico. Brasil, 2006.
- [120] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *HD 75 Compactador Articulado Tandem*. Folheto Técnico. Brasil, 2006.
- [121] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *HD 90 Compactador Articulado Tandem*. Folheto Técnico. Brasil, 2006.
- [122] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *HD 110 Compactador Articulado Tandem*. Folheto Técnico. Brasil, 2006.
- [123] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *Rolos Compactadores Pé-de-Carneiro 3205P, 3307P, 3412P, 3414P, 3516P, 3518P, 3520P*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: http://www.ciber.com.br/produtos/_rolos_compacta/index.asp. Acesso em: 12 novembro 2006.
- [124] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *Rolos Compactadores de Solos 3205, 3307, 3412, 3414, 3516, 3518, 3520*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: http://www.ciber.com.br/produtos/_rolos_compacta/index.asp. Acesso em: 12 novembro 2006.
- [125] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *Rolos Compactadores Tandem HD 120, HD130*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: http://www.ciber.com.br/produtos/_rolos_compacta/index.asp. Acesso em: 12 novembro 2006.
- [126] WIRTGEN GROUP/HAMM/CIBER. *Rolos Compactadores de Pneus GRW10, GRW15, GRW18*. Especificações Técnicas. Brasil, 2006. Disponível em: http://www.ciber.com.br/produtos/_rolos_compacta/index.asp. Acesso em: 12 novembro 2006.
- [127] WIRTGEN GROUP/VOGELE. *Super 1600-1, Extendedora sobre Orugas*. Catálogo Técnico. Alemanha, 2006.
- [128] WIRTGEN GROUP/VOGELE. *Super 1800-1, Extendedora sobre Orugas*. Catálogo Técnico. Alemanha, 2006.

- [129] WIRTGEN GROUP/VOGELE. *Extendedora sobre Rodas Super 1203, Super 1603-2, Super 1803-2*. Especificações Técnicas. Alemanha, 2006. Disponível em: http://www.voegle-ag.com/en/produkte/super_serie/radfertiger/SUPER_Serie_-_Uebersicht_Rad.html. Acesso em: 15 outubro 2006.
- [130] WIRTGEN GROUP/VOGELE. *Extendedora sobre Esteiras Super 1600-2, Super 1800-2, Super 1800-2SF, Super 1900-2, Super 2100-2, Super 2500*. Especificações Técnicas. Alemanha, 2006. Disponível em: http://www.voegle-ag.com/en/produkte/super_serie/raupenfertiger/Uebersicht_Raupenfertiger.html. Acesso em: 15 outubro 2006.

7.3. Bibliografia de apoio e consulta

- [131] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS - ABIMAQ. *Maquinarias Rodoviárias Brasileiras*. Brasil: Cartgraf, 1985.
- [132] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6023: Informação e Documentação – Referências – Elaboração*. Rio de Janeiro, 2002.
- [133] ATKINS, H. N. *Highway, Materials, Soils and Concretes*. 3^a ed. USA: Prentice Hall, 1997.
- [134] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos*. Rio de Janeiro: IPR – 704, 1998.
- [135] D’OCAGNE M. *Cálculo Gráfico y Nomografía*. Traduzido por Luis Gutierrez del Arroyo. Espanha: Daniel Jorro Editor, 1914.
- [136] FLEXIBLE PAVEMENTS OF OHIO. *Cold Weather Paving*. Technical Bulletin. Ohio, 2004. Disponível em: http://www.asphaltinstitute.org/Upload/Cold_Weather_Paving_781778887_7202005152037.pdf. Acesso em: 18 abril 2007.
- [137] FURASTE P. A. *Normas Técnicas para o Trabalho Científico, Elaboração e Formatação. Explicação das Normas da ABNT*. 14 ed. Porto Alegre: Brasil, 2007.
- [138] GALVÃO ARROXELAS, O. *Desenvolvimento dos Transportes e Integração Regional no Brasil – Uma Perspectiva Histórica*. Pernambuco, Brasil. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/pub/ppp/ppp13/galvao.pdf>. Acesso em: 10 maio 2007.

- [139] HEWES Laurence I. *Ingeniería de Carreteras – Calles, Viaductos y Pasos a Desnivel*. Traducido por Clarkson H. Oglesby. México: Continental, 1976.
- [140] KUO Yao-Chen. *Highway Earthwork and Pavement Production Rates for Constructions Time Estimation*. Texas: The University of Texas at Austin, 2004. Doctoral Dissertation. Disponível em: < <http://dspace.lib.utexas.edu/bitstream/2152/208/1/kuoy81347.pdf>>. Acesso em 02 Junho 2007.
- [141] MINNESOTA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *An Asphalt Paving Tool for Adverse Conditions*. Report N° MN/RC-1998-18. Minnesota, 1998. Disponível em: http://www.pavementpreservation.org/library/getfile.php?journal_id=578. Acesso em: 20 abril 2007.
- [142] RIOS S. Wilbert R.; PAIVA C.E.L. *Temperatura de Compactación en Mezclas Asfálticas en Caliente*. Anais do XIV Congreso Ibero-Latinoamericano de Asfalto. La Habana, Cuba, 2007.
- [143] WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *WSDOT Pavement Guide*. USA, 2008. Disponível em: <http://training.ce.washington.edu/WSDOT/>. Acesso em: 03 de janeiro 2008.