



KLS

Estradas

Estradas



Sandra Oda
Diego Camargo

© 2019 por Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia, gravação ou qualquer outro tipo de sistema de armazenamento e transmissão de informação, sem prévia autorização, por escrito, da Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Presidente

Rodrigo Galindo

Vice-Presidente Acadêmico de Graduação e de Educação Básica

Mário Ghio Júnior

Conselho Acadêmico

Ana Lucia Jankovic Barduchi

Danielly Nunes Andrade Noé

Grasiele Aparecida Lourenço

Isabel Cristina Chagas Barbin

Thatiane Cristina dos Santos de Carvalho Ribeiro

Revisão Técnica

Barbara Nardi Melo

Maria Fernanda de Oliveira Braga

Editorial

Elmir Carvalho da Silva (Coordenador)

Renata Jéssica Galdino (Coordenadora)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Oda, Sandra

O22e Estradas / Sandra Oda, Diego Camargo. – Londrina :
Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.
224 p.

ISBN 978-85-522-1386-4

1. Projeto geométrico de estradas. 2. Pavimentação
asfáltica. 3. Pavimentação de concreto. I. Oda, Sandra.
II. Camargo, Diego. III. Título.

CDD 625

Thamiris Mantovani CRB-8/9491

2019

Editora e Distribuidora Educacional S.A.

Avenida Paris, 675 – Parque Residencial João Piza

CEP: 86041-100 — Londrina — PR

e-mail: editora.educacional@kroton.com.br

Homepage: <http://www.kroton.com.br/>

Sumário

Unidade 1	
Demanda de tráfego rodoviário	7
Seção 1.1	
Área de estudo e informações básicas para projetos de rodovias	9
Seção 1.2	
Pesquisa de tráfego rodoviário.....	22
Seção 1.3	
Características do tráfego rodoviário	35
Unidade 2	
Pavimentação	51
Seção 2.1	
Generalidades sobre pavimentos.....	53
Seção 2.2	
Tipos de pavimentos rodoviários	68
Seção 2.3	
Misturas asfálticas: materiais e dosagem	84
Unidade 3	
Dimensionamento dos pavimentos	109
Seção 3.1	
Materiais para pavimentação (base e sub-base)	111
Seção 3.2	
Camadas constituintes e sistemas de drenagens.....	126
Seção 3.3	
Dimensionamento e construção de pavimentos	142
Unidade 4	
Projeto geométrico de rodovias.....	161
Seção 4.1	
Escolha do traçado	163
Seção 4.2	
Perfil transversal e perfil longitudinal.....	181
Seção 4.3	
Terraplenagem e interseções rodoviárias	201

Palavras do autor

O desenvolvimento da área de transportes tem grande importância para a evolução de um local ou um país. Os deslocamentos diários de pessoas e bens tem como resultado benefícios econômicos e sociais, no entanto, para que o transporte ocorra, é necessário disponibilizar infraestrutura adequada, com conforto e segurança. No contexto brasileiro, em que o percentual de viagens que ocorre com o modo rodoviário é consideravelmente maior, há uma necessidade maior de capacitar técnicos para o correto planejamento e execução da infraestrutura de rodovias. Sendo assim, o objetivo, neste material didático, é que o aluno seja capaz de identificar as necessidades de levantamentos de dados para os projetos rodoviários e de obtenção de informações da demanda. Outros aspectos que se espera da formação do discente é o conhecimento a respeito dos materiais de revestimento asfáltico, para a correta execução, o entendimento dos parâmetros de projeto para dimensionamento de rodovias, assim como a compreensão sobre as principais características geométricas de vias e suas relações com o projeto final.

Este material está dividido em 4 unidades que apresentam conhecimentos específicos de cada etapa de um projeto de rodovia. Ou seja, ao final do livro, é possível que o aluno tenha um projeto completo de rodovia. A Unidade 1 introduzirá conceitos de planejamento de transportes, especificamente os dados necessários para justificar ou identificar a demanda e a aplicação de recursos financeiros em obras de infraestrutura rodoviária. A Unidade 2 já inicia o processo de descrição de materiais e métodos de execução de serviços de pavimentação, principalmente no que diz respeito a materiais de revestimento asfáltico. A Unidade 3 desenvolve todo o entendimento necessário para o dimensionamento do pavimento, ou seja, aplicamos os conhecimentos, além do conteúdo desta unidade, das Unidades 1 e 2. Por fim, a Unidade 4 abrange a área de projeto geométrico, conhecimentos de geometria das vias e todo o processo de corte, aterro e movimentação de solo.

É sempre interessante que, além do que estudamos neste livro, você busque conhecer outros trabalhos e mais conteúdo sobre o tema, para que desenvolva um pensamento lógico e melhore sua capacidade de entender os projetos de engenharia de transportes.

Neste livro, realizando os estudos com responsabilidade e engajamento, será possível obter informações e conteúdos importantes para o seu desenvolvimento profissional. Preparado para aprender mais sobre este tema? Vamos lá, vencer este novo desafio só depende de você!

Bons estudos!

Unidade 1

Demanda de tráfego rodoviário

Convite ao estudo

A necessidade por transporte nasce de atividades como trabalho, educação e lazer, além de ser preciso deslocar bens e mercadorias. As rodovias são responsáveis pela maior parte do escoamento de bens e produtos no Brasil. Podemos definir como demanda essa necessidade ou desejo pela utilização de serviços de transporte. Questões atuais que ocorreram em nosso país mostram a importância dos transportes no nosso dia a dia, como a paralisação dos caminhoneiros no início de maio de 2018, evento que desencadeou muitos problemas em algumas cidades, como a falta de alimentos. É possível, portanto, imaginar o tamanho da importância dos transportes em nossa vida.

O objetivo desta unidade é ensiná-lo a identificar as necessidades de levantamento de dados para projetos rodoviários e a conhecer as classificações e características dos veículos e sua interferência na infraestrutura rodoviária. Ao final desta unidade, você será capaz de compreender a importância do levantamento de dados e de aplicar esses dados nos projetos de rodovias.

Dentro desse contexto, é necessário que o engenheiro saiba quais são as demandas de utilização do transporte, para que não ocorra a má aplicação de dinheiro público ou para que o subdimensionamento de um sistema de transporte não atrapalhe o desenvolvimento de indústrias produtivas no nosso país. O projeto de uma rodovia exige o conhecimento da demanda e também dos tipos de veículos que vão utilizar aquela infraestrutura, considerando que há uma diversidade grande de veículos no contexto brasileiro. Para isso, é necessário realizar levantamentos de campo, a fim de conhecer esta demanda por transportes.

Nesta unidade, você estudará alguns problemas que o farão familiarizar-se com dados volumétricos de tráfego e com a relação dos projetos com a demanda por transportes. Temos, inicialmente, a necessidade de conhecer os locais de levantamento, ou seja, a delimitação da área de estudo, logo após a contagem volumétrica dos veículos, seguida do tratamento dos dados e cálculo de indicadores. Vamos analisar um processo de levantamento de dados para um trecho da rodovia SP-332, área da concessionária Rota das Bandeiras, que tem como ponto de ligação a cidade de Paulínia, próxima a um polo industrial.

Para realizar um projeto de transporte, é necessário saber a demanda ou a quantidade de viagens que serão efetuadas naquela estrutura. Caso contrário, um grande investimento poderá ser desperdiçado em obras ineficientes.

O conteúdo desta unidade foi baseado no entendimento da demanda por transportes, em como identificar as necessidades e levantar dados referentes ao problema. Sugere-se, portanto, uma abordagem para o entendimento dos deslocamentos de bens, mercadorias e pessoas, para que, a partir disso, seja realizado o planejamento das rodovias ou redes de transporte rodoviário.

Ficou curioso? Vamos lá, temos muita coisa para aprender! Bons estudos!

Área de estudo e informações básicas para projetos de rodovias

Diálogo aberto

Você já se questionou por que as rodovias são construídas? Por que algumas têm pista simples e outras duplicadas? Por que algumas têm apenas 2 faixas e outras têm mais que 3? Por que algumas cidades têm ligações diretas e em outras é necessário realizar um caminho que percorre outras cidades?

Para iniciar a explicação desses questionamentos, você provavelmente pensou que as rodovias existem para melhorar o transporte rodoviário (maior conforto), que as de pista simples costumam ter uma quantidade de veículos menor que as de pista dupla e assim por diante. De maneira geral, podemos pensar em uma única palavra para tudo isso: demanda. Afinal, o que é demanda? Podemos definir esse termo como: desejo ou necessidade de consumir um bem ou serviço. Trazendo essa definição para o contexto de transportes, temos que identificar a necessidade de se transportar bens ou produtos, toda a produção agrícola do país e produção de produtos de consumo ou uso da população. A própria população é uma demanda de transporte, uma vez que as pessoas precisam se deslocar.

Os elementos para desenvolver um levantamento de dados de demanda devem abranger uma área específica, desde que se tenha contribuição na utilização da infraestrutura rodoviária, então, deve ser delimitada e conhecida. Toda a base do projeto da rodovia terá como referência o levantamento de dados, ou seja, o número de faixas, inclinação máxima das rampas, velocidade de projeto, entre outros. É de elevada importância apresentar dados concisos e de real representação do cenário atual dos transportes locais, uma vez que a construção da infraestrutura deve acomodar todas as viagens atuais e futuras.

Imagine que você foi contratado para fazer o levantamento de dados de demanda por transportes para um projeto de rodovia. Como você realizaria esse processo de conhecer a necessidade de deslocamentos e viagens, por meio do modo rodoviário?

Uma empresa concessionária de rodovias precisa verificar a demanda por transportes da SP-332 (Rodovia Estadual General Milton Tavares de Souza). Você ficou responsável por fazer um levantamento de Volume Diário Médio (VDM) consultando o Departamento de Estradas de Rodagem (<http://www.der.sp.gov.br/WebSite/MalhaRodoviaria/VolumeDiario.aspx>). Para isso,

deverá definir o trecho a ser analisado e examinar as condições da demanda e as características de tráfego do local.

Essa contratação de serviço tem como objetivo avaliar o desempenho da rodovia, com relação à demanda existente, e a necessidade de melhorias na infraestrutura, assim como a atualização dos dados para acompanhamento da evolução do tráfego.

Para desenvolver a resolução desse problema, é necessário, primeiramente, conhecer os conceitos de demanda e definir a área de estudo ou a área que o problema abrange (principalmente as questões das cidades inseridas na região). Posteriormente, é preciso fazer o levantamento de dados básicos para o projeto.

Para que você consiga dimensionar os projetos rodoviários, é necessário e importante ter um olhar amplo e crítico sobre a demanda e sobre o levantamento de dados.

Bons estudos!

Não pode faltar

A necessidade por transporte é um processo derivado de outras atividades, as pessoas são obrigadas a se locomover (associa-se essa locomoção a um modo de transporte) para viagem de férias, viagem a trabalho, entre outras. Há, inclusive, as viagens realizadas para o transporte de alimentos, produtos ou bens. Perceba que no dimensionamento de uma rodovia, por exemplo, é necessário saber quantas viagens ocorrerão naquele espaço (infraestrutura da rodovia), ao longo de um período determinado. Neste contexto, temos os estudos de demanda por transportes, que são realmente importantes para a área, uma vez que a construção da infraestrutura deve obedecer a critérios mínimos da demanda pela utilização.

Não se trata apenas do modo rodoviário, mas qualquer que seja a modalidade de transporte, é necessário realizar um estudo da demanda (necessidade/desejo de utilizar o serviço) para que, então, se providencie a oferta. Ao menos o planejamento clássico de transportes é realizado dessa maneira no Brasil. Essa característica de equilibrar a demanda com a oferta costuma apresentar o melhor custo/benefício, mas a China, por exemplo, construiu infraestrutura de transporte para demandas realmente altas, não se preocupando com os valores investidos nas obras, mas com a operacionalização dos transportes.

É muito importante destacar que a matriz de transportes de um país pode ser determinante para o seu nível desenvolvimento, uma vez que a produção agrícola ou industrial pode ser escoada para os terminais e portos com eficiência.

Existem vários estudos a respeito da demanda por transportes, inclusive, podem variar conforme a necessidade de projeto ou aplicação dos dados. Como nosso objetivo aqui é estabelecer relação com projetos rodoviários, serão apresentadas as características de levantamentos realizados, a fim de desenvolver projetos de rodovias.

Afinal, qual é o objetivo de realizar os levantamentos por demanda de transporte rodoviário?

- Planejamento do número de faixas das rodovias.
- Planejamento do nível de qualidade do serviço da rodovia.
- Programação de reabilitação e manutenção do pavimento.
- Dimensionamento da infraestrutura do pavimento.

O levantamento da demanda não é tão simples, imaginando que seria apenas uma contagem das viagens que são realizadas em uma localidade.



Refleta

Imagine que já existe uma rodovia pavimentada, mas com a superfície deteriorada (muitos buracos), uma situação tão precária que você, como condutor do seu veículo, decide escolher outro percurso, mais confortável (com superfície regular) e seguro, mesmo esse outro percurso acrescentando alguns quilômetros na sua viagem. Nesse caso, em um projeto de reestruturação do pavimento, o levantamento do volume de veículos nessa rodovia não será assertivo, uma vez que atualmente a demanda que passa pela rodovia não é a que passaria por lá em condições adequadas de viagem. Como deveria ser feito o levantamento de demanda? Quais soluções podem ser tomadas? E quando a rodovia sequer existe? Como saber a demanda por viagens em uma região, se a infraestrutura não existe?

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) é um dos órgãos públicos que trabalham com levantamentos de demanda por transportes, a nível nacional. Vários relatórios foram publicados pelo instituto ao longo dos últimos anos, para, principalmente, orientar o planejamento dos transportes no país. O método utilizado é a pesquisa de demanda por viagem e entrevistas de campo, ou seja, há uma equipe externa que aplica questionários a respeito das viagens, sendo separados por pares de Origem e Destino. Portanto, temos como produto a origem e o destino da viagem e, com isso, temos à disposição uma matriz Origem-Destino (O/D).

Perceba que, no caso do levantamento do IPEA, que teve abrangência nacional, foram obtidos os pares de origem e destino ao longo de todo o país. Esses levantamentos do tipo O/D podem ocorrer em casos mais locais ou regionais, mas em alguns casos deixam de ser uma opção, devido ao alto custo, pois exige uma equipe treinada em campo aplicando questionários. Além disso, é importante ter uma amostra representativa, necessitando de uma quantidade mínima de pessoas que respondam, exigindo um tempo maior para o levantamento destas informações.

Pesquisas O/D geralmente são aplicadas para casos em que não há infraestrutura existente para o trecho em que se pretende construir, ou seja, não é possível realizar um levantamento volumétrico de veículos que passam pela rodovia.

Outra maneira de realizar levantamentos de demanda é por meio da contagem de veículos que já utilizam a infraestrutura existente, com equipamentos específicos, ou mesmo fazer contagem manual. Atualmente, há uma tendência da utilização de gravações de vídeos para contabilizar veículos, uma vez que em algumas rodovias concessionadas já têm um sistema de monitoramento por câmeras. Seria, portanto, uma segunda aplicação desses vídeos.

Até esse momento falamos de levantamentos de demanda que geram dados atuais da utilização dos transportes. Nesse processo, também é preciso projetar a demanda para um período futuro, entre 10 e 20 anos. Obras de infraestrutura de transportes são caras, sendo necessário vislumbrar um período maior para que a capacidade da infraestrutura chegue ao seu limite.



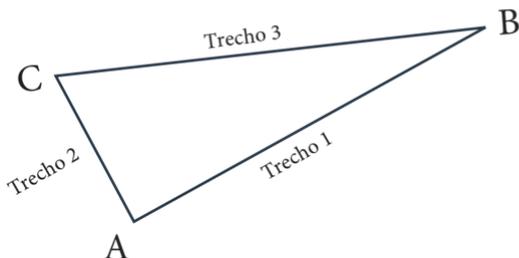
Exemplificando

Podemos citar como exemplo, baseado em Coelho e Goldner (2016), os seguintes dados a serem obtidos em pesquisa O/D para dimensionamento em projetos de rodovias: tipos de veículo (passeio ou carga, automóvel, ônibus, caminhão, etc.); número de pessoas no veículo; origem e destino das viagens; rotas de viagem; propósito da viagem (trabalho ou lazer); frequência das viagens; localização do estacionamento; paradas intermediárias; sexo e idade do motorista e dos passageiros.

Após a compilação destas informações, é possível estimar a demanda de tráfego para o trecho da rodovia analisado.

Outro aspecto importante do levantamento de dados é a escolha ou a definição das áreas a serem analisadas e onde serão levantados os dados.

Figura 1.1 | Exemplo de rede de rodovias com ponto intermediário



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 1.1 apresenta uma situação em que existem 3 pontos ou cidades ligadas por 3 trechos ou rodovias. O trecho 3 se encontra em péssimas condições, o que significa que alguns usuários preferem utilizar outras rodovias para se deslocarem. Imagine que a cidade B é um polo de atração, então, é o destino de muitas viagens, ou seja, a população da cidade C tem a opção de utilizar o trecho 3 (mais curto) ou utilizar o trecho 2 até a cidade A para, também, utilizar o trecho 1 e acessar a cidade B (mais longo). Com o trecho 3 em condições ruins, a população acaba optando pela segunda opção (os trechos 1 e 2, que estão em boas condições).

Nesse caso, temos um problema caso seja levantada a demanda apenas na rodovia, afinal, logo após a obra de melhoria que será aplicada na estrutura, toda a demanda que utilizava os trechos 1 e 2 migrará para o trecho 3, ocorrendo um subdimensionamento da estrutura que, conseqüentemente, terá uma deterioração rápida.

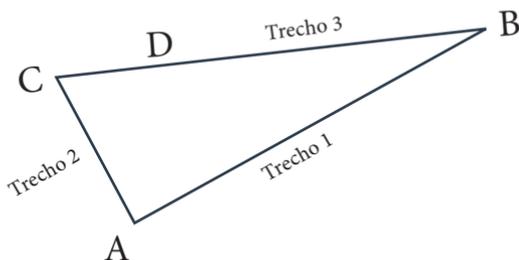
O exemplo é válido para que a definição da área de estudo seja realizada de maneira criteriosa. Mas como estabelecer a área de estudo? Cada região tem um comportamento diferente, por isso, você, como profissional e responsável por esse tipo de levantamento, deve verificar os seguintes pontos:

- Qual é o objetivo do projeto (melhoria da estrutura entre as cidades X e Y, por exemplo)?
- Ao longo do trecho a ser melhorado, existem pontos intermediários que podem afetar significativamente o tráfego local?
- Qual é a situação atual das rodovias próximas? Há alguma que disponibilize opção de locomoção da população?
- Qual é a característica do tráfego local? Veículos pesados? Qual é a economia local? Áreas agrícolas, com produção de grãos, por exemplo, costumam gerar um número expressivo de viagens por veículos pesados em períodos específicos (safra).

Além disso, os levantamentos devem ser realizados em um intervalo de tempo (dia, semana ou mês) típicos, ou seja, períodos que costumam mudar o comportamento do tráfego (férias, chuvas, etc.).

As verificações propostas acima já apresentam, também, um critério de estabelecimento de zonas de tráfego. Regiões que geram ou atraem viagens (Polos Geradores de Viagens – PGVs) acabam se tornando zonas de tráfego que necessitam de atenção maior no levantamento de dados. No meio urbano, dentro das cidades, essa identificação acaba sendo um trabalho mais complicado, pois, apesar de ter um aspecto mais dinâmico, nas rodovias é mais fácil identificar essas regiões.

Figura 1.2 | Exemplo de rede de rodovias com ponto intermediário



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 1.2 temos um ponto intermediário no Trecho 3, ponto D, que, para esse exemplo, representa uma usina de cana-de-açúcar. O cultivo da cana-de-açúcar ocorre no entorno da usina, isso significa que boa parte das viagens com destino à usina acaba não passando nem pela cidade C e nem pela cidade B. É importante que o levantamento da demanda considere esses veículos ou o número de viagens geradas pela usina, uma vez que podem exigir consideravelmente da estrutura e da resistência do pavimento no trecho em que trafegam.



Assimile

Perceba como o conhecimento da demanda é fundamental para o desenvolvimento do projeto, a fim de evitar gastos e investimentos desnecessários com a obra. O levantamento é uma parte do projeto tão essencial quanto dimensionar o pavimento. Dê importância ao planejamento, pois pode ser o motivo de uma obra bem-sucedida. Ou seja, um dos principais conceitos do planejamento é o levantamento de dados e o conhecimento básico da área do projeto.

Portanto, os elementos finais que nortearão o nosso projeto de rodovia serão apresentados logo após a análise da demanda, isto é, com a definição do número de viagens que aquela estrutura será preparada para receber, desde a estrutura que suportará as solicitações até a quantidade de faixas que deverão ser disponibilizadas.

As informações básicas que devem ser apresentadas para a etapa do projeto são:

- Volume Diário Médio (VDM).
- Veículo de projeto (veículo crítico que utilizará a estrutura).
- Transformação do valor de demanda em número de solicitações do eixo padrão (N).
- Classe da rodovia, número de faixas, entre outros.

O VDM é um valor obtido através da contagem de veículos, conforme já exposto (isso será abordado melhor na próxima seção). O veículo de projeto é uma informação que pode ser extraída da observação do tipo de veículos que trafegam na região ou que já utilizam a infraestrutura. Esse veículo de projeto será considerado para o dimensionamento da superlargura da pista, rampas máximas e raios mínimos, sendo, assim, uma informação importante e não devendo ser atribuído a qualquer veículo, uma vez que, na inexistência desse veículo na região, pode-se gastar muito com uma estrutura desnecessária ou gastar menos e ter uma estrutura ineficiente.

O cálculo do valor de eixo padrão (N) é uma necessidade para dimensionar o pavimento, ou seja, por meio do levantamento do VDM e da classificação dos veículos (abordaremos isso na terceira seção desta unidade), obteremos a solicitação do pavimento para um horizonte de projeto.

Você aprendeu sobre a importância do levantamento de dados para estimar a demanda no projeto de uma rodovia. Agora terá a oportunidade de desenvolver sua aprendizagem de maneira prática, resolvendo um problema com dados reais. Preparado para analisar alguns dados sobre demanda de transportes para rodovias?

Imagine que a empresa Rota das Bandeiras, concessionária de algumas rodovias, contratou você para realizar um levantamento de dados, que será usado na análise de demanda de tráfego da rodovia SP-332 (Rodovia Estadual General Milton Tavares de Souza). Sua análise será focada em um trecho da SP-332 localizado na região próxima à cidade de Paulínia. A concessionária precisa destas informações para fazer o acompanhamento da demanda e para controlar a manutenção das vias. Quais são os passos principais para fazer uma avaliação da demanda para um projeto de rodovias? Que indicadores ou parâmetros precisam ser conhecidos para realizar esta análise? Que formas ou métodos podemos utilizar para fazer estes levantamentos?

Neste levantamento você deve especificar a abrangência do projeto (área de estudo), o trecho que está sendo analisado, as informações básicas que devem ser levantadas pela equipe de campo, como deve ser executada a contagem de veículos (obtenção do valor de VDM) e quais são as características do tráfego local. Após levantadas essas informações, a demanda da rodovia será conhecida e você poderá passar estes dados com suas recomendações para a concessionária.

No site do DER (2018), você pode pesquisar o VDM de vários trechos de rodovia. No Quadro 1.1 são apresentados estes dados para o trecho analisado.

Quadro 1.1 | Volume Diário Médio (VDM) da Rodovia SP 332

 Secretaria de Logística e Transportes Departamento de Estradas de Rodagem ESTATÍSTICA DE TRÁFEGO VOLUME DIÁRIO MÉDIO DE TRÁFEGO (VDM)															
Posto de coleta						VDM 2015			VDM 2016			VDM 2017			
Posto	Concessionária	Rodovia	Denominação	Km	Praça de Pedágio	Sentido	Passoieiro	Comercial	Total	Passoieiro	Comercial	Total	Passoieiro	Comercial	Total
855	Rota das Bandeiras	SP 332	Rod. General Milton Tavares de Souza	132,55	km 132,55 - Paulínia B	Norte	1.248	1.480	2.728	1.235	1.495	2.730	1.216	1.429	2.645
854	Rota das Bandeiras	SP 332	Rod. General Milton Tavares de Souza	135,5	Paulínia A	Norte	6.505	2.000	8.505	5.123	1.803	6.926	5.647	1.831	7.478
854	Rota das Bandeiras	SP 332	Rod. General Milton Tavares de Souza	135,5	Paulínia A	Sul	5.520	1.790	7.310	5.123	1.708	6.831	5.614	1.754	7.368
21	Rota das Bandeiras	SP 332	Rod. General Milton Tavares de Souza	159,7	Engenheiro Coelho	Norte	2.243	620	2.863	2.128	609	2.737	2.279	613	2.892
21	Rota das Bandeiras	SP 332	Rod. General Milton Tavares de Souza	159,7	Engenheiro Coelho	Sul	1.925	440	2.365	2.079	470	2.548	2.218	511	2.729

Nota: Fonte ARTESP

Fonte: ARTESP apud DER - SP, 2018. Disponível em: <http://www.der.sp.gov.br/WebSite/MalhaRodoviaria/VolumeDiario.aspx>. Acesso em: 10 out. 2018.

Perceba que a região que atende a cidade de Paulínia tem uma demanda por veículos comerciais (caminhões e ônibus) muito maior que outros trechos, pois é um importante elo em uma região de polo industrial. Temos a influência direta do setor produtivo local na nossa demanda por transportes,

incluindo as operações realizadas pela Petrobrás. Comparando os dados de 2015 a 2017, notamos que houve uma redução da demanda no ano de 2016, mas um aumento de 2016 para o ano de 2017, deixando visível que neste trecho da rodovia, a demanda por transporte para a cidade de Paulínia tem crescido nos últimos anos.

No site do DER/SP (2018) também é possível identificar as características da estrutura da rodovia, ou seja, nesse trecho que estamos analisando a estrutura é duplicada, o processo de verificação da necessidade de ampliação da estrutura já foi realizado, inclusive o trecho deve ter certo nível de congestionamento (comparado com os outros trechos que também têm estrutura duplicada). Mesmo esses 5 pontos de contagem (Quadro 1.1) sendo duplicados, temos apenas a região de Paulínia com alto volume de tráfego.

Você poderá pesquisar junto à concessionária se ela já utiliza gravações de vídeos para a contagem de veículos através de seu sistema de monitoramento por câmeras nas rodovias. Neste caso, você poderia obter estas informações direto do sistema da concessionária e organizar estes dados para apresentar para eles.

Caso eles ainda não tenham estas informações, para estimar o crescimento da demanda futura, você poderá realizar o levantamento de dados através da contagem de veículos que já utilizam este trecho da rodovia, usando equipamentos específicos ou mesmo fazendo a contagem manualmente.

Após efetuar estas análises sobre demanda por transportes em rodovias, você já consegue compreender a importância do levantamento de dados e é capaz de aplicar esses elementos nos projetos de rodovias. Animado para resolver mais um problema semelhante a este? Vamos lá!

Avançando na prática

Avaliação da demanda por transportes em rodovias federais

Descrição da situação-problema

Você foi contratado para avaliar a demanda de transportes de uma rodovia federal. Rodovias federais são importantes rotas de escoamento de mercadorias e viagens de pessoas, uma vez que fazem a ligação entre estados do país. Algumas BRs ainda têm estrutura precária, com relação à sua demanda (infraestrutura de pista simples, por exemplo). Para isso, são necessárias as avaliações da demanda, justificando o emprego de recursos financeiros na duplicação dessas rodovias

ou mesmo no melhoramento geral (em alguns casos, na elevação da classe da rodovia). Neste trabalho, o governo, através de licitação, contratou uma empresa especializada para um levantamento das rodovias federais do país, no tocante de análise volumétrica de veículos. A empresa em que você trabalha venceu o processo licitatório e agora precisa executar o serviço. Algumas análises sobre a demanda de transportes foram atribuídas a você, como das rodovias BR 153 e BR 116, sendo a primeira no estado do Paraná e a segunda no estado de São Paulo. Será que, por estarem em regiões diferentes, as demandas de transportes nestas rodovias também têm comportamentos diferentes? É isso que você vai descobrir analisando estes dados.

Resolução da situação-problema

Utilize o site do DNIT (2018) para pesquisar dados do PNCT (<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct>) para obter as informações iniciais necessárias. Realize uma análise da demanda das rodovias e faça um comparativo entre a estrutura de cada uma.

A BR 153, de acordo com DNIT (2018), tem três pontos de coleta de dados de volume de tráfego e é instituída por uma rodovia de pista simples ao longo desses três pontos. Situada no estado do Paraná, o primeiro ponto (km 44) fica ao norte do estado, próximo da divisa com o estado de São Paulo.

Quadro 1.2 | Volume Diário Médio (VDM) da Rodovia BR 153/ PR – km 44

VDMA Ano 2017 160 dias considerados	
Crescente	5137
Decrescente	5301
Total	10438

Fonte: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct/ContagemContinua>. Acesso em: 11 out. 2018.

Vale lembrar que o DNIT (2018) usa as nomenclaturas crescente e decrescente para indicar os dois sentidos de tráfego da rodovia no trecho analisado.

Figura 1.3 | Variação do VDM em junho de 2017 da Rodovia BR 153/ PR – km 44



Fonte: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/ContagemContinua>. Acesso em: 11 out. 2018.

Note que na Figura 1.3, para a rodovia BR 153/PR, é possível identificar que há um volume relativamente alto, considerando uma rodovia de pista simples, mas é mantido um comportamento similar tanto no trecho crescente como no decrescente.

Já a BR 116/SP (Quadro 1.3 e Figura 1.4), no km 437, tem sua estrutura como pista dupla, o que significa que, comparativamente à BR 153, ela tem uma capacidade de tráfego maior.

Quadro 1.3 | Volume Diário Médio (VDM) da Rodovia BR 116/SP – km 437

VDMA Ano 2017 253 dias considerados	
Crescente	11170
Decrescente	11488
Total	22658

Fonte: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/ContagemContinua>. Acesso em: 11 out. 2018.

Figura 1.4 | Variação do VDM em junho de 2017 da Rodovia BR 116/SP– km 437



Fonte: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/ContagemContinua>. Acesso em: 11 out. 2018.

Para uma análise inicial desses dados volumétricos, temos, comparativamente, uma demanda na BR 153 (VDM igual a 10.438 veículos, conforme Quadro 1.2) de praticamente metade com relação à BR 116 (VDM igual a 22.658 veículos, conforme Quadro 1.3), justificando, portanto, um investimento maior na estrutura da BR 116 (pista dupla). Com relação aos picos de demanda, analisando as Figuras 1.3 e 1.4, para a BR 153 é perceptível uma diminuição na demanda nos finais de semana e o mesmo ocorre para a BR 116. Isso significa que, para extrair o volume máximo de veículos dessas rodovias, é necessário também realizar levantamentos em dias típicos (terça, quarta e quinta-feira). No entanto, analisando as curvas crescentes e decrescentes da Figura 1.3, a demanda nos dois sentidos da via apresenta comportamentos similares. Notamos, na Figura 1.4, que há uma inversão da demanda nas curvas para os trechos crescente e decrescente entre os sábados e os domingos (nos três primeiros finais de semana de junho), sinalizando, por exemplo, uma movimentação pendular (ida e volta) no fim de semana. A característica do local do levantamento (km 437, próximo da cidade de Registro) é de rota ao litoral do estado de São Paulo, tendo, portanto, necessidade de levantamento não só nos dias típicos, mas também nos finais de semana.

Veja como, além dos números, é importante analisar o comportamento dos usuários em relação à rodovia. Em regiões diferentes podemos ter motivos e necessidades diferentes para utilizá-la. Compreender estes deslocamentos e motivos de viagens é importante para analisar os dados nesta fase inicial do projeto.

Faça valer a pena

1. A necessidade por transporte é um processo _____ de outras atividades, as pessoas _____ obrigadas a se locomover (associa-se essa locomoção a um modo de transporte) para realizarem tarefas cotidianas, como ir para o trabalho.

Assinale a alternativa que apresenta as palavras que preenchem corretamente as lacunas:

- a) Com origem e não são.
- b) Arbitrário e são.
- c) Derivado e são.
- d) De escolha a partir e não são.
- e) Derivado e não são.

2. Uma parte considerável das rodovias brasileiras, construídas nas décadas de 1970 e 1980, necessita de manutenção. Há, contudo, uma técnica de acompanhamento da demanda em rodovias para monitorar a demanda ao longo do tempo e identificar os períodos que precisam de correções no pavimento. Dentro da área de gerência de pavimentos é possível encontrar mais informações, no entanto, vemos que o levantamento do VDM, por exemplo, não se aplica apenas aos projetos de construção e melhoramento de rodovias, mas também à manutenção.

Para planejar atividades de manutenção de pavimentos, conhecer apenas o VDM é suficiente para determinar as solicitações do pavimento?

Assinale a alternativa abaixo que corresponde à resposta correta:

- a) Sim, conhecer apenas o VDM é suficiente para determinar as solicitações do pavimento.
- b) Não, é necessário, mas não suficiente. É preciso transformar as informações do tráfego em solicitações para o pavimento.
- c) Sim, pois além do volume de veículos, o VDM também informa os tipos de veículo que trafegam na rodovia.
- d) Sim, pois apenas com o volume total de veículos podemos fazer a projeção futura, sendo possível determinar a necessidade de manutenção.
- e) Não, para estimar as necessidades de manutenção também é necessário obter as informações das zonas de tráfego.

3. Pesquisas Origem/Destino (O/D) são necessárias, principalmente, quando não se tem informações ou condições de levantamento direto de demanda. O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), em um de seus trabalhos, realizou uma pesquisa O/D a nível nacional e logo após produziu a demanda futura (através de modelos matemáticos de demanda). Por que a pesquisa O/D, que ocorre por meio de questionários em áreas estratégicas, deve ter um número determinado de entrevistas (amostra definida)?

Assinale a alternativa a seguir que corresponde à resposta correta:

- a) Porque a pesquisa O/D, ao ser aplicada em grande escala, pode ser executada através de questionários.
- b) Apenas por uma necessidade de aumentar os custos de projeto.
- c) Porque pequenos projetos exigem a mesma quantidade de dados, ou seja, significa que todos os levantamentos terão o valor mínimo igual.
- d) Porque a amostra deve ser estatisticamente representativa à população de usuários, reduzindo custos de projeto.
- e) Porque a amostra mínima é calculada para obter valores mais exatos do tráfego local.

Pesquisa de tráfego rodoviário

Diálogo aberto

Aluno, agora que você entendeu a importância do levantamento de demanda para utilização em projetos de rodovias, avançaremos na obtenção de parâmetros de projeto com os conceitos de contagem de veículos, assim como na determinação dos diferentes tipos de veículos rodoviários existentes.

Você, como engenheiro civil responsável pelo desenvolvimento do pré-projeto de uma rodovia, precisa de dados da demanda do local. É necessário passar as informações básicas de como efetuar o levantamento para a equipe de campo. Lembrando que você deve justificar, tecnicamente, suas exigências quanto ao levantamento, pois os custos envolvendo o projeto podem variar consideravelmente.

Nesse sentido, você orientou a equipe que foi executar o levantamento, dizendo que se espera que os dados sejam levantados com precisão e sejam confiáveis. O resultado da pesquisa foi compilado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 | Volume de veículos por dia da semana

Dia do mês	Dia da semana	A -> B	B -> A
18/11/2007	Sábado	1413	1504
19/11/2007	Domingo	1594	1535
20/11/2007	Segunda-feira	1636	1497
21/11/2007	Terça-feira	1424	1468
22/11/2007	Quarta-feira	1496	1486
23/11/2007	Quinta-feira	1544	1454
24/11/2007	Sexta-feira	1854	1476

Fonte: elaborada pelo autor.

A contagem volumétrica dos veículos é imprescindível para a elaboração do projeto da rodovia, além de ser necessário determinar alguns indicadores, como o volume diário médio (VDM) e o veículo de projeto, após ter posse dos dados. Nesse contexto, você deve, ainda, tratar os dados que foram levantados em campo e produzir o VDM e identificar o veículo de projeto a ser utilizado.

Com essas informações, será possível dar prosseguimento no projeto, lembrando sempre que essa parte vai ditar as características da rodovia. Não executar o levantamento da demanda em campo pode custar o bom

desempenho da rodovia e a obra já pode começar com deficiências graves. Os conceitos apresentados são essenciais para o desenvolvimento do trabalho de campo e para a leitura e a interpretação de projetos dessa natureza.

Não pode faltar

Contagens volumétricas

A contagem de veículos é uma atividade corriqueira na vida profissional de um engenheiro responsável por projetos de transportes, uma vez que não é possível projetar ou dimensionar uma estrada sem saber exatamente a demanda e suas características. Perceba, portanto, que temos duas informações que necessitam ser levantadas: quantidade e característica de veículos. Estes dados devem ser coletados conforme a necessidade do projeto.

Imagine que precisamos apenas do número de veículos que vão utilizar a futura rodovia; então, não há necessidade de levantar as características dos veículos, apenas de classificá-los quanto ao tipo. Por outro lado, se vamos fazer o dimensionamento do pavimento, precisamos saber quais esforços a estrutura deve suportar, ou seja, o levantamento deve não só levantar a quantidade de veículos, mas também o tipo e a quantidade de eixos. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006) divide a contagem de veículos em três categorias: global, direcional e classificatória.

A execução dessas contagens pode ocorrer de diversas maneiras, conforme segue:

Contagem manual: a equipe de campo, com auxílio de uma caderneta ou de um contador analógico (dispositivo que gera contagem pressionando um botão), realiza a contagem. A Figura 1.5 apresenta a utilização do contador analógico.

Figura 1.5 | Contagem manual de veículos utilizando o contador analógico



Fonte: <http://www.cidadaopg.sp.gov.br/imprensa/fotos/?p=328300>. Acesso em: 15 out. 2018.

Contagem automatizada: a contagem automática ocorre por meio de equipamentos eletrônicos que detectam os veículos que passaram pelos pontos onde o equipamento foi instalado. Há diferentes tipos de equipamentos empregados, conforme apresentados nas Figuras 1.5 e 1.6.

Na Figura 1.6 o equipamento pode ser instalado em qualquer ponto e utiliza-se uma mangueira de ar no pavimento, ou seja, cada vez que um veículo passar pela mangueira, a pressão gerada identificará o veículo no equipamento, que fará a contagem e armazenará o dado. Essa mesma técnica pode ser usada para pontos em que já existe uma instalação no pavimento, contudo, utiliza a corrente elétrica, conforme a Figura 1.7. Há, ainda, contadores infravermelhos que não necessitam de dispositivos físicos na via, assim como softwares de contagem por vídeo.

Figura 1.6 | Contagem automática de veículos com mangueira de ar



Fonte: <http://brazhuman.com/site/images/portfolio/recent/item2.jpg>. Acesso em: 15 out. 2018.

Figura 1.7 | Contagem automática de veículos por corrente elétrica



Fonte: <http://www.strata.com.br/wp-content/uploads/2016/05/sensores-piezo-eletricos.jpg>. Acesso em: 15 out. 2018.



Exemplificando

A pesquisa de tráfego fornece dados tanto para dimensionamento estrutural e projeto geométrico das vias, como para análise de capacidade e avaliação de acidentes.

Na elaboração do projeto de uma nova avenida em um setor da cidade em crescimento com inúmeros complexos urbanísticos, devemos levantar os parâmetros de dimensionamento. Podemos usar, por exemplo, as contagens classificatórias que, segundo o DNIT (2006), registram os volumes para os vários tipos ou classes de veículos. Quanto ao método de contagem, perceba que não há o melhor método; nesse ponto deverá existir bom senso do planejador. Levantamentos manuais podem levar mais tempo, pois exigem tabulação e tratamento de dados, porém, dependendo do custo da mão de obra, podem apresentar economia ao serviço. Tenha em mente que cada projeto terá uma situação diferente do outro e esse tipo de decisão deve ser alinhada com o custo e o tempo disponíveis para cada um desses projetos.

Volume diário médio (VDM) anual

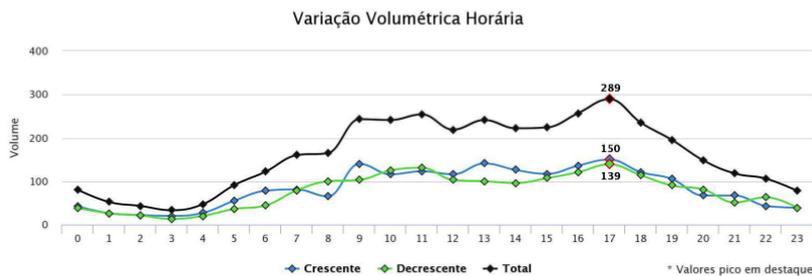
O VDM é a quantidade média (anual) de veículos que passam por determinado ponto; em outras palavras, é uma média diária de veículos, considerando o período de um ano. O VDM poderá ser calculado após a contagem volumétrica de veículos realizada em campo.

$$VDM = \frac{\sum \text{Veículos}}{365}$$

A equação acima apresenta o cálculo do VDM, em que a somatória dos veículos é o valor da contagem realizada em campo. O divisor da equação diz respeito ao número de dias no ano, que pode variar conforme a quantidade de dias levantados. Há, contudo, a possibilidade de classificar os VDMs de acordo com o tipo de veículo, por exemplo, VDM de veículo de passeio.

O Plano Nacional de Contagem de Tráfego (2018), realizado pelo DNIT, tem informações de VDM das principais rodovias nacionais e apresenta informações em vários formatos, como em gráficos. Na Figura 1.8 é apresentada a variação do volume de veículos que passam pelo ponto instalado no km 145 da BR 040, situado no estado de Minas Gerais, município de João Pinheiro. Os dados estão organizados por faixa horária, permitindo identificar o horário de maior movimento na rodovia. Além disso, há a divisão da rodovia por sentido, crescente e decrescente, que toma como referência o km 0 da rodovia (localizado no Distrito Federal - DF), portanto, o sentido crescente identifica que o veículo está se distanciando do DF e que o km está aumentando.

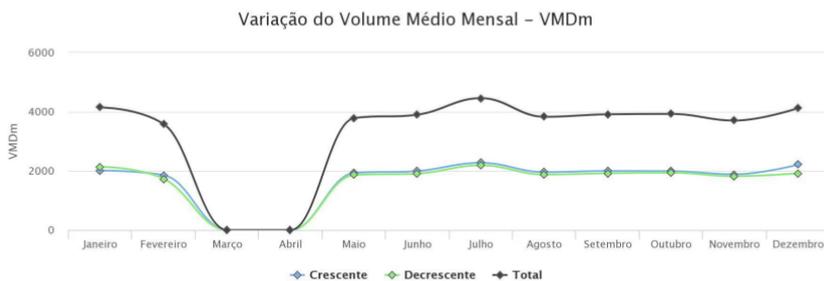
Figura 1.8 | Variação volumétrica de veículos, por faixa horária, na Rodovia BR 040/MG – km 145



Fonte: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/ContagemContinua>. Acesso em: 15 out. 2018.

Na Figura 1.9 temos a variação do volume de veículos por mês, para o mesmo ponto já apresentado (BR 040), sendo possível notar que em março e em abril não foram coletados dados, assim como o mês de janeiro não está completo. Temos, portanto, o Quadro 1.4 apresentando o quadro final do VDM da rodovia BR 040, considerando apenas 295 dias.

Figura 1.9 | Variação volumétrica de veículos em 2017 na Rodovia BR 040/MG – km 145



Fonte: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/ContagemContinua>. Acesso em: 15 out. 2018.



Assimile

As nomenclaturas adotadas pelo DNIT são diferentes das apresentadas no texto, conforme o Quadro 1.4. A maneira como são apresentadas não modifica a teoria por trás desses números. As nomenclaturas podem mudar de autor para autor, portanto, não se incomode, assimile o conhecimento exposto e não as nomenclaturas.

VMDA Ano 2017 (295 dias contados)	
Crescente	2011
Decrescente	1928
Total	3939

Fonte: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnc/ContagemContinua>. Acesso em: 15 out. 2018.



Refleta

Os dados expostos até agora, através do VDM, propõem uma demonstração global do volume de tráfego. Você considera isso coerente? No Brasil, a variedade de veículos que circulam nas rodovias é muito grande, seria lógico não os classificar e contabilizá-los separadamente? Qual é a sua opinião?

Tipologia de veículos

Nas rodovias brasileiras é estabelecido um valor máximo de carga por eixo e tipo de eixo. Há algumas normativas que tratam disso. Em documento único, o DNIT sintetiza as restrições quanto à carga e apresenta um resumo dos tipos de veículos existentes no contexto brasileiro.

Para a situação de contagem de veículos, essa classificação é muito importante, uma vez que vai definir como a infraestrutura do pavimento deve suportar as solicitações de tráfego. É necessário, portanto, coletar dados considerando os diferentes tipos de veículos rodoviários, ou seja, devemos obedecer a classificação desses veículos.

O Quadro 1.5 apresenta a parte inicial da tabela de classificação de veículos, disponível no Quadro de Fabricantes de Veículos, documento disponibilizado pelo DNIT (2008).

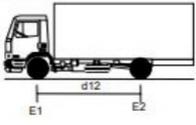
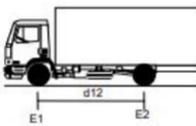
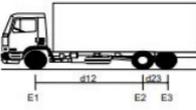
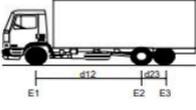


Assimile

Perceba que a necessidade de classificação do volume de veículos por tipo é uma exigência do projeto estrutural da rodovia, ou seja, em casos em que não há projeto estrutural do pavimento, podemos trabalhar com o VDM global.

É fortemente aconselhável que o aluno acesse o documento do DNIT (2008) citado para entender os pormenores no processo de classificação de veículos. Nas próximas seções vamos nos aprofundar em alguns assuntos, como tipos de eixos dos veículos rodoviários. Nesta seção, contudo, nos reservamos à identificação dos tipos de veículos e à importância dessa relação com a contagem volumétrica.

Quadro 1.5 | Classificação de veículos rodoviários

Silhueta	Grupo/ nº eixos	PBT ou PBTC / (5%)	Caracterização	Classe	Código
	2/2	12/(12,6)	CAMINHÃO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. $d12 \leq 3,50m$	2CC	120
	2/2	16/(16,8)	CAMINHÃO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2 = eixo duplo; carga máxima 10,0 ton. $d12 > 3,50m$	2C	65
	2/3	23/(24,15)	CAMINHÃO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo; carga máxima 17 ton. $d12 > 2,40m$ $1,20 < d23 \leq 2,40m$	3C	67
	2/3	19,5/ (20,475)	CAMINHÃO E1 = eixo simples; carga máxima 6,0 ton. E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos; carga máxima 13,5 ton. $d12 > 2,40m$ $1,20 < d23 \leq 2,40m$	3CD	103

Fonte: adaptado de DNIT (2008, [s.p.]).

Veículo de projeto (padrão)

Para o projeto de uma rodovia, é necessário tomar um veículo como referência para a construção de alguns dispositivos, por exemplo, vias de acesso, superlargura (acréscimo de largura da pista de rolagem, geralmente aplicadas em curvas), entre outros que serão abordados mais detalhadamente em outra unidade.

A questão central, neste momento, é que precisamos determinar o veículo de projeto após a contagem e classificação do tráfego, que será aquele com maiores dimensões de comprimento, considerando toda a estrutura do veículo (incluindo a quantidade de carrocerias existentes).

As características dos veículos têm uma relação direta com a região em que a rodovia será implantada, uma vez que uma região que produz grãos (soja, milho, etc.) terá determinados veículos para transportar o material; já uma região industrial terá outra característica de veículo. Deverá também ser avaliado o volume de veículos ou de viagens para justificar o investimento na infraestrutura da rodovia.



Dica

O vídeo sugerido a seguir apresenta informações a respeito de um levantamento Origem/Destino realizado pelo DNIT em parceria com o Exército Brasileiro para pesquisa das informações de tráfego.

ALAIR XAVIER. Plano Nacional de Contagem de Tráfego. 21 nov. 2016.

Sugerimos conhecer a última pesquisa nacional de tráfego realizada em 2017 no site do DNIT, contendo todos os dados da pesquisa volumétrica classificatória. Você poderá selecionar a região ou a rodovia de interesse. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

Pesquisa Nacional de Tráfego 2017. PNCT, 2017.

Assim, você deu o primeiro passo para levantar de forma mais assertiva os problemas de tráfego das cidades e os parâmetros que nortearão os projetos das vias.

Sem medo de errar

Após a apresentação do pré-projeto solicitado anteriormente, é necessário realizar os levantamentos de campo. Você informou o setor responsável pela contagem que os dados importantes para o levantamento são: contagem de veículos, caracterização dos veículos, disponibilização de informações sobre os eixos, etc.

Por se tratar de um projeto de uma nova rodovia, os dados são coletados pela equipe de campo por meio de uma contagem volumétrica e classificatória. Deve-se proceder, portanto, com um levantamento dos tipos de veículos que utilizarão a infraestrutura para que, posteriormente, seja planejado o dimensionamento do pavimento.

Considerando os resultados apresentados na Tabela 1.1, as informações devem ser trabalhadas para obter um panorama geral do tráfego. Por isso, é possível separar os dados por dia da semana e por tipo de veículos, conforme as Tabelas 1.2 e 1.3 e o Gráfico 1.1.

Tabela 1.2 | Análise do volume de veículos por dia da semana

Dia do mês	Dia da semana	A -> B	B -> A	TOTAL
18/11/2007	Sábado	1413	1504	2917
19/11/2007	Domingo	1594	1535	3129
20/11/2017	Segunda-feira	1636	1497	3133
21/11/2017	Terça-feira	1424	1468	2892
22/11/2017	Quarta-feira	1496	1486	2982
23/11/2017	Quinta-feira	1544	1454	2998
24/11/2017	Sexta-feira	1854	1476	3330
Média		1566	1489	3054

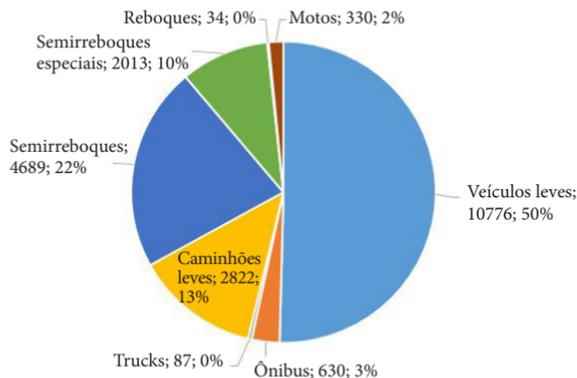
Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 1.3 | Quadro resumo do volume de veículos por tipo

Categoria do veículo	Volume	(%)
Veículos leves	10776	50,40
Ônibus	630	2,95
Trucks	87	0,41
Caminhões leves	2822	13,20
Semirreboques	4689	21,93
Semirreboques especiais	2013	9,41
Reboques	34	0,16
Motos	330	1,54
Total	21381	100

Fonte: elaborada pelo autor.

Gráfico 1.1 | Volume total e percentual por tipo de veículos



Fonte: elaborada pelo autor.

Percebemos, portanto, um VDM de 3.054 veículos para o período estudado e uma contribuição significativa dos veículos do tipo semirreboque (22%), identificando o veículo de projeto para nossa rodovia.

Nesse ponto, o projeto poderia ter continuidade, uma vez que a demanda foi definida e o veículo de projeto foi identificado (para futuramente dimensionar os dispositivos da rodovia). Posteriormente, será realizada a adequação do número de faixas necessárias para a rodovia, a fim de que haja qualidade de transporte, mostrando, mais uma vez, a importância dessa etapa do projeto. Este foi um importante passo no levantamento de dados para a elaboração adequada do projeto rodoviário.

Depois de estudar este conteúdo, você já consegue compreender a importância do levantamento de dados e, nas próximas fases, aprenderá a aplicar esses dados nos projetos de rodovias.

Avançando na prática

Análise de dados para adequações de rodovias já existentes

Descrição da situação-problema

As empresas responsáveis pela manutenção e operação de rodovias realizam a contagem dos veículos com o objetivo de mensurar a atual situação de tráfego da rodovia. Você, como responsável pela coleta e pelo tratamento desses dados, deve buscar informações a respeito de um levantamento existente (com uma rodovia com características similares à rodovia com que você está trabalhando) para extrair dados aproximados do seu tráfego e, posteriormente, solicitar à equipe de campo um levantamento próprio. Esse método de levantamento de dados de rodovias com as mesmas características é uma prática comum quando não se tem possibilidades ou tempo para levantamento de dados próprios; é uma maneira de inferir o comportamento da rodovia em estudo.

Realize uma busca no PNCT (<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/Pnt/2017>) utilizando alguma rodovia federal disponível no banco de dados, com características de uma rodovia de pista dupla. Verifique todas as características da via através do sistema do PNCT, VDM, tipo de veículos e veículo de projeto.

Resolução da situação-problema

Dentro do site do PNCT, você inserirá os dados de busca, conforme a Figura 1.10, podendo filtrar por região ou rodovia, escolher o posto, o dia da contagem e a categoria de veículo.

Figura 1.10 | Busca de pesquisa de tráfego pelo PNCT

Fonte: <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnt/Pnt/2017>. Acesso em: 16 out. 2018.

A análise deverá ser realizada com a contagem do volume de todos os dias da semana, com todas as categorias, e a soma diária resultará na Tabela 1.4.

Tabela 1.4 | Volume de veículos por dia

Dia do mês	Dia da semana	A -> B	B -> A	TOTAL
18/11/2007	Sábado	5094	5636	10730
19/11/2007	Domingo	4296	4392	8688
20/11/2017	Segunda-feira	5467	4978	10445
21/11/2017	Terça-feira	4523	4471	8994
22/11/2017	Quarta-feira	4249	4983	9232
23/11/2017	Quinta-feira	4824	5586	10410
24/11/2017	Sexta-feira	4442	5347	9789
Média		4699	5056	9755

Fonte: elaborada pelo autor.

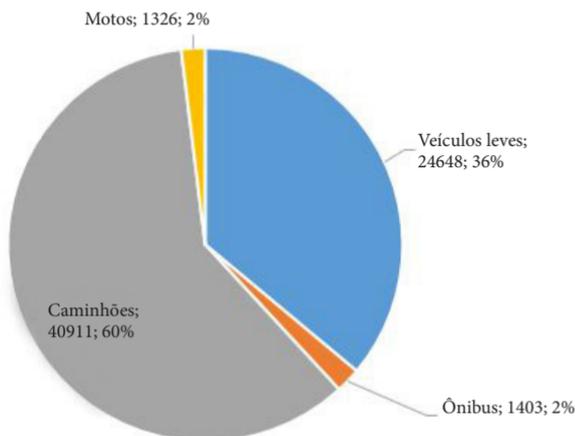
Assim, obtém-se um VDM de 9.755 veículos para o período estudado e, selecionando as categorias na busca e somando as contagens diárias, temos o volume de veículos por tipo, conforme a Tabela 1.5 e o Gráfico 1.2.

Tabela 1.5 | Volume de veículos por tipo

Categoria do veículo	Volume	(%)
Veículos leves	24648	36,09
Ônibus	1403	2,05
Caminhões	40911	59,91
Motos	1326	1,94
Total	68288	100

Fonte: elaborada pelo autor.

Gráfico 1.2 | Volume total e percentual por tipo de veículos



Fonte: elaborado pelo autor.

E podemos verificar uma contribuição significativa dos veículos do tipo caminhão (60%), identificando o veículo de projeto para nossa rodovia. É claro que o uso de Excel auxilia na compilação e na análise dos dados.

Faça valer a pena

1. Há alguns meios de contagem volumétrica de veículos com classificação dos veículos, sendo uma delas o método manual, que exige que a equipe de campo tenha experiência e conhecimento dos tipos de veículos, já que no nosso contexto nacional temos uma quantidade significativa de veículos operando no sistema de transporte rodoviário.

A respeito do método de contagem manual, assinale a alternativa correta.

- a) O método automático tem maior precisão, comparado ao manual.
- b) A contagem volumétrica manual é simples e não exige treinamento da equipe de campo.
- c) As informações coletadas pela equipe de campo são analisadas em tempo real pela equipe de engenharia.
- d) Para levantamentos apenas de dados volumétricos, é possível utilizar um contador analógico.
- e) As quantidades de veículos são suficientes para dimensionamento do pavimento.

2. O veículo de projeto é uma referência para o projeto da rodovia, ou seja, todos os dispositivos que serão projetados para aquela rodovia (rampas, acessos, interseções, etc.) têm, como padrão, o veículo de projeto.

Neste contexto, analise as afirmações abaixo e assinale a alternativa correta.

- a) O veículo de projeto é sempre o mesmo, independentemente da rodovia a ser projetada.
- b) O veículo de projeto deve compor uma parcela do tráfego local, ou seja, através do levantamento volumétrico, é possível identificá-lo.
- c) Não há regras, o projetista deve escolher o veículo de projeto.
- d) Anteriormente ao levantamento de tráfego ou volume de veículos, é necessário estabelecer o veículo de projeto.
- e) A escolha do veículo de projeto é meramente ilustrativa, quanto ao projeto da rodovia.

3. O VMD (volume médio diário) ou VDM (volume diário médio) exprime o volume médio de veículos que passaram em determinado ponto da rodovia.

Assinale a alternativa correta com relação ao VDM.

- a) Sua utilização em projetos se resume ao dimensionamento do pavimento.
- b) Aplica-se o VDM apenas em projetos de rodovias novas, limitando, portanto, sua abrangência e não sendo tão importante para a engenharia de transportes.
- c) O cálculo do VDM deve ser feito para períodos de apenas 1 ano.
- d) É uma média diária, ou seja, a somatória do volume dividido pelos dias em que foram realizadas as contagens, importante para saber a demanda por dia do local.
- e) Não é um fator necessário e importante para projetos de rodovias, uma vez que a construção de uma rodovia não tem relação com o volume de veículos.

Características do tráfego rodoviário

Diálogo aberto

Olá, aluno!

Quando viajamos, é comum nos depararmos com rodovias em condições ruins ou péssimas, não é mesmo? Também é comum encontrarmos rodovias com tráfego pesado, congestionadas, fazendo-nos perder mais tempo do que gostaríamos nos nossos trajetos. Fica claro que, para a economia do nosso país acelerar, muito investimento deverá ser dedicado a esse setor, e o seu papel como engenheiro civil será fundamental.

Após disponibilizados os dados da contagem que resultou em VMDA igual a 3.054 veículos e a distribuição por tipos de eixos apresentada na Tabela 1.6 com os respectivos fatores de carga, o projetista questionou qual será a solicitação à estrutura do pavimento (número de repetições do eixo padrão - N). De acordo com os dados levantados nas situações anteriores, calcule o N com base nos estudos que estabeleceram uma taxa de crescimento exponencial de 1,2% e fator climático regional igual a 1 e apresente a solicitação à qual a estrutura do pavimento estará submetida ao longo da vida útil do pavimento, 20 anos, conforme informado em projeto.

Tabela 1.6 | Veículos, eixos e fator de fator de carga

Eixos simples (tf)	%	FC	Eixos duplos (tf)	%	FC	Eixos triplos (tf)	%	FC
< 5	20		< 7	3	-	< 10	2	
5	3	0,10	7	3	0,14	10	1	0,15
6	4	0,20	9	1	0,40	12	1	0,29
7	5	0,50	10	2	0,60	16	1	0,92
8	5	1,0	11	3	0,90	18	2	1,50
9	6	2,0	12	2	1,50	20	2	2,47
10	2	3,0	14	4	3,00	22	1	4,00
11	1	6,0	15	2	4,20	24	2	6,11
12	1	9,0	16	3	6,00	26	1	9,88
14	1	25	17	4	8,50	28	2	14,82
			18	2	12,00	30	2	20,80
			19	2	17,00	32	1	33,00
			20	1	20,00			
			21	1	28,00			
			22	1	33,00			

Fonte: elaborada pela autora.

Use o conhecimento obtido nas seções anteriores sobre pesquisa de tráfego e aplique no cálculo do número N, que é um dos principais parâmetros necessários para o dimensionamento dos pavimentos. Para garantir a vida útil do pavimento, você precisará entender a demanda de tráfego da via. Ao longo desta seção, reflita sobre a dependência do Brasil no transporte rodoviário e como o excesso de carga danifica e reduz a vida útil das vias. Além disso, compreenda a importância do levantamento de dados para os projetos de rodovias e prepare-se para fazer a diferença.

Não pode faltar

Tipos de eixo dos veículos para tráfego rodoviário

A frota brasileira vem aumentando consideravelmente ao longo dos anos e nosso maior desafio é prever este crescimento com tantas oscilações no cenário econômico nacional. Como vimos na seção anterior, utilizamos séries históricas para obter o volume diário médio anual e a partir dela adotamos uma taxa de crescimento. Tão importante quanto a quantidade de veículos é compreendermos os tipos de veículos, seus pesos e dimensões e quais serão os esforços provocados por eles nos pavimentos.

Uma forma simplificada de classificar os tipos de veículos é agrupá-los em leves, médios, pesados, semirreboque, reboque e ônibus, conforme a Figura 1.11, com a respectiva quantidade de eixos.

Figura 1.11 | Tipos e classificação de veículos

Tipos de Veículos



Fonte: <http://www.der.sp.gov.br/Website/Documentos/ClassificacaoVeiculos.aspx>. Acesso em: 22 nov. 2018.

Segundo o Código de Trânsito Brasileiro (CTB), as dimensões autorizadas para veículos com ou sem carga são:

- Largura máxima: 2,60 m.
- Altura máxima: 4,40 m.
- Comprimento total: 14 m para veículos leves, 18,15 para veículos articulados e 19,80 para veículos com reboques.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006) resume as principais dimensões empregadas em projetos de rodovias, interseções entre outras, apresentadas na Tabela 1.7.

Tabela 1.7 | Principais dimensões básicas dos veículos de projeto

Características	Designação do veículo tipo				
	Veículos leves (VP)	Caminhões e ônibus convencionais (CO)	Caminhões e ônibus longos (O)	Semirreboques (SR)	Reboques (RE)
Largura total	2,1	2,6	2,6	2,6	2,6
Comprimento total	5,8	9,1	12,2	16,8	19,8
Raio mín. da roda externa dianteira	7,3	12,8	12,8	13,7	13,7
Raio mín. da roda interna traseira	4,7	8,7	7,1	6,0	6,9

Fonte: DNIT (2006, p. 47).



Dica

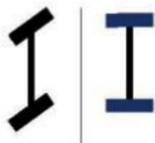
O estudo de tráfego vai ajudá-lo a projetar adequadamente uma via, por isso é importante ficar atento e conhecer os tipos de veículos que transitarão nesta via. Sugerimos ver o vídeo sobre as características de alguns veículos.

MARCELO APPARATUS. Bitrem x rodotrem x pesos x eixos x suspensões x configurações. 10 set. 2012.

Quando analisamos as classes, deparamo-nos com termos que caracterizam os veículos e a forma como as cargas serão aplicadas nas vias. A Figura 1.12 traz algumas ilustrações destes termos.

Figura 1.12 | Configurações usuais

Eixo simples
rodagem singela



Eixo duplo
rodagem singela direcional



Eixo simples
rodagem dupla



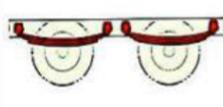
TANDEM

NÃO TANDEM

Tipo Bogie



Tipo Balancim



Existem dois tipos de suspensão: **Bogie**, utilizada em veículos com tração 6X4. **Balancim** utilizada em veículos com tração 6X2. Nos dois modelos, os eixos trabalham em conjunto. Quando passam em alguma depressão, o primeiro eixo desce enquanto que o outro sobe (igual a uma balança) - vantagem de que sempre os pneus estão em contato com o solo.

No modelo "não tandem", os eixos são independentes e a capacidade de pesos para as duas configurações (tandem e não tandem) são diferentes.

Fonte: DNIT (2006, p. 35).



Dica

Os dados utilizados no seu projeto geométrico e de pavimentos deverão estar de acordo com as recomendações do DNIT (2006), para isso, é importante conhecer as diversas classes, representadas por um código alfanumérico, e as características dos veículos de cada classe, principalmente o peso bruto total máximo. O Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006) traz essas informações detalhadas entre as páginas 47 e 55.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

Número de repetições de eixo padrão (N)

O parâmetro de tráfego utilizado no dimensionamento das vias é o número de repetições de eixo padrão (N), já que ao longo de um período (P) a via será solicitada por esforços cíclicos de carregamento e descarregamento em um determinado ponto da superfície de rolamento, provocados pelas rodas dos veículos. O eixo tomado como padrão rodoviário brasileiro é simples de rodas duplas, que transmite um esforço de 8,2 toneladas (80 kN) para o pavimento. Para obter o parâmetro (N), é necessário estimar o volume total de tráfego (V_i):

$V_i = 365 \times V_m \times P$, em que:

P = período de projeto ou vida útil estimada em anos, que varia de 5 a 20 anos, mas usualmente adota-se 10 anos.

V_m = volume diário médio de veículos no sentido (faixa) mais solicitado no ano médio P .

$$V_m = \frac{V_i + V_p}{2}, \text{ em que:}$$

V_i = volume de tráfego no início do período P e expresso por $V_i = \frac{VMDA}{n^\circ \text{ de faixas}}$, em que $VMDA$ é o volume médio diário anual.

V_p = volume de tráfego ao final do período P , que depende da taxa de crescimento que pode ser linear ou exponencial, conforme as expressões abaixo:

Linear: $V_p = V_i(1 + P \times t)$

Exponencial: $V_p = V_i(1 + t)^P$



Assimile

A determinação do tráfego futuro auxilia na análise de viabilidade econômica do investimento e fornece dados para o dimensionamento do projeto, garantindo um serviço aceitável ao longo da vida útil prevista (P). A projeção deve-se basear na natureza da demanda, nas variáveis socioeconômicas e nos modelos de projeção (DNIT, 2006).

O parâmetro N é obtido por:

$$N = V_i \times FV \times FR, \text{ em que:}$$

FV = fator de veículo.

FR = fator climático regional, que considera o regime de chuvas locais, sendo igual a 0,7 para altura média de chuva até 800 mm, 1,4 para altura média de chuva de 800 a 1.500 mm e 1,8 para mais de 1.500 mm.

O fator de veículo é o produto do fator de eixo (FE) pelo fator de equivalência de carga (FC) para converter todos os tipos de veículos em eixos padrão, exceto veículos leves, conforme as Tabelas 1.8 e 1.9. O FE, por sua vez, é a somatória do número de eixos do veículo vezes a porcentagem de determinado tipo de veículo em relação ao total.

Tabela 1.8 | Fator de equivalência de carga para eixos simples

Carga/Eixo (tf)	Fator de equivalência
1	0,0004
2	0,004
3	0,02
4	0,05
5	0,1
6	0,2
7	0,5
8	1
9	2
10	3
11	6
12	9
13	15
14	25
15	40
16	50
17	80
18	110
19	200
20	260

Fonte: adaptada de Moura (2018, p. 3).

Tabela 1.9 | Fator de equivalência de carga para eixos triplos em “tandem”

Carga/Eixo (tf)	Fator de equivalência
6	0,04
8	0,08
10	0,15
12	0,29
14	0,58
16	0,92
18	1,50
20	2,47
22	4,00
24	6,11
26	9,88
28	14,82
30	20,80
32	33,00

Carga/Eixo (tf)	Fator de equivalência
34	46,80
36	70,00
38	80,00
40	130,00

Fonte: adaptada de Souza (1981, p. 19).



Exemplificando

Você está estudando a via que dá acesso a grandes fábricas, cujo projeto de um trecho específico prevê pista simples, com um volume diário médio anual de 534 veículos nos dois sentidos, uma distribuição de veículos comerciais de 50% para cada sentido e período de projeto de 10 anos. A via pertence a uma região que, segundo dados econômicos, apresenta uma taxa de crescimento anual de tráfego linear de 2,5% e tem distribuição de veículos, conforme a Tabela 1.10, elaborada de acordo com a última pesquisa de tráfego realizada.

Tabela 1.10 | Volume de veículos por tipo na via

Veículos	Tipo de eixo	Carga por eixo (tf)	Volume	(%)
Autos	Simplex rodagem singela	6	310	58
Ônibus	Simplex roda dupla	8	123	23
Caminhão	Tandem triplo	12	101	19

Fonte: adaptada de Souza (1981, p. 19).

Para calcular o N, primeiro calcularemos o volume total de veículos:

$$V_1 = \frac{VMDA}{n^\circ \text{ de faixas}} = \frac{534}{2} = 267 \text{ veículos}$$

Como o crescimento é linear,

$$V_p = V_1(1 + P \cdot t) = 267(1 + 10 \cdot 0,025) = 333,75 \text{ veículos}$$

$$V_m = \frac{V_1 + V_p}{2} = \frac{267 + 333,75}{2} = 300,37 \text{ veículos}$$

$$V_t = 365 \times V_m \times P = 365 \times 300,37 \times 10 = 1096350,5 \text{ veículos}$$

Para calcular o N, temos que obter o FV e o FR:

$$FE = (2 \times 0,58) + (2 \times 0,23) + (4 \times 0,19) = 2,38$$

Com o auxílio das tabelas

$$FC = 0,58 \times 0,2 + 0,23 \times 1,0 + 0,19 \times 0,29 = 0,40$$

Assim, $FV = 2,38 \times 0,40 = 0,95$

$$N = V_i \times FV \times FR = 1096350,5 \times 0,95 \times 1 = 1041532,97 = 1,04 \times 10^6$$

Solicitações à infraestrutura dos pavimentos rodoviários

O Brasil é dependente do transporte rodoviário, e a frota cresce de forma significativa com o passar dos anos. Neste contexto, o controle do excesso de carga passa a ter uma grande importância por ser responsável pelo desgaste dos pavimentos em um sistema precário de conservação. Você está vendo que a previsão das cargas que atuarão é fundamental para a elaboração dos projetos de construção e manutenção dos pavimentos.

A intensidade do tráfego influencia diretamente a durabilidade e a qualidade do pavimento, evitando a formação de patologias como trincas, deformações e desagregações, seguidas de perda de material. Entretanto, a análise das cargas é complexa, pois temos diversos carregamentos relativos aos tipos de veículos e suas configurações de eixos, rodas, velocidades variáveis e cargas transportadas (KLAMT *et al.*, 2017).

O excesso de carga reduz a vida útil do projeto, demandando mais investimentos em manutenção e reduzindo a segurança das vias, além de aumentar as emissões que geram danos ambientais. A fiscalização das cargas transportadas é realizada em diversos pontos do país, divididos em todas as regiões, sendo que para o controle são utilizados os limites máximos de peso bruto transmitido por eixo de veículo nas superfícies das vias públicas, de acordo com a Resolução 012/98 do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN):

- Eixo simples de roda simples (ESRS): 6 t.
- Eixo simples de roda dupla (ESRD): 10 t.
- Eixo tandem duplo (ETD): 17 t.
- Eixo tandem triplo (ETT) 25,3 t.



Refleta

A fiscalização e o controle do excesso de peso nos veículos de carga ocorrem em parte das rodovias brasileiras. Imagine o impacto do excesso de carga na capacidade de frenagem, na estabilidade do veículo, nos danos ao pavimento e nos danos às pontes e ao próprio veículo. Qual é a importância do controle de excesso de carga nas rodovias? Qual é a contribuição dos efeitos do excesso de carga na estatística preocupante dos acidentes nas rodovias brasileiras?

Estadística das rodovias brasileiras

Aluno, é importante você ter a compreensão da abrangência dos modais no nosso país, pois a necessidade de expansão, modernização e manutenção é enorme. O planejamento dos investimentos em infraestruturas de transporte é fundamental para garantirmos a eficiência dos transportes de cargas e passageiros, bem como a agilidade no escoamento da produção agrícola e industrial.

A Confederação Nacional de Transportes emite boletins estatísticos mensais com informações, como a participação de veículos na frota (Tabela 1.11), a extensão da malha rodoviária (Tabela 1.12) e a movimentação anual de cargas e passageiros (Tabela 1.13) que destaca a dependência do país do transporte rodoviário.

Tabela 1.11 | Participação de veículos na frota brasileira em agosto de 2018

Tipo de veículo	Frota de veículos
Caminhão	2.748.700
Cavalo mecânico	641.963
Reboque	1.571.816
Semirreboque	945.621
Ônibus	214.376

Fonte: CNT (2018, [s.p.]).

Tabela 1.12 | Malha rodoviária – extensão em km

	Pavimentada	Não pavimentada	Total
Federal	65.615	10.839	76.454
Rodovias estaduais, transitórias, estaduais e municipais	147.836	1.339.100	1486.938
Rede planejada	-	-	157.309
Total	213.453	1.349.939	1.720.700

Fonte: CNT (2018, [s.p.]).

Tabela 1.13 | Movimentação anual – cargas e passageiros

Modal	Milhões (TKU)	Participação (%)
Rodoviário	485.625	61,1
Ferrovário	164.809	20,7
Aquaviário	108.000	13,6

Dutoviário	33.300	4,2
Aéreo	3.169	0,4
Total	794.903	100

Fonte: CNT (2018, [s.p.]).



Dica

A maior parte do transporte de passageiros e de carga no Brasil é feita pelas vias rodoviárias, mas a falta de infraestrutura adequada compromete os valores das passagens e dos produtos. Você, como engenheiro civil, poderá ajudar a reverter este cenário, pesquisando e atualizando as técnicas de projeto e de execução das rodovias. As referências sugeridas a seguir mostram o panorama nacional:

CNT - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Técnicas para construir rodovias no Brasil estão defasadas em 40 anos.** 25 ago. 2017. AGÊNCIA CNT de Notícias. **Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** CNT - Confederação Nacional Do Transporte, 24 ago. 2017.

Nessa seção, além do cálculo do número N, tão importante para o dimensionamento dos pavimentos, você aprendeu sobre os impactos do excesso de carga e como ela poderá influenciar a redução da vida útil das vias.

Sem medo de errar

Continuando com a obtenção de parâmetros de projeto, você obteve um VMDA igual a 3.054 veículos, então deverá calcular solicitação à estrutura do pavimento (número de repetições do eixo padrão - N), sabendo que a taxa de crescimento é exponencial e corresponde a 1,2% e o período (P) previsto em projeto é de 20 anos.

Para calcular o N, primeiro calcularemos o volume total de veículos:

$$V_1 = \frac{VMDA}{n^{\circ} \text{ de faixas}} = \frac{3054}{2} = 1527 \text{ veículos}$$

Como o crescimento é exponencial,

$$V_p = V_1(1+t)^p = 1527(1+0,012)^{20} = 1938,4 \text{ veículos}$$

$$V_m = \frac{V_1 + V_p}{2} = \frac{1527 + 1938,4}{2} = 1732,7 \text{ veículos}$$

$$V_t = 365 \times V_m \times P = 365 \times 1732,7 \times 20 = 12648710 \text{ veículos}$$

Para calcular o N, temos que obter o FV que depende do FE e do FC, que podemos calcular com o auxílio da Tabela 1.14.

Tabela 1.14 | Cálculo do FC e FE

Eixos simples (t)			Eixos duplos (t)			Eixos triplos (t)					
	%	FC		%	FC		%	FC			
< 5	20		< 7	3	-	< 10	2				
5	3	0,1	0,3	7	3	0,1	0,4	10	1	0,2	0,2
6	4	0,2	0,8	9	1	0,4	0,4	12	1	0,3	0,3
7	5	0,5	2,5	10	2	0,6	1,2	16	1	0,9	0,9
8	5	1,0	5,0	11	3	0,9	2,7	18	2	1,5	3,0
9	6	2,0	12,0	12	2	1,5	3,0	20	2	2,5	4,9
10	2	3,0	6,0	14	4	3,0	12,0	22	1	4,0	4,0
11	1	6,0	6,0	15	2	4,2	8,4	24	2	6,1	12,2
12	1	9,0	9,0	16	3	6,0	18,0	26	1	9,9	9,9
14	1	25,0	25,0	17	4	8,5	34,0	28	2	14,8	29,6
				18	2	12,0	24,0	30	2	20,8	41,6
				19	2	17,0	34,0	32	1	33,0	33,0
				20	1	20,0	20,0				
				21	1	28,0	28,0				
				22	1	33,0	33,0				
Σ	48,0		66,6		34,0		219,1		18,0		139,6
											FC = 4,3

Fonte: elaborada pela autora.

$$FE = (2 \times 0,48) + (2 \times 0,34) + (4 \times 0,18) = 2,36$$

$$FC = \frac{66,6 + 219,1 + 139,6}{100} = 4,25$$

$$\text{Assim, } FV = 2,36 \times 4,25 = 10,03$$

$$N = V_t \times FV \times FR = 12648,7 \times 10,03 \times 1 = 126866561,3 = 1,3 \times 10^8$$

O valor do N obtido é o número de repetições dos eixos dos veículos, equivalentes às solicitações do eixo padrão de 8,2 tf durante os 20 anos previstos para o projeto e será utilizado no dimensionamento do pavimento. Bom trabalho!

A importância dos dados de tráfego

Descrição da situação-problema

Grande parte das obras de pavimentação é pública, e você, em uma situação profissional como especialista, é proprietário de uma empresa projetista e está participando de uma licitação para a elaboração do projeto de uma rodovia vicinal da sua cidade. Há uma lista extensa de documentos de habilitação que você deverá entregar, bem como uma proposta comercial e uma técnica justificando os itens previstos na planilha de composição de preços unitários. Elabore o trecho da proposta técnica que busca destacar a importância da pesquisa de tráfego e do estudo socioeconômico.

Resolução da situação-problema

Para a elaboração de um projeto rodoviário, precisamos entender as características básicas do tráfego obtendo dados, como o volume e o tipo de veículos que embasam a previsão das solicitações que serão exercidas na rodovia, tendo como parâmetros objeto do estudo o VMDA (volume médio diário anual), o volume por tipo de veículo (número de eixos e peso por eixo), entre outros. Porém, a previsão do carregamento dependerá também da projeção do crescimento do tráfego que relaciona características sociais e tendências econômicas da região, expressos em taxa de crescimento linear ou exponencial (t).

Os dados citados acima embasam o cálculo do valor N que representa o número de repetições dos eixos dos veículos, equivalentes às solicitações do eixo padrão de 8,2 tf durante os 20 anos previstos para o projeto e que será utilizado no dimensionamento do pavimento.

Faça valer a pena

1. Nosso Código de Trânsito Brasileiro (CTB) determina as dimensões autorizadas para veículos com ou sem carga circularem pelo sistema viário. O DNIT (2006), aplicando as regras do CTB, resumiu as principais dimensões básicas dos veículos de projeto utilizados para dimensionamento de rodovias.

Analise os quadros a seguir para comparar os tipos de veículos com as dimensões básicas dos veículos de projetos.

Quadro 1 | Dimensões dos veículos (m)

Dimensões	Largura total	Comprimento total
A	2,1	5,8
B	2,6	9,1
C	2,6	12,2
D	2,6	16,8
E	2,6	19,8

Fonte: elaborados pela autora.

Quadro 2 | Tipos de veículos de projeto

Veículo	Tipos de Veículo
I	Reboque
II	Veículos Leves
III	Semirreboque
IV	Caminhão e ônibus longos
V	Caminhão e ônibus convencionais

Assinale a alternativa que relaciona corretamente os itens do Quadro 1 com os tipos de veículos do quadro 2:

- a) A – I; B – II; C – III, D– IV; E– V.
- b) A – II; B – V; C – IV, D– III; E– I.
- c) A – III; B – II; C – I, D– IV; E– V.
- d) A – V; B – II; C – III, D– I; E– IV.
- e) A – I; B – II; C – V, D– IV; E– IV.

2. Em um projeto de dimensionamento de rodovias, é necessário analisar diversos parâmetros relacionados aos esforços de carregamento e descarregamento aos quais o pavimento será submetido, devido à circulação dos veículos. Neste contexto, analise se as frases a seguir são verdadeiras (V) ou falsas (F).

- () O parâmetro de tráfego utilizado no dimensionamento das vias é o número de repetições de eixo padrão (N).
- () O parâmetro (P) se refere ao período em que a via será solicitada por esforços cíclicos de carregamento e descarregamento em um determinado ponto da superfície de rolamento, provocados pelas rodas dos veículos.
- () O eixo tomado como padrão rodoviário brasileiro é simples de rodas duplas e transmite um esforço de 18,2 toneladas para o pavimento.
- () Para obter o parâmetro (N), é necessário estimar o volume total de tráfego, que multiplica o volume médio diário pelo período (P) e por 365 dias.
- () O fator climático regional considera o regime de chuvas nacional, sendo igual a 0,7 para altura média de chuva até 800 mm, 1,4 para altura média de chuva de 800 a 1.500 mm e 1,8 para mais de 1.500 mm.

Assinale a alternativa correta:

- a) V - V - F - V - F.
- b) F - V - F - V - F.
- c) V - F - F - V - F.
- d) V - V - V - V - F.
- e) V - V - F - F - F.

3. Você está iniciando o projeto de uma estrada com um volume diário médio anual de 180 veículos, com uma taxa de crescimento anual em progressão exponencial de 1,3%, fator climático regional igual 1 e fator de veículo de 1,6. Calcule o N (número de repetições do eixo padrão) para o período de 10 anos.

Assinale a alternativa correta, com o N calculado:

- a) $7,2 \times 10^5$
- b) $7,2 \times 10^6$
- c) $5,6 \times 10^5$
- d) $3,3 \times 10^5$
- e) $3,3 \times 10^6$

- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- COELHO, A. H.; GOLDNER, L. G. **ECV5129 – Engenharia de Tráfego**: Módulo I - conceitos básicos. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico - Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2016. Disponível em: http://pet.ecv.ufsc.br/wordpress/wp-content/uploads/2016/03/apostila_eng_trafego_m1.pdf. Acesso em: 23 nov. 2018.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Boletim estatístico**. [S.l.], ago. 2018. Disponível em: <http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO%202018/Boletim%20Estati%CC%81stico%20-%202008%20-%202018.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2018.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO - CONTRAN. **Resolução nº 012/98 de 12/02/1998**. Estabeleceu os limites de peso e dimensões para veículos que transitam por vias terrestres. Brasília, 1998a. 4p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Estudos de Tráfego – IPR - 723**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em: 23 nov. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Quadro de Fabricantes de Veículos. Brasília, 2008**. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/sis_sgpv/QFV/QFV%202008%20Divulga%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 23 nov. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **PNCT**: Plano Nacional de Contagem de Tráfego. Dados do Plano Nacional de Contagem de Tráfego. 2018. Disponível em <http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct>. Acesso em: 23 nov. 2018.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER-SP. **Volume Diário Médio das Rodovias (VDM)**. 2018. Disponível em: <http://www.der.sp.gov.br/Website/MalhaRodoviaria/VolumeDiario.aspx>. Acesso em: 23 nov. 2018.
- DIARIO DE CANOAS. DNIT estuda fazer duplicação da BR-116 entre Dois Irmãos e divisa com SC. **Diário de Canoas**, 24 fev. 2016. Disponível em: https://www.diariodecanoas.com.br/_conteudo/2016/02/noticias/regiao/282883-dnit-estuda-fazer-duplicacao-da-br-116-entre-dois-irmaos-e-divisa-com-sc.html. Acesso em: 23 nov. 2018.
- KAWAMOTO, E. **Análise de sistemas de transportes**. São Carlos: EESC/USP, 2012.
- KLAMT, R. A. *et al.* Influência da sobrecarga nos pavimentos e a importância da fiscalização de pesagem veicular nas rodovias brasileiras. **Revista CIATEC – UPF**, v. 9, n. 2, p. 52-65, 2017. Disponível em: <http://seer.upf.br/index.php/ciatec/article/download/7569/4543>. Acesso em: 23 nov. 2018.
- MOURA, E. **Composição do tráfego para finalidade de projeto estrutural**. FATEC – Faculdade de tecnologia de São Paulo. Departamento de Transportes e Obras de Terra. São Paulo, [s.d.]. Disponível em: http://professoredmoura.com.br/download/numero_N.pdf. Acesso em: 23 nov. 2018.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação Asfáltica - Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos**. LTC, 07/2015. [Minha Biblioteca]. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2916-0/cfi/6/21/4/2/2@0:0>. Acesso em: 10 out 2018.

SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3. ed. Rio de Janeiro: IPR - DNER, 1981. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/667_metodo_de_projeto_de_pavimentos_flexiveis.pdf. Acesso em: 23 nov. 2018.

Unidade 2

Pavimentação

Convite ao estudo

O semestre está apenas começando, mas quem não pensa em como vai aproveitar as próximas férias? Descansar, relaxar, renovar as energias para continuar os estudos, entre outras coisas. São muitas opções para escolher, ficar em casa, sair com os amigos, viajar. Uma das formas mais gostosas de curtir as férias é conhecer novos lugares, novas culturas, novas pessoas e novas estradas, que, em sempre, são novas.

Muitas vezes, no meio do caminho nos deparamos com uma estrada de paisagem belíssima, mas com um pavimento de péssima qualidade.

Prevalece, então, o nosso olhar de engenheiro e algumas reflexões são levantadas: por que isso acontece? Por que o pavimento está com problemas? Como resolver? Como evitar que os defeitos apareçam? Será que foi selecionado o tipo de pavimento mais adequado? Os materiais atendem às especificações? Foi executado da forma correta? Como escolher o tipo de pavimento? Quais os fatores ou parâmetros que devem ser considerados nessa seleção? O tráfego? A topografia? O clima? O que proporciona maior resistência, maior conforto, maior economia, menor custo de manutenção? Por que a maioria dos pavimentos tem asfalto na sua camada de revestimento? E por que não uma camada de concreto? Quais os materiais mais adequados para cada camada? Como determinar a quantidade de cada material em uma mistura de materiais?

São perguntas que não têm resposta pronta, não existe uma fórmula, tudo depende de um estudo, de uma análise, de um projeto, de um engenheiro civil. Será que um engenheiro civil foi responsável pelo projeto desse pavimento?

Aluno, suponha que você é o engenheiro civil responsável pela área de infraestrutura de transportes de uma concessionária de rodovias. Todos os dias chegam até você demandas de manutenção e, eventualmente, obras especiais. Além de estar atento às necessidades dos usuários e de acompanhar as demandas de tráfego que dependem de inúmeros fatores, você precisa dominar as definições e os conceitos sobre pavimentos para desenvolver projetos que atendam às especificações técnicas. Deve ter, ainda, conhecimento técnico suficiente para tomar decisão sobre que tipo de pavimento adotar para cada obra/trecho, assim como os materiais mais adequados

para diferentes estruturas de pavimento. Além disso, é importante estudar e analisar diferentes tipos de materiais e misturas que podem ser aplicados nos revestimentos asfálticos.

Portanto, nesta unidade, vamos estudar as generalidades sobre pavimentos rodoviários, os tipos de pavimentos e de revestimentos asfálticos, as características de cada tipo de mistura asfáltica, assim como os materiais empregados na sua produção, incluindo métodos de avaliação, caracterização e dosagem dos materiais e das misturas asfálticas.

Após aprender os conteúdos abordados, você deverá selecionar o tipo de pavimento e os materiais para a sua estrutura, assim como realizar dosagens desses materiais e de misturas asfálticas para aplicação em revestimentos de pavimentos rodoviários.

Bons estudos!

Generalidades sobre pavimentos

Diálogo aberto

No Brasil, a maioria dos deslocamentos de transporte é realizada por rodovias, mas nem todas estão em boas condições atualmente. Com frequência, encontramos rodovias com pavimentos em situações precárias. Para aprender a evitar ou propor soluções para esses tipos de problemas, é importante conhecer os conceitos sobre revestimentos asfálticos e suas características, assim como os materiais empregados em sua fabricação. A partir disso, será possível descrever os materiais aplicados em misturas asfálticas e os tipos de revestimentos asfálticos, além de dosar uma mistura asfáltica para aplicação em pavimento rodoviário.

A concessionária em que você trabalha faz parte de uma empresa de concessão de infraestrutura de transportes. Todos os dias surgem necessidades de avaliar as condições do pavimento em algumas rodovias. O presidente da empresa vai promover um engenheiro civil como gerente da nova concessionária que deve ser aberta no próximo ano.

Para selecionar o engenheiro, o presidente resolveu lançar um desafio entre os engenheiros das diversas concessionárias do grupo na forma de projeto, aproveitando que a empresa acabou de vencer a licitação do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo, DER-SP, para desenvolvimento de projeto executivo de pavimento da SP-2018.

As informações fornecidas no Edital de Licitação são muito simples, contendo apenas a localização e a extensão do trecho, não sendo suficientes e adequadas para tomada de decisão sobre as características do projeto.

Você, engenheiro responsável pelo desenvolvimento do projeto executivo do pavimento, identificou a necessidade de realizar a coleta de informações do local onde será executada a obra. Para isso, montou uma equipe que irá executar as pesquisas de campo.

Inicialmente, você irá elaborar um formulário para que os pesquisadores possam coletar as informações. Esse formulário deve responder às seguintes questões:

- Quais são as informações necessárias do local em que será realizada a obra?
- Como realizar a coleta de dados?

- Quais os materiais disponíveis na região e que podem ser empregados no pavimento?
- Como avaliar as características desses materiais?
- Quais ensaios são necessários para caracterizar e avaliar os materiais?
- Como analisar os resultados dos ensaios?

Os resultados da pesquisa de campo devem ser apresentados em forma de relatório técnico.

Preparado para esse novo desafio? Vamos lá, você tem bastante conteúdo para aprender.

Não pode faltar

Histórico da Pavimentação

As primeiras estradas surgiram na mesma época dos primeiros aglomerados humanos. Os homens, naquela época, escolhiam os caminhos mais curtos e mais seguros para chegar a seus locais de pesca ou caça, estabelecendo trilhas, formadas por pontes de troncos caídos. Com o uso de animais para o transporte das cargas, as trilhas foram alargadas e, com isso, o pavimento das primeiras estradas feitas em regiões montanhosas e de floresta densa foi constituído por troncos e galhos sobre terreno brejoso (COELHO, 1991 apud ODA, 2003).

O grande avanço aconteceu com a invenção da roda na Mesopotâmia, 3000 a.C. Inicialmente sólida, pesada e rudimentar, a roda foi instalada em carros puxados por animais de grande porte, o que proporcionou um importante impulso ao transporte terrestre, gerando a necessidade de melhores caminhos. A possibilidade de transportar maior quantidade de carga usando veículos com rodas gerou uma necessidade de melhorias no leito dos caminhos, das pontes e do traçado, além de ter que evitar a passagem por brejos e atoleiros (NASSOUR, 2003).

Os romanos surgiram como os grandes construtores de estrada da Antiguidade, mostrando o poder do seu Império a partir da construção de uma extensa rede de estradas na Europa e África, com mais de 100.000 km, das quais 14.000 km se localizam na atual Itália. A mais famosa das estradas construída pelos romanos é a Via Appia, de aproximadamente 90 km.

O traçado das estradas romanas eram o mais reto possível, ignorando os obstáculos naturais. Isso fez com que fosse necessário construir inúmeras obras de arte, fazendo com que os romanos ficassem conhecidos pelas suas

pontes. Ao longo das estradas, em intervalos de 10 a 15 km, havia estalagens, onde eram mantidos até 40 cavalos, e que eram usadas pelos mensageiros militares como ponto de troca (COELHO, 1991 apud ODA, 2003).

A queda do Império Romano e o surgimento do Feudalismo fizeram com que as estradas perdessem a sua importância. Somente na segunda metade do século XVIII teve início um novo período de construção de estradas na Europa, em que foram melhoradas as condições de rolamento para o tráfego de veículos mais pesados, a partir do aumento da rigidez da superfície. No início, as técnicas de construção eram similares a dos romanos. No entanto, com a escassez de materiais e de mão de obra, tornou-se fundamental o desenvolvimento de novas técnicas de construção de pavimentos (COELHO, 1991 apud ODA, 2003).

Nessa época, alguns métodos importantes foram desenvolvidos e receberam o nome de seus inventores. O sistema desenvolvido por John Loudon McAdam consistia em construir uma camada de 25 cm de pedra britada compactada com rolos pesados sobre o terreno natural, sem nenhum tipo de material aglutinante. Esse método recebeu o nome de macadame, foi o primeiro a relacionar a capacidade de suporte do material com a durabilidade do pavimento (COELHO, 1991) e foi adotado por grande parte dos países da Europa, sendo utilizado até os dias atuais.

Enquanto o tráfego de automóveis não era muito grande, as estradas eram compartilhadas pelos veículos motorizados e os de tração animal. No entanto, no período anterior à Primeira Guerra Mundial, ocorreu um aumento no volume de automóveis, deixando claro que veículos de tração animal não poderiam trafegar na mesma estrada em que os automóveis, fazendo com que fossem construídas as primeiras rodovias de concepção atual (COELHO, 1991 apud ODA, 2003).

No Brasil, a primeira estrada que se tem notícia foi construída em 1560, conhecida como Caminho do Mar, era o acesso entre as cidades de São Vicente e Piratininga, que, em 1661, passou a ser conhecida como Estrada do Mar. Em seguida será apresentado um resumo histórico da construção de pavimentos no Brasil:

- 1726 – Construção do Caminho do Ouro, também chamada Estrada Real (Estrada Velha de Paraty), ligando Minas ao Rio de Janeiro;
- 1792 – Construção da Calçada de Lorena, ligando São Paulo a Santos, consistia no calçamento com laje de pedra;
- 1865 - Construção da estrada de rodagem União e Indústria (144 km) ligando Petrópolis a Juiz de Fora, foi a primeira estrada a usar

macadame como base no Brasil. Nessa época era comum o uso de pedras importadas de Portugal no revestimento de ruas;

- 1906 - Construção do primeiro revestimento na cidade do Rio de Janeiro utilizando asfalto natural;
- 1913 - Construção da Rodovia Santos - São Paulo;
- 1922 - Construção da Estrada Rio - Petrópolis com pavimento de concreto;
- 1937 - Criação do DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
- 1950 - Execução do pavimento da Rodovia Presidente Dutra, ligando Rio de Janeiro a São Paulo.
- 1964 - Construção da Ponte Rio - Niterói;
- 1996 - Início do Programa de Concessões Rodoviárias.

Atualmente, a malha rodoviária brasileira é composta por 1.720.700,3 km de estradas e rodovias, sendo 213.452,8 km de rodovias são pavimentadas (12,4%) e 1.507.499,4 km de rodovias não pavimentadas (87,7%) (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES - CNT, 2018).

Definição e Conceitos Básicos de Pavimentação

Tecnicamente, o pavimento é uma estrutura composta por camadas construída sobre uma fundação (terreno natural) denominada de subleito, que recebe em sua superfície solicitações do tráfego de veículos com rodas flexíveis (pneus) (YODER & WITCZAK, 1975).

As principais funções dos pavimentos são:

- Resistir aos esforços verticais provenientes do tráfego e distribuí-los para camadas subjacentes.
- Resistir aos esforços horizontais (desgaste), a partir de uma superfície de rolamento mais durável.
- Melhorar as condições de rolamento quanto ao conforto e segurança.
- Resistir às ações das intempéries.

Segundo Yoder e Witczak (1975), pavimentos são divididos em duas categorias:

- **Pavimento rígido:** constituído por placa de concreto de cimento Portland (que tem a função de revestimento e base), podendo ter

uma camada de sub-base entre a placa e o subleito.

- **Pavimento flexível:** constituído de uma camada de rolamento (revestimento asfáltico) de pequena espessura, aplicada sobre camadas de base e de sub-base que são construídas sobre camada de reforço do subleito ou diretamente sobre o subleito compactado.

A principal diferença entre os dois tipos de pavimentos está na forma como ocorre a distribuição das cargas para o subleito (BALBO, 2007).

- **Pavimento rígido:** tende a distribuir a carga sobre uma área relativamente maior do subleito, devido ao elevado módulo de elasticidade do concreto, sendo que a própria placa de concreto fornece a maior parte da capacidade estrutural.
- **Pavimento flexível:** distribui cargas para uma área menor do subleito, apesar de apresentar um maior número de camadas.

No Brasil, a maioria dos pavimentos é do tipo flexível (mais de 95%), composto por revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Somente em alguns casos (locais com tráfego pesado, corredores de ônibus, pistas de aeroportos, etc.) são executados pavimentos rígidos.

No pavimento flexível, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito podem ser compostas por materiais granulares (solos, britas, etc.) puros ou com aditivos (cimento, cal, etc.). Já o revestimento asfáltico é constituído por uma mistura de agregados (graúdos, miúdos e de enchimento) e ligante, denominada de mistura asfáltica. O ligante pode ser um asfalto puro ou um asfalto modificado e suas principais funções são: colar as partículas minerais e agir como um agente impermeabilizante da mistura. Vale ressaltar que todos os materiais devem atender às especificações técnicas correspondentes aos tipos de serviços ou camadas a que se destinam.

O tipo de pavimento, a quantidade de camadas e suas espessuras variam com a qualidade do subleito, com o tráfego que irá solicitar o pavimento e as características dos materiais que irão compor a sua estrutura, sendo que as camadas mais próximas da superfície devem apresentar melhores características (maior resistência) e, conseqüentemente, poderão apresentar custos mais elevados.

A camada mais importante da estrutura do pavimento é a base, sobre ela deve ser executado o revestimento ou camada de rolamento, que tem como função suportar os efeitos destrutivos do tráfego e das intempéries. Abaixo da base pode ser colocada uma sub-base e/ou um reforço do subleito (BALBO, 2007).

O subleito, que é a fundação do pavimento, geralmente, é formado por solo do terreno natural, sendo essencial determinar as características (tipo de solo, granulometria, resistência, etc.) desse material. Além do tráfego que irá solicitar o pavimento, um dos parâmetros importantes na definição da estrutura do pavimento é a capacidade de suporte do subleito e dos materiais disponíveis para construção das camadas, determinada a partir do ensaio de ISC (índice de suporte Califórnia), mais conhecido como CBR (Califórnia Bearing Rating).

Agregados para Pavimentação

Segundo o DNIT (2006), os agregados para pavimentação podem ser classificados em função da sua natureza, do tamanho das partículas e da distribuição dos grãos.

Em função da sua natureza, os agregados podem ser classificados como **naturais** ou **artificiais**. Os agregados **naturais** são aqueles encontrados em depósitos naturais superficiais e que são submetidos, no máximo, ao processo de lavagem e/ou peneiramento. Os agregados **naturais** mais comuns são os pedregulhos rolados (de cava ou de rio), as lateritas e as areias. Já os chamados **artificiais** são obtidos a partir do processo de britagem da rocha (basalto, granito, etc.), de reciclagem ou, ainda, resíduos especiais, como as escórias de alto forno ou de aciaria.

Em relação ao tamanho das partículas de agregados são classificados, segundo DNIT (2006), em:

- **Agregado graúdo:** é o material retido na peneira nº10 (2,0 mm), como as britas, cascalhos, etc.
- **Agregado miúdo:** é o material que passa na peneira nº10 (2,0 mm) e fica retido na peneira nº200 (0,075 mm), como o pó de pedra, areia, etc.
- **Material de enchimento ou filer:** é o que passa pelo menos 65% na peneira nº200 (0,075 mm), como a cal, cimento Portland, etc.

Em relação à distribuição dos grãos, podem ser classificados, segundo DNIT (2006), como:

- **Gradação densa:** apresenta uma curva granulométrica bem graduada e contínua, com quantidade de material fino suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

- **Gradação aberta:** apresenta uma curva granulométrica bem graduada e contínua, com pequena quantidade (insuficiente) de material fino para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- **Gradação uniforme:** apresenta uma curva granulométrica composta por partículas de um único tamanho.
- **Gradação descontínua:** apresenta uma curva granulométrica com uma grande quantidade de agregados graúdos (mais de 70%), ausência de uma ou mais frações, com quantidade de material fino suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.

Além de classificar os agregados em função da natureza, do tamanho e da distribuição dos grãos, para selecionar os agregados para uso em camadas do pavimento, é essencial analisar as suas principais características (DNIT, 2006):

- **Granulometria** - ME 080 (DNER, 1994a) e ME 083 (DNER, 1998b): representada pela curva granulométrica, é uma das características que assegura estabilidade, em função do maior atrito interno obtido pelo intertravamento das partículas sólidas do solo; além de influenciar o teor de vazios da mistura compactada, a sua trabalhabilidade, a tendência de segregação e a compactação da camada.
- **Forma** - ME 086 (DNER, 1994b): o formato cúbico dos agregados é considerado o ideal, pois leva a um maior entrosamento entre as partículas, produzindo melhor intertravamento (maior resistência ao cisalhamento).
- **Resistência ao choque** - ME 399 (DNER, 1999) e ao desgaste - ME 383 (DNER, 1998c): os agregados devem ser duros e resistentes e devem resistir ao impacto e ao desgaste devido ao atrito entre as partículas.
- **Durabilidade** - ME 089 (DNER, 1994c): deve apresentar resistência à deterioração ou desintegração pela ação do tempo ou do tráfego.
- **Pureza:** as partículas de agregado graúdo e fino devem estar limpas, sem argila ou outro material expansivo, evitando-se, também, o emprego do material fino ou pó mineral que contenha argila.
- **Adesividade a produtos asfálticos** - NBR 12583 (ABNT, 1992a) e NBR 12584 (ABNT, 1992b): é importante em misturas asfálticas já que a função do asfalto é aderir (ou ligar) as partículas do agregado.
- **Densidades aparente, real e absorção** - ME 081 (DNER, 1998a).

Asfaltos

O asfalto é um dos mais antigos materiais utilizados na construção civil. Pode ser encontrado na natureza, mas em geral é proveniente do refino do petróleo (cimento asfáltico de petróleo, CAP). Atualmente, no Brasil, quase todo o asfalto é obtido do processamento de petróleo bruto (ou cru). Muitas refinarias estão localizadas próximas a locais com transporte por água, ou supridos por dutos a partir de terminais marítimos (ODA, 2000).

O asfalto, também denominado de cimento asfáltico, material asfáltico, ligante asfáltico, ligante betuminoso ou material betuminoso, é definido como material cimentante, preto, semissólido, que se liquefaz quando aquecido, composto de betume (~99,5%) e alguns outros componentes (ODA, 2000).

Os principais tipos de asfaltos são: cimento asfáltico de petróleo (CAP); emulsões asfálticas (EA), asfalto diluído de petróleo (ADP) e asfaltos modificados.

Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP): é o asfalto puro. É o produto básico da destilação do petróleo, semissólido à temperatura ambiente, necessitando de aquecimento para adquirir consistência adequada para utilização. Os CAPs são classificados segundo sua penetração em: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200. Sua composição varia com o petróleo e processo de produção, sendo que, do seu peso molecular, mais de 95% são hidrocarbonetos (ODA, 2000).

Asfalto Diluído de Petróleo (ADP): é o produto da diluição do asfalto puro em diluentes, como querosene e gasolina. Os diluentes proporcionam produtos menos viscosos e devem evaporar completamente deixando como resíduo o CAP, não necessitando de aquecimento para sua aplicação. De acordo com o tempo de cura (fenômeno de evaporação do diluente), os ADPs são classificados em: Cura Rápida (CR); Cura Média (CM) e Cura Lenta (CL). Os asfaltos diluídos de cura média são utilizados nos serviços de imprimação (ODA, 2000).

Emulsões asfálticas (EA): são suspensões de asfaltos finamente divididos em pequenos glóbulos dispersos em uma fase contínua que é a água. As emulsões são obtidas em meio intensamente agitado, combinando-se asfalto aquecido com água e um agente emulsificante, que tem finalidade de favorecer a dispersão e revestir os glóbulos de asfalto com uma película protetora, mantendo-se em suspensão. Quando a emulsão é aplicada sobre os agregados, o asfalto nela contido tende a se coagular e a água evapora deixando sobre o agregado uma película de asfalto, ocorrendo a ruptura da emulsão. Não deve ser aquecida para sua aplicação. As emulsões são classificadas em: ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL).

As emulsões são aplicadas em pintura de ligação (RR-1C e RR-2C) e na produção de misturas asfálticas tipo pré-misturado a frio (RM-1C, RM-2C e RL-1C), lama asfáltica (LA-1C e LA-2C) e microrrevestimentos (emulsões modificadas por polímeros) (ODA, 2000).

Asfaltos modificados

A importância dos asfaltos para o desempenho dos pavimentos flexíveis tem levado ao uso de aditivos para melhorar suas propriedades físicas e químicas, aumentando a resistência à formação de defeitos. Os principais aditivos utilizados são os polímeros (SBS, SBR e EVA) e a borracha de pneus moída, produzindo os asfaltos polímeros e o asfalto borracha. As principais vantagens dos asfaltos modificados em relação aos asfaltos puros, segundo Oda (2000) são:

- Redução da susceptibilidade térmica e aumento da resistência à flexão de revestimentos de pontes e em pavimentos de rodovias com alto volume de tráfego (ex.: corredores de ônibus).
- Aumento da adesividade, da resistência à formação de trilhas de roda, ao trincamento por fadiga, ao envelhecimento, à oxidação e à abrasão de misturas.
- Redução de custos de manutenção de pavimentos.

A seleção de um tipo de asfalto envolve a análise das suas características reológicas, físicas e químicas. O parâmetro mais utilizado para classificar asfaltos é a sua consistência, que pode ser determinada por meio de ensaios de penetração; viscosidade e ponto de amolecimento (ODA, 2000). Os principais ensaios utilizados para caracterização dos asfaltos são:

- **Penetração** - NBR 6576 (ABNT, 2007): serve para determinar a consistência dos asfaltos.
- **Viscosidade**: é usada para garantir um asfalto fluido o suficiente para ser bombeado e misturado com o agregado. Pode ser determinada viscosidade Saybolt Furol, NBR 14950 (ABNT,2003), viscosidade aparente ou viscosidade Brookfield, NBR 15184 (ABNT, 2004).
- **Ponto de amolecimento** - NBR 6560 (ABNT,2008): valor de temperatura na qual a consistência de um asfalto passa do estado plástico ou semissólido para o estado líquido.
- **Ponto de fulgor** - NBR 11341 (ABNT, 2005): temperatura na qual existe uma liberação de vapores do produto suficiente para, em mistura com ar e na presença de uma chama, provocar uma centelha.

É um ensaio de segurança.

- **Ductilidade** - NBR 6293 (ABNT, 2015): capacidade do asfalto sofrer deformações de sua massa.



Exemplificando

Um exemplo de problema em pavimentos rodoviários foi o que ocorreu no corredor de ônibus denominado de BRT TransOeste, que liga a Barra da Tijuca a Santa Cruz e Campo Grande, na cidade do Rio de Janeiro. Foi construído um pavimento flexível com revestimento asfáltico de granulometria descontínua e asfalto modificado por borracha, considerado adequado para esse tipo de tráfego. No entanto, após 6 meses da conclusão da obra, o pavimento já apresentava diversos problemas, como buracos, afundamentos e remendos. Uma das principais causas do problema foi a baixa capacidade de suporte do subleito, uma vez que o material do subleito dos trechos em que apareceram os defeitos era composto por solo mole, que não apresenta resistência mínima para a fundação de qualquer tipo de pavimento. Nesse caso, antes de iniciar o projeto, faltou fazer uma avaliação das características do local da obra antes de definir a estrutura do pavimento.



Assimile

Um pavimento deve ser construído para resistir aos esforços solicitados pelo tráfego e às ações das intempéries, proporcionando uma superfície de rolamento com conforto e segurança para os usuários durante toda a sua vida útil. De forma geral, o desempenho do pavimento está relacionado com as características dos materiais empregados na composição das camadas e com o processo de construção e, em alguns casos, a vida útil do pavimento é reduzida em função de erros na seleção e caracterização dos materiais empregados nas camadas do pavimento.

Muitas vezes, estruturas de pavimento com materiais com características similares têm comportamentos bastante distintos. Isso acontece porque sofrem a influência de diversos fatores como a localização, a geometria, o sistema de drenagem, as variações climáticas e, principalmente, as cargas de tráfego.

A seleção do tipo e da estrutura do pavimento depende do tráfego e das características dos materiais que estão disponíveis na região da obra. É essencial, antes de elaborar o projeto do pavimento, fazer um reconhe-

cimento do subleito e das características da região, como solo, clima, relevo, etc., assim como realizar a caracterização dos materiais disponíveis para as outras camadas, empregando ensaios específicos para verificar se atendem as normas correspondentes a cada tipo de material, evitando selecionar materiais inadequados.



Refleta

A qualidade das estradas, conseqüentemente dos pavimentos, afeta diretamente o custo dos transportes e de todos os produtos e serviços que dependem desse tipo de transporte.

Muitas rodovias pavimentadas estão velhas e desgastadas e apresentam desempenho ruim, proporcionando demora e custos elevados por seu uso, uma vez que o estado insatisfatório dos pavimentos ocasiona aumento em custos operacionais, repassados aos custos dos produtos.

Infelizmente, a baixa qualidade pode ser verificada também em pavimentos novos, logo após a sua construção. Por que isso acontece? O que fazer para evitar isso?

Você estudou até agora as generalidades sobre pavimentos, tipos de pavimentos rodoviários e misturas asfálticas (materiais e dosagem) relacionados ao processo de pavimentação para rodovias.



Dica

Para aprender mais sobre pavimentação, sugerimos a leitura das seguintes publicações DNIT (2006) e ODA (2000).

DNIT - Departamento de Nacional de Infraestrutura Terrestre. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, 2006, p. 79-83.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica do uso de asfalto-borracha em obras de pavimentação**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – EESC/USP. Tese de Doutorado, São Carlos, SP, 2000 – p. 9-21.

Preparado para aplicar esses conceitos na solução de um problema prático? Vamos lá! Você já tem conhecimentos suficientes para isso.

A concessionária de rodovias em que você trabalha venceu o edital de licitação para a elaboração do projeto executivo de um pavimento que será construído em um trecho da SP-2018. O presidente da empresa pretende abrir uma nova concessionária. Para isso, fará a escolha do novo gerente, utilizando esse projeto como base para tomada de decisão. Os candidatos ao cargo terão que montar uma equipe para desenvolver o projeto.

Você será o chefe da sua equipe e terá que tomar as decisões a partir de estudos e análises de informações e dados disponíveis.

Após reunir sua equipe e analisar os dados fornecidos no edital, você identificou a necessidade de coletar informações sobre as características da região onde será executada a obra de pavimentação.

As principais informações sobre o local da obra são: tipo de relevo (plano, ondulado ou montanhoso), clima (incluindo hidrologia e pluviosimetria), tipo e características (CBR, granulometria, etc.) dos materiais do subleito e disponíveis para construção das camadas do pavimento.

Para obter essas informações, é necessário fazer um estudo geotécnico que compreenda a coleta e caracterização dos materiais do subleito e posterior traçado dos perfis dos solos, e também dos materiais de jazidas disponíveis para a utilização na construção das camadas de reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. Esse tipo de serviço deve ser realizado por profissional especializado.

A coleta e caracterização de materiais pode ser realizada por meio de sondagens e observação das características dos materiais (cor, textura e consistência), assim como de ensaios específicos (granulometria, forma, resistência, durabilidade), devendo atender às especificações técnicas de serviço, assim como aos métodos de ensaios. Com os resultados dos ensaios de caracterização é possível definir se os materiais são adequados para a estrutura do pavimento.

Vale lembrar que o pavimento é uma estrutura complexa constituída por camadas construída sobre o terreno natural, denominado de subleito, que é a fundação do pavimento. A definição do tipo de pavimento mais adequado (flexível ou rígido) depende das características do local onde será executada a obra, como capacidade de suporte do subleito e dos materiais disponíveis nas jazidas, assim como de informações sobre o relevo e o clima e do tráfego que irá solicitar o pavimento.

A estrutura do pavimento flexível é composta por diversas camadas, sendo que a camada superficial, denominada de revestimento, é formada por uma mistura asfáltica. A espessura da camada de revestimento também

depende do tráfego e do tipo de mistura asfáltica selecionada. Já a mistura asfáltica depende da disponibilidade dos materiais na região onde será executada a obra.

Após realizar essas atividades, você pode conhecer os tipos de revestimentos asfálticos e suas características, assim como os materiais empregados em sua fabricação. Vamos praticar mais um pouco? Você tem um outro problema sobre pavimentos alternativos para resolver.

Avançando na prática

Pavimentos alternativos

Descrição da situação-problema

Em alguns estados brasileiros da região Norte do Brasil, como cidades no estado do Maranhão, existe uma escassez de materiais (agregados) para construir a estrutura dos pavimentos. Em função disso, o DER-MA (departamento de estradas de rodagem do estado do Maranhão) está com dificuldades de encontrar uma solução para o pavimento da MA-2019 e resolveu lançar o edital de licitação para elaboração do projeto de pavimento dessa via. A empresa em que você trabalha venceu a licitação e terá que desenvolver esse projeto. Você será o engenheiro responsável pelo e terá que utilizar materiais alternativos que possam ser empregados na pavimentação. Quais as características e parâmetros que devem ser considerados na seleção dessas alternativas?

Resolução da situação-problema

Antes de iniciar o projeto, você definiu que é necessário fazer um reconhecimento do local onde será executada a obra, identificando características como topografia, geotecnia, clima, drenagem, etc., além de um estudo do tráfego que irá solicitar o pavimento, considerando os fluxos (volume de veículos) dos acessos que são utilizados atualmente e o volume de veículos que passará a utilizar a via pavimentada. Para selecionar os materiais que podem ser empregados na estrutura do pavimento, você determinou que deve ser feita uma análise dos materiais locais (subleito e de jazidas próximas) e das suas características, que possam servir de alternativas. Muitas vezes, um material puro não apresenta resistência mínima, mas a mistura com outros produtos (solo ou aditivos) pode aumentar essa resistência, proporcionando um material adequado. No caso do Maranhão não existem agregados para produzir uma mistura asfáltica do tipo concreto

asfáltico, que consiste da mistura em usina a quente de agregados graúdos, agregados miúdos, material de enchimento e asfalto (cimento asfáltico de petróleo, CAP). Como alternativa, foram adotadas as misturas de solo com emulsão asfáltica, que, apesar de não apresentar resistência tão alta quanto o concreto asfáltico, é uma alternativa como revestimento de pavimentos flexíveis de baixo volume de tráfego. No entanto, para melhorar a resistência, fica como sugestão, utilizar uma emulsão asfáltica modificada por polímero no lugar da emulsão convencional, pois os produtos com polímeros, geralmente, proporcionam maior resistência às misturas asfálticas, podendo atender um tráfego mais pesado.

Faça valer a pena

1. O pavimento é uma estrutura em camadas construída sobre uma fundação, denominada de subleito. Para definir o tipo e as características da estrutura do pavimento é essencial conhecer a resistência do material do subleito e dos materiais disponíveis para construção das camadas do pavimento. Qual é o principal parâmetro do material do subleito que serve para avaliar a sua resistência?

Assinale a alternativa que responde corretamente à pergunta anterior:

- a) Granulometria.
- b) Capacidade de suporte, CBR.
- c) Resistência à tração.
- d) Resistência ao choque e ao desgaste.
- e) Forma das partículas.

2. Os agregados podem ser empregados em qualquer camada da estrutura do pavimento, desde o reforço do subleito, assim como na sub-base, na base e no revestimento. Para isso é necessário fazer uma análise a partir da caracterização por ensaios em laboratório, determinando se os materiais atendem às especificações técnicas. Quais são as principais características dos agregados que devem ser consideradas na seleção do material para emprego em camadas do pavimento?

Selecione a alternativa com a resposta correta:

- a) Viscosidade e fluência.
- b) Consistência e temperatura do material.
- c) Ductilidade e ponto de fulgor.
- d) Granulometria e resistência ao choque e ao desgaste.
- e) Resistência à tração e compressão diametral.

3. O asfalto é um dos mais antigos materiais da natureza, sendo usado desde o raiar da civilização. Atualmente, a principal aplicação do asfalto é em obras de pavimentação, principalmente em camadas de revestimentos de pavimentos flexíveis. Com o passar dos anos, o aumento das cargas de tráfego e o surgimento de defeitos tem levado ao desenvolvimento de produtos como os asfaltos modificados por polímeros ou borracha de pneus moída. Vale ressaltar que qualquer tipo de asfalto, puro ou modificado, deve atender às especificações técnicas específicas para cada tipo de produto. Quais são as principais razões que levaram ao desenvolvimento de asfaltos modificados?

Enunciado:

Assinale a alternativa correta:

- a) Reduzir a fluência e durabilidade do asfalto.
- b) Reduzir a espessura de ligante nos agregados.
- c) Aumentar a resistência à formação de trincas por fadiga e oxidação.
- d) Reduzir a adesividade do asfalto nos agregados.
- e) Reduzir a resistência à fadiga e formação de deformações.

Tipos de pavimentos rodoviários

Diálogo aberto

Eu gosto muito de viajar e você?

Já reparou como está a qualidade de nossas estradas ultimamente?

Dependendo da região do país, temos trechos com pavimento em péssimas condições. Para resolver problemas desse tipo, o engenheiro civil precisa conhecer os tipos de revestimentos asfálticos e suas características, assim como os materiais empregados em sua execução.

Nesse contexto, um desafio foi lançado para você:

Quem vai ser o gerente da nova concessionária? Você, com certeza, fará o melhor projeto de pavimento da sua vida.

Com as informações do local onde será executada a obra, você pôde constatar que a região apresenta, em determinados pontos, um relevo montanhoso e que o subleito apresenta valores de CBR (*California Bearing Ratio* ou Índice de Suporte Califórnia) acima de 5%, o que indica que não será necessário substituir o material. Além disso, na região existem jazidas de materiais que poderão ser empregados nas outras camadas do pavimento.

No entanto, para desenvolver a sua proposta do projeto executivo do pavimento da SP-2018, ainda faltam alguns dados. Após a coleta de informações da região, você constatou que, antes de dar andamento ao projeto, é necessário definir o tipo de pavimento que será adotado, em função das características do terreno e dos materiais disponíveis.

De forma geral, existem três tipos de pavimentos: flexível, semirrígido e rígido. O pavimento flexível é composto por base granular e revestimento asfáltico. Já o semirrígido tem base cimentada e revestimento flexível (asfáltico). O rígido é composto por placa de concreto, que tem função de revestimento e base. Cada um tem suas particularidades, o tráfego, os acessos, os cruzamentos, tudo isso irá influenciar nas características do fluxo de veículos e, conseqüentemente, na seleção do tipo de estrutura de pavimento, assim como na sua manutenção.

É importante lembrar que os pavimentos devem ser projetados especificamente para cada caso. Não existe uma regra, uma norma que defina qual o tipo ideal de pavimento a ser selecionado.

Então, para dar continuidade ao projeto, agora você deve identificar

quais são os parâmetros que devem ser considerados na definição do tipo de pavimento a ser adotado. Como determinar esses parâmetros? Quais as características de cada tipo de pavimento? A partir da identificação dos parâmetros, como escolher o tipo mais adequado para atender às características do local da obra?

Ficou curioso sobre esses temas?

Bons estudos!

Não pode faltar

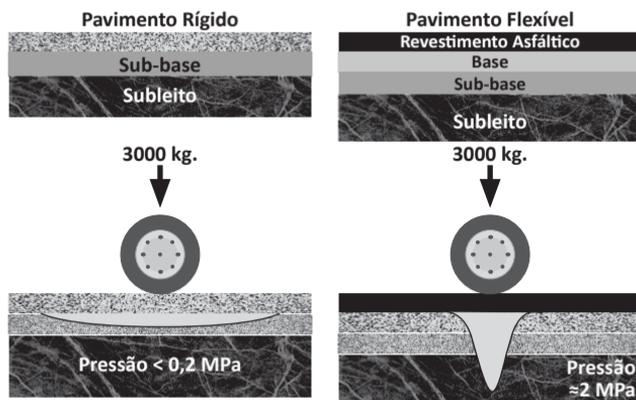
Tipos de pavimentos

O pavimento é uma estrutura em camadas de espessuras finitas construída sobre o terreno natural, denominado de subleito. Geralmente, os materiais que compõem as camadas têm diferentes características (de resistência e deformabilidade), apresentando comportamentos distintos quanto às tensões e deformações resultantes das cargas impostas pelo tráfego (DNIT, 2006).

De forma geral, os pavimentos são classificados, em função da rigidez do conjunto, em flexível e rígido. O termo rígido refere-se a pavimentos com a camada superior feita de concreto de cimento Portland; o termo flexível é associado a pavimentos com concreto asfáltico na camada superficial. No entanto, uma estrutura de pavimento flexível composta por uma camada estabilizada quimicamente (base ou sub-base) é denominada de pavimento semirrígido.

A principal diferença entre os dois tipos de pavimentos está na forma como ocorre a distribuição das cargas para o subleito (Figura 2.1).

Figura 2.1 | Distribuição de cargas nos pavimentos rígido e flexível



Fonte: Andrade (2018).

O pavimento flexível utiliza um maior número de camadas e distribui cargas para uma área menor do subleito. O pavimento rígido, devido ao elevado módulo de elasticidade do concreto, tende a distribuir a carga sobre uma área relativamente maior do subleito, sendo que a própria placa de concreto fornece a maior parte da capacidade estrutural (YODER; WICTZAK, 1975).



Refleta

A composição do tráfego (volume e tipo de veículos) e as características do local (resistência do material do subleito, relevo, clima, etc.) influenciam diretamente a definição da estrutura do pavimento. Muitas ruas e avenidas, que foram projetadas considerando o tráfego da época de construção, tiveram um aumento no volume de veículos além do previsto no projeto, sendo que algumas passaram a ter um corredor de ônibus, com pontos de paradas. Infelizmente, o tipo de pavimento executado não apresenta condições adequadas para esse tipo de tráfego. Como resolver esse problema? Quais os parâmetros que devem ser considerados na definição do tráfego que irá solicitar o pavimento? Como determinar o volume de tráfego? Como fazer a coleta de dados?

Pavimento Flexível

Segundo o DNIT (2006), pavimento flexível é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

O pavimento flexível (Figura 2.2 (a)) é constituído de uma camada de rolamento de pequena espessura, aplicada sobre camadas de base e de sub-base que são construídas sobre o subleito compactado, sendo que as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são geralmente de materiais granulares ou solo.

Dependendo das características de suporte do subleito, um pavimento flexível pode ser constituído por uma das seguintes formas:

- Revestimento + base.
- Revestimento + base + sub-base.
- Revestimento + base+ sub-base + reforço do subleito (conforme Figura 2.2 (b)).

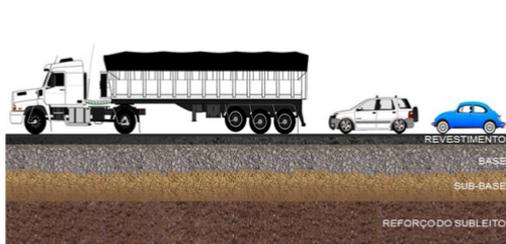
Figura 2.2 | Pavimento flexível, (a) execução do revestimento asfáltico; (b) camadas do pavimento flexível

Figura 2.2 (a)



Fonte: Pescarini (2011).

Figura 2.2 (b)



Fonte: Oda (2016).

Revestimento ou capa de rolamento: camada que tem a função de receber diretamente os esforços provenientes do tráfego e transmiti-los às camadas inferiores e de proporcionar uma superfície de rolamento com conforto e segurança. Deve, ainda, impermeabilizar o pavimento, protegendo as camadas inferiores e conferir resistência às intempéries.

Base: camada executada abaixo do revestimento, destinada a resistir às ações dos veículos e a transmiti-las, de forma conveniente, à camada subjacente. Pode ser executada sobre a sub-base, subleito ou reforço do subleito devidamente regularizado e compactado (DNIT, 2006).

Sub-base: camada executada entre o subleito (ou reforço do subleito) e a base.

Reforço do subleito: camada de espessura constante sobre o subleito regularizado, constituída por solo de qualidade superior a do subleito.

As principais características desse tipo de pavimento são:

- A superfície de rolamento é uma camada composta por uma mistura asfáltica, esbelta e relativamente flexível.
- A camada estruturalmente mais importante é a base, que receberá grandes tensões do tráfego, pois o revestimento asfáltico não tem espessura e rigidez suficiente para distribuir as tensões como acontece no pavimento rígido.
- A distribuição de tensões se dá mais devido à espessura que devido à rigidez das camadas, que podem ser granulares e não apresentar resistência à tração.

Pavimento Rígido

Segundo o DNIT (2006), pavimento rígido – Figura 2.3 (a) – é aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

O pavimento rígido é constituído de:

- **Placa de concreto de cimento:** camada que desempenha ao mesmo tempo o papel de revestimento e de base - Figura 2.3 (b).
- **Sub-base:** camada construída com o objetivo de evitar que a placa de concreto fique em contato direto com o solo do subleito e também para evitar o bombeamento desse solo. O bombeamento pode ocorrer quando a água de chuva, infiltrada e acumulada embaixo da placa, tende a subir, quando o pavimento é submetido à ação do tráfego e da pressão das cargas dos veículos. Esse fenômeno pode enfraquecer a estrutura do pavimento, levando a sua ruptura (COR SINI, 2011).

Figura 2.3 | Pavimento rígido, (a) Rodovia com pavimento rígido; (b) Execução da placa de concreto

Figura 2.3 (a)



Figura 2.3 (b)



Fonte: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto- IMCYC (2009).

As características marcantes desse tipo de pavimento são:

- A placa de concreto de cimento Portland, de espessura típica entre 18 e 40 cm, distribui as tensões impostas pelo carregamento.
- A sub-base de pedra britada ou material cimentado tem a função de melhorar e uniformizar o suporte, além de drenar (caso de material granular).
- O subleito recebe tensões relativamente pequenas, distribuídas por uma superfície grande.
- Entre as placas existem juntas, nas quais pode haver ferragem com uma ou duas funções: transmitir esforços verticais para a placa vizinha ou não permitir que as placas se separem.

- O pavimento rígido é resistente aos efeitos solventes dos combustíveis como óleo diesel e querosene de aviação.



Dica

Para saber mais sobre pavimento de concreto, sugerimos o vídeo da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que mostra o passo a passo do processo para construir um pavimento de concreto.

ABCP VÍDEOS. Pavimento de Concreto – Execução Passo a Passo. 9 set. 2011.

Pavimento Semirrígido

O pavimento semirrígido é constituído por revestimento asfáltico assente sobre base ou sub-base cimentada ou estabilizada quimicamente com cimento ou cal, ou ainda por algum produto que aja como aglomerante, ele apresenta uma deformabilidade maior que o pavimento rígido e menor que o flexível. O pavimento semirrígido pode ser do tipo direto, quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre camada de base cimentada, ou do tipo invertido, quando a camada de revestimento é executada sobre uma camada de material granular, que tem a função de atenuadora de tensões, evitando-se, assim, a reflexão e propagação de trincas no revestimento asfáltico.

Camadas dos Pavimentos

As camadas do pavimento têm melhores características e são mais caras à medida que estão mais próximas da superfície. Do ponto de vista estrutural, a camada mais importante é a base. Sobre ela, para suportar os efeitos destrutivos do tráfego e das intempéries, está a capa ou camada de rolamento. Abaixo da base, como transição ao subleito, pode haver uma sub-base e/ou um reforço do subleito.

Regularização do subleito: em alguns casos, antes de iniciar a construção das camadas do pavimento, é necessário realizar a regularização do subleito, que consiste em uma atividade para corrigir falhas da camada final da terraplenagem ou de um leito antigo de estrada de terra. Pode apresentar espessura variável e ser nula em alguns pontos da seção transversal, não sendo considerada camada do pavimento.

Reforço do Subleito: compreende uma camada de material granular (geralmente solo local), executada sobre o subleito devidamente compactado e regularizado, empregada quando se torna necessário aumentar a capacidade de suporte do subleito. Geralmente essa camada é executada com materiais disponíveis nas regiões próximas à obra.

Bases e Sub-bases Flexíveis e Semirrígidas

Segundo o DNIT (2006), as bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas podem ser classificadas em granulares e estabilizadas com aditivos.

Bases e Sub-Bases Granulares

- **Estabilizadas Granulometricamente** (DNIT, 2006): são as camadas constituídas por solos, britas ou outros materiais, como escória de alto forno, ou ainda, pela mistura desses materiais. Essas camadas, puramente granulares, são sempre flexíveis e são estabilizadas granulometricamente pela compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações. Muitas vezes, esses materiais devem sofrer beneficiamento prévio, como britagem e peneiramento, com vista ao enquadramento nas especificações. Quando se utiliza uma mistura de material natural e pedra britada, tem-se as sub-bases e bases de solo-brita. Quando se utiliza exclusivamente produtos de britagem, tem-se as sub-bases e bases de brita graduada simples, BGS, ou de brita corrida.
- **Macadames** (DNIT, 2006): consiste de uma camada de brita de graduação aberta que, após compactação, tem os vazios preenchidos pelo material de enchimento, constituído por finos de britagem (pó de pedra) ou mesmo por solos de granulometria e plasticidade apropriadas; a penetração do material de enchimento é promovida pelo espalhamento na superfície, seguido de varredura, compactação (sem ou com vibração) e irrigação, no caso de macadame hidráulico. O macadame seco, ao dispensar a irrigação, além de simplificar o processo de construção evita o encharcamento do subleito.

Bases e Sub-Bases Estabilizadas (com aditivos)

- **Brita graduada tratada com cimento, BGTC:** mistura de agregado mineral, cimento Portland, aditivos e água, em proporções determinadas experimentalmente, que cumpre certos requisitos de qualidade, uniformemente espalhada sobre uma superfície previamente preparada, resultando uma mistura homogênea, compactada e rígida.
- **Solo-cimento:** é uma mistura de solo, cimento Portland e água; a mistura solo-cimento deve satisfazer a especificação quanto aos requisitos de densidade, durabilidade e resistência, dando como resultado um material duro, cimentado, de acentuada rigidez à flexão. O teor de cimento adotado usualmente é da ordem de 6 a 10% (DNIT, 2006).

- **Solo melhorado com cimento:** mistura de solo com adição de pequenos teores de cimento (2 a 4%), com objetivo de melhorar a plasticidade e sensibilidade à água, sem cimentação acentuada, são consideradas flexíveis (DNIT, 2006).
- **Solo-cal:** é uma mistura de solo, cal e água e, às vezes, uma pozolona artificial. O teor de cal mais usado é de 5 a 6% e o processo de estabilização ocorre (DNIT, 2006):
 - Por alteração do solo, quanto a plasticidade e sensibilidade à água (considerada flexível).
 - Por carbonatação, que é uma cimentação fraca (considerada semirrígida).
 - Por pozolanização, que é uma cimentação forte (considerada semirrígida).
- **Solo melhorado com cal:** mistura de solo com adição de pequeno teor de cal com objetivo de melhorar a plasticidade e sensibilidade à água, é considerada flexível (DNIT, 2006).
- **Solo-betume:** é uma mistura de solo, água e material asfáltico. Trata-se de uma mistura considerada flexível (DNIT, 2006).

Bases e Sub-Bases Rígidas

Essas camadas são as de concreto de cimento, ou simplesmente “concreto”. Esses tipos de bases e sub-bases têm acentuada resistência à tração, fator determinante no seu dimensionamento (DNIT, 2006).

Revestimentos

Os revestimentos podem ser flexíveis ou rígidos, sendo que os flexíveis podem ser revestimentos asfálticos ou por calçamento, enquanto os rígidos são constituídos por placas de concreto de cimento Portland.

Revestimentos Flexíveis Asfálticos

Os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de agregados e asfaltos, podendo ser feita de duas maneiras clássicas: por penetração e por mistura (DNIT, 2006). Conforme a graduação dos agregados, o revestimento pode ser composto por uma mistura de graduação densa ou aberta.

- **Revestimentos por penetração:** pode ser por penetração direta ou invertida, sendo que o de penetração invertida mais usado é tratamento superficial (TS), e o de penetração direta o macadame betuminoso (DNIT, 2006).

- **Tratamento superficial:** é o revestimento executado através de uma ou mais aplicações de asfalto, seguida(s) do mesmo número de operações de espalhamento e compactação de camadas de agregados de granulometrias apropriadas. Conforme o número de camadas, é denominado de tratamento superficial simples (TSS), duplo (TSD) ou triplo (TST) (DNIT, 2006).



Dica

Para saber mais sobre tratamento superficial, sugerimos o vídeo a seguir, que mostra a execução de um TSD (Tratamento Superficial Duplo) na Austrália.

CHAM MURA. **Amazing build a road at Australia** (A incrível construção de uma estrada na Austrália). 4 jan. 2017.

- **Macadame betuminoso:** é o revestimento executado por meio do espalhamento e compactação de camadas de agregados com granulometria apropriada, sendo cada camada, após compactação, submetida a uma aplicação de material asfáltico e recebendo, ainda, a última camada, uma aplicação de agregado miúdo (DNIT, 2006).
- **Revestimentos por mistura:** o agregado é pré-envolvido com o material asfáltico em usina apropriada, antes da compactação. O pré-envolvimento pode ser realizado a frio (temperatura ambiente) ou a quente (com aquecimento dos materiais) e são adotadas ainda as seguintes designações:
 - **Mistura a frio:** quando os agregados e o asfalto utilizados permitem que a mistura, o espalhamento e a compactação seja feito à temperatura ambiente. Por exemplo, o pré-misturado a frio, PMF.
 - **Mistura a Quente:** quando os materiais (asfalto e os agregados) são aquecidos previamente e a mistura asfáltica resultante é espalhada e compactada ainda quente. Por exemplo, o Concreto Asfáltico (CA), mais conhecido como Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ).



Dica

Para saber mais sobre revestimento asfáltico a quente, sugerimos o vídeo *Modern Road Construction & Asphalt Paving Machines* (Construção moderna de estradas e máquinas de pavimentação de asfalto).

CANAL EVIDZ. *Modern Road Construction & Asphalt Paving Machines*.16 maio 2017.

Revestimentos Flexíveis por Calçamento

Os revestimentos por calçamento são aplicados em pátios de estacionamento, vias urbanas e alguns acessos viários. Durante décadas, esse tipo de revestimento era composto praticamente por alvenaria poliédrica e paralelepípedos, sendo que nos dias atuais é mais comum aplicar blocos de concreto, formando o pavimento intertravado.

- **Alvenaria poliédrica:** consiste em camadas de pedras irregulares, assentadas e comprimidas sobre um colchão de regularização, constituído de material granular.
- **Paralelepípedos:** são constituídos por blocos regulares, assentes sobre um colchão de regularização constituído de material granular. Os paralelepípedos podem ser fabricados de diversos materiais sendo os mais usuais de blocos de granito, gnaisse ou basalto.
- **Blocos intertravados:** revestimento constituído por blocos intertravados de concreto de cimento. A execução é semelhante à dos paralelepípedos, mas requer cuidado apropriado para assegurar o necessário intertravamento.

Revestimentos Rígidos

O concreto de cimento, ou simplesmente “concreto” é constituído por uma mistura de cimento Portland, areia, agregado graúdo e água, distribuído numa camada devidamente adensado. Essa camada funciona ao mesmo tempo como revestimento e base do pavimento (DNIT, 2006).

Outras Misturas para Pavimentação

O pavimento é dimensionado para atender ao tráfego durante um período de tempo, denominado de vida útil, definido em projeto. Durante esse período deve ser monitorado por meio de avaliações das suas condições, identificando possíveis defeitos na sua estrutura.

Os principais tipos de defeitos que aparecem nos pavimentos flexíveis são as trincas por fadiga e as deformações permanentes nas trilhas de rodas. As trincas por fadiga surgem em decorrência das solicitações repetidas do tráfego, mas podem surgir em função do dimensionamento inadequado da estrutura do pavimento, além de outras causas. As deformações permanentes são depressões causadas por afundamentos que aparecem na superfície do pavimento, em decorrência da baixa capacidade de suporte do subleito ou da mistura asfáltica inadequada (falha na dosagem da mistura asfáltica ou tipo de mistura inadequado) (CNT, 2018).

Como alternativa para atender tráfego mais pesado e aumentar as condições de segurança, foram desenvolvidas misturas asfálticas especiais: SMA - *stone matrix asphalt* (asfalto de matriz de pedra), *gap graded* (vazios graduados) e CPA - camada porosa de atrito.

O SMA é uma mistura de granulometria descontínua, composta por uma maior fração de agregados graúdos britados de alta qualidade (entre 70% e 85%), uma argamassa, chamada de mastique, formada por uma mistura de filer (material de enchimento) e asfalto modificado (NEVES FILHO, 2004). Deve ser produzida em usina, espalhada e compactada a quente. O SMA foi desenvolvido com objetivo de obter uma camada de alta resistência à deformação permanente e melhoria das condições de aderência em pista molhada.

A CPA é uma mistura produzida a quente em usina apropriada, constituída de agregado de granulometria uniforme e asfalto modificado, eventualmente fibras, devendo ser espalhada e compactada a quente, que origina camada com característica drenante (18 a 25% de vazios).

O GAP GRADED é uma mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (filer), se necessário, e asfalto modificado por borracha (asfalto borracha), espalhada e compactada a quente. Tem por finalidade apresentar uma camada de alta resistência à deformação permanente e melhoria das condições de aderência em pista molhada.



Assimile

Para selecionar o tipo de pavimento mais adequado é necessário conhecer as principais características do local da obra, como tráfego (volume e tipos de veículos), relevo, clima e materiais disponíveis.

Durante muitas décadas, no Brasil, independente do tráfego, só eram executados pavimentos flexíveis compostos por reforço do subleito, sub-base e base de material granular (brita e solo) e revestimento asfáltico.

Na última década, o Brasil consumiu em média 2.434.571 de toneladas de asfalto por ano (ABEDA, 2018), o que daria para construir cerca de 46.000 km de revestimentos asfálticos novos por ano. No entanto, foram construídos apenas 22.760 km (~5,0%), uma extensão muito inferior à que poderia ter sido construída. O restante foi aplicado em atividades de manutenção e reabilitação do pavimento.

Por isso, é fundamental conhecer as características do local onde será executado o pavimento para que sejam selecionados de forma adequada os materiais e o tipo de pavimento para atender o tráfego e as condições climáticas, evitando, dessa forma, que o pavimento se deteriore mais rapidamente e seja necessária a execução de serviços de restauração.



Exemplificando

Podemos mencionar como exemplo o novo projeto para incorporar as mudanças de comportamento de tráfego que aconteceu na Avenida Paulista, em São Paulo. Em 2009, fez cem anos que a cidade de São Paulo recebeu a primeira cobertura asfáltica. Foi em 1909, quando substituíram os pedregulhos brancos que recobriam o leito da avenida Paulista por asfalto importado da Alemanha. O volume de tráfego naquela época era apenas de automóveis de passeio e muito inferior ao atual, que é 4200 veículos por hora (CAPRIGLIONE; BARROS, 2009). Além disso, atualmente, existem 14 pontos de ônibus distribuídos nos 2800m de extensão da Avenida Paulista. Em função das mudanças que aconteceram, para atender o tráfego atual, foi necessário um novo projeto do pavimento, o qual teve que recalcular o volume total do tráfego que irá solicitar o pavimento durante a vida útil determinada pela prefeitura. Com o volume de tráfego atualizado, foi feito novo dimensionamento dos pavimentos, sendo que, nas faixas em que circulam os ônibus e nos pontos de parada, foi adotado pavimento rígido.

Após ter aprendido todos esses conceitos sobre os diversos tipos de pavimentos e misturas, que tal colocar este conhecimento todo em prática?

Você tem um problema importante para resolver agora no *Sem Medo de Errar*.

Sem medo de errar

Na concessionária em que trabalha, você recebeu um novo desafio. Você será o engenheiro responsável e encarregado de desenvolver a sua proposta para o projeto executivo do pavimento da rodovia SP-2018. Apesar de já terem feito a coleta de informações, você constatou que ainda faltam alguns dados importantes para conseguir dimensionar o pavimento para este trecho da rodovia.

Então, para dar continuidade ao projeto, agora você deve identificar quais são os parâmetros que devem ser considerados na definição do tipo de pavimento a ser adotado e como determinar esses parâmetros. Quais as características de cada tipo de pavimento? A partir da identificação dos parâmetros, como escolher o tipo mais adequado para atender às características do local da obra?

Portanto, para selecionar o tipo de pavimento mais adequado, deve-se considerar, principalmente, o tráfego que irá solicitar o pavimento, além das características geotécnicas (CBR, granulometria, resistência dos materiais, etc.), topográficas e climáticas, incluindo todos os parâmetros necessários para o projeto de drenagem.

Na definição do tráfego total que irá solicitar o pavimento devem ser consideradas a composição do tráfego (volume por tipo de veículos) e a taxa de crescimento anual para o período de projeto (vida útil). Para determinar o tráfego é necessário realizar pesquisas de tráfego, por meio de contagens volumétricas classificatórias (no caso de vias existentes) ou contagens de origem-destino (vias novas).

No entanto, em alguns casos de pavimentos já existentes, pode ocorrer o aumento do tráfego para um volume não previsto em projeto, como da implantação de corredores de ônibus, tornando necessário realizar uma avaliação das condições atuais, determinando a vida restante da estrutura e fazer um novo projeto do pavimento com os dados atualizados, o que pode incluir a alteração do tipo de estrutura a ser construída. O novo pavimento deverá ser projetado para atender essas características específicas, respeitando as especificações técnicas dos materiais e dos serviços.

No Brasil, o pavimento flexível é o mais usado em qualquer tipo de via. Atualmente, com o desenvolvimento de novos produtos, como o asfalto modificado por polímero e por borracha, o pavimento semirrígido com revestimento contendo asfalto modificado tem sido empregado também como alternativa para vias de tráfego pesado.

O pavimento rígido é mais recomendado para vias de tráfego pesado e corredores de ônibus, como BRT- Bus Rapid Transit, que é composto por corredores exclusivos por onde circulam ônibus de alta capacidade, tornando o transporte mais rápido e eficiente (WRI BRASIL, 2018). O custo de implantação do pavimento rígido geralmente pode ser maior entre 2 a 3 vezes a do pavimento flexível. No entanto, quando bem construído, sua manutenção é inferior a do pavimento flexível ao longo do tempo, tornando o custo/benefício bastante interessante.

Vale lembrar que, mesmo quando bem executado, para manter a qualidade e proporcionar bom desempenho durante sua vida em serviço, o

pavimento deve ser monitorado, devendo receber manutenção periodicamente. Para isso, é importante a implantação de um sistema de gerência de pavimentos, que irá auxiliar no monitoramento dos pavimentos, indicando “onde, quando, como e quanto” deve ser realizada uma determinada atividade de manutenção e reabilitação (M&R) do pavimento.

Até agora você já conheceu os tipos pavimentos, de revestimentos asfálticos e suas características, assim como os materiais empregados em sua produção. Dessa forma, cumpriu mais uma fase do seu processo de aprendizagem. Já sabe descrever os materiais aplicados em misturas asfálticas e os tipos de revestimentos asfálticos. Na próxima etapa, vai aprender a dosar uma mistura asfáltica para aplicação em pavimento rodoviário.

Que tal agora resolvermos um problema sobre pavimentos semirrígidos invertidos?

Vamos lá, você já tem condições para isso.

Avançando na prática

Pavimentos semirrígidos invertidos

Descrição da situação-problema

Durante décadas, o principal tipo de pavimento executado nas ruas, avenidas e rodovias do Brasil era o flexível, sendo que a estrutura típica era composta por revestimento de concreto betuminoso usinado a quente, CBUQ, (hoje chamado de concreto asfáltico, CA), base e sub-base de materiais granulares (brita graduada simples, BGS, ou solo-brita) e reforço do subleito composto por solo local. Praticamente uma “receita de bolo”, independentemente do local e do tráfego, a estrutura era sempre a mesma.

Na empresa em que você trabalha, eles decidiram adotar como alternativa, em locais com tráfego pesado, um tipo de pavimento que pode ser o semirrígido, composto por um revestimento asfáltico, base cimentada, sub-base granular e reforço do subleito. A base cimentada mais empregada é a BGTC - brita graduada tratada por cimento.

No entanto, é importante ressaltar que a BGTC, devido à cura do cimento, apresenta retração, levando ao aparecimento de microfissuras e trincas logo em idades iniciais e, após alguns anos de serviço, o trincamento é aumentado por conta da fadiga. Esses problemas podem levar a reflexão destas trincas ao revestimento asfáltico no caso do emprego da BGTC como material de base (BALBO, 1993).

Como evitar que ocorra a reflexão de trincas para o revestimento asfáltico nos pavimentos semirrígidos?

Resolução da situação-problema

A evolução tecnológica da modalidade rodoviária com veículos mais pesados e solicitações dos pavimentos cada vez mais acentuadas, principalmente em termos de carga por eixo, pressão dos pneus e tipos de rodagem, tem levado pesquisadores e engenheiros a buscar novas tecnologias que atendam essas solicitações (ODA, 2000). Com isso, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas em diversos países, como Alemanha e Estados Unidos, resultando em novas técnicas, novos materiais e misturas especiais.

Dentre as novas técnicas estudadas, estão as alternativas de pavimentos semirrígidos para atender o tráfego pesado, empregando camada de base cimentada e revestimento asfáltico, sem que ocorra reflexão de trincas para a camada asfáltica.

Segundo Balbo (2006), para evitar a reflexão das trincas da base de BGTC para o revestimento asfáltico, é necessário realizar a prevenção ainda na fase de projeto do pavimento, selecionando as técnicas adequadas para cada caso. É importante ressaltar que não existe uma técnica ideal, pois cada caso deve ser avaliado na ocasião do projeto.

Uma alternativa que tem sido aplicada é o pavimento semirrígido invertido, em que acima da camada de base de BGTC é construída uma camada de Brita Graduada Simples, BGS, que tem a função de atenuar as tensões, evitando a propagação das trincas da BGTC para o revestimento asfáltico.

Outra alternativa é o emprego de misturas asfálticas especiais (SMA ou gap graded) com asfalto modificado por polímero ou borracha moída de pneus, que apresentam baixa rigidez, visando menor absorção de tensões e consequente retardamento da ascensão das trincas de reflexão.

Faça valer a pena

1. O pavimento é uma estrutura em camadas constituída por diferentes materiais. De forma geral, os pavimentos são classificados em: flexíveis, semirrígidos e rígidos. Para selecionar o tipo de pavimento mais adequado devem ser considerados alguns parâmetros do local em que será construído. Quais os parâmetros que devem ser considerados na seleção do tipo de pavimento?

Escolha a alternativa que representa a resposta correta:

- a) Graduação, forma e resistência da mistura asfáltica.
- b) Granulometria, tamanho e resistência dos agregados.
- c) Tráfego, relevo e clima da região.
- d) Rigidez, consistência e viscosidade do material asfáltico.
- e) Largura, inclinação e extensão da faixa de rolamento.

2. O pavimento semirrígido, composto por revestimento asfáltico, base cimentada, sub-base de material granular e reforço do subleito de solo, apresenta uma deformabilidade maior que o pavimento rígido e menor que o flexível. O pavimento semirrígido pode ser do tipo direto, quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre camada de base cimentada, ou do tipo invertido, quando a camada de revestimento é executada sobre uma camada de material granular. Qual é a função da camada de material granular construída entre o revestimento asfáltico e a base cimentada no pavimento semirrígido invertido?

Assinale a alternativa correta:

- a) Auxiliar a propagação das trincas na camada de base.
- b) Evitar a propagação de trincas do revestimento para a base.
- c) Evitar a propagação de trincas da base cimentada para o revestimento.
- d) Aumentar a propagação de trincas no revestimento asfáltico.
- e) Resistir a formação de trincas na base.

3. O revestimento de um pavimento é a camada superficial (de rolamento) que fica em contato direto com as rodas dos veículos. Qualquer tipo de problema, seja funcional ou estrutural, é refletido na camada de rolamento. Infelizmente, é muito comum encontrarmos buracos, trincas e deformações nos pavimentos das vias em que circulamos, seja urbano ou em rodovias. Alguns desses defeitos ficam mais evidentes em dias de chuva, principalmente em decorrência da ineficiência do sistema de drenagem, como, por exemplo, a formação de uma película de água na superfície de rolamento, que pode provocar o fenômeno de aquaplanagem e provocar acidentes. Que tipo de revestimento deve ser executado para evitar problemas de aquaplanagem em dias de chuva?

Analise o texto-base acima e escolha qual das alternativas abaixo é a resposta correta:

- a) Concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ.
- b) Camada porosa de atrito – CPA.
- c) Camada de solo cimento.
- d) Brita graduada tratada com cimento – BGTC.
- e) Brita graduada simples – BGS.

Misturas asfálticas: materiais e dosagem

Diálogo aberto

Na Seção 2.2, você aprendeu que os pavimentos flexíveis podem ser compostos por diferentes tipos de misturas asfálticas, a quente ou a frio, produzidas em usina ou diretamente no campo. No entanto, ainda é preciso saber como definir as características da mistura selecionada, como a composição dos materiais, a temperatura dos materiais e a produção da mistura asfáltica, assim como os parâmetros que devem ser considerados na seleção do tipo de mistura e da espessura da camada do revestimento. Para isso deverá lembrar os conceitos de tráfego e os parâmetros necessários para determinar o número “N” (número de repetições de eixo padrão).

Agora, na Seção 2.3, você vai adquirir conhecimentos que servirão para definir os parâmetros que devem ser considerados na definição da espessura da camada de revestimento. Além disso, aprenderá como determinar a composição da mistura asfáltica por meio do método de dosagem Marshall e quais ensaios devem ser realizados para avaliar a mistura mais adequada.

Vamos retomar aquele projeto em que você atua como engenheiro civil, responsável pela área de infraestrutura de transportes de uma concessionária de rodovias, no desenvolvimento do projeto executivo de pavimento da rodovia SP-2018.

Depois de analisar os parâmetros para definir o tipo de pavimento, sua equipe concluiu que o mais adequado para essa obra é o pavimento flexível. Esse tipo de pavimento possui em sua camada superficial uma capa de rolamento, mais conhecida como revestimento, constituído por uma mistura asfáltica. Para continuar o projeto, você deverá definir as características do revestimento asfáltico que será aplicado, como a espessura e a composição da mistura. Quais os parâmetros que devem ser considerados na definição da espessura da camada de revestimento? Como determinar a composição da mistura asfáltica? Quais ensaios devem ser realizados?

Para complementar, você irá fazer algumas atividades em laboratório para colocar em prática os conhecimentos teóricos adquiridos em sala de aula.

Para isso, traga seu jaleco e mão na massa!

Calibre seu raciocínio, pegue sua calculadora e vamos analisar os resultados de ensaios.

Finalmente números!

Preparados? Vamos lá!

Não pode faltar

Revestimentos

Revestimento ou capa de rolamento é a camada que tem a função de receber diretamente os esforços provenientes do tráfego e transmiti-los às camadas inferiores, deve proporcionar uma superfície de rolamento confortável e segura para o tráfego e impermeabilizar o pavimento, protegendo a estrutura das intempéries (YODER; WITCZAK, 1975).

A seleção do tipo de revestimento deve considerar as características da região onde será executado o pavimento, como relevo e clima, assim como o tráfego (volume por tipo de veículos). Segundo Abeda (2016), no Brasil, mais de 90% das vias foram pavimentadas com revestimento asfáltico na camada de rolamento.

O revestimento asfáltico é composto por uma mistura asfáltica, também denominado de mistura betuminosa ou de concreto asfáltico e até de massa asfáltica. Fora do meio técnico, o revestimento é chamado de “asfalto”. No Brasil, a mistura asfáltica mais empregada nos revestimentos dos pavimentos das vias, de tráfego médio a alto, é o concreto asfáltico (CA), de acordo com a norma 031 ES (DNIT, 2006), mais conhecido por CBUQ, concreto betuminoso usinado a quente. O CA é uma mistura composta de agregados bem graduados, asfalto, material de enchimento (filer), produzida a quente, em usina apropriada, devendo, também, ser espalhada e compactada a quente.

Em rodovias de baixo volume de tráfego, o tratamento superficial (TS) conforme norma 146 ES (DNIT, 2012a), norma 147 ES (DNIT, 2012b), norma 148 ES (DNIT, 2012c), foi muito utilizado em alguns estados, é um revestimento de pequena espessura, executado por espalhamento sucessivo de emulsão asfáltica e agregados, seguido de compactação.

Somente após o desenvolvimento de asfaltos modificados é que algumas misturas especiais começaram a ser aplicadas nos pavimentos brasileiros: stone matrix asphalt (SMA) - norma ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007), gap-graded - norma 112 ES (DNIT, 2009), microrrevestimento asfáltico - norma 035 ES (DNIT, 2005) e camada porosa de atrito (CPA) - norma 396 ES (DNER, 1999a).

De acordo com a disponibilidade dos materiais em cada região do país, outros tipos de misturas também podem ser adotados: pré-misturado a quente (PMQ) para camada porosa de atrito (CPA) - norma 396 ES (DNER,

1999b), areia-asfalto (AA) - norma 032 ES (DNIT, 2004) e pré-misturado a frio (PMF) - norma 153 ES (DNIT, 2010). Areia asfalto é um mistura pouco utilizada, sendo empregada em locais onde existe escassez de agregados para mistura mais nobres. O PMF é mais empregado em serviços de manutenção, como tapa-buracos e remendos.

Vale lembrar que cada tipo de mistura asfáltica apresenta características específicas de materiais, produção e aplicação, que devem ser atendidas de acordo com suas especificações e normas, sendo fundamental o controle tecnológico rigoroso em todas as etapas, desde a produção da massa em usina, como na construção da camada do revestimento.

Espessura do revestimento asfáltico

Segundo Souza (1981), o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER fixa a espessura mínima de revestimento asfáltico que deve ser adotada com o objetivo de proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, assim como evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão. A Tabela 2.1 apresenta as espessuras mínimas recomendadas pelo DNER, em função do tráfego, representado pelo número “N” durante o período de projeto escolhido (SOUZA, 1981).

Tabela 2.1 | Espessura mínima de revestimento asfáltico

N (tráfego)	Espessura mínima de revestimento
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos asfálticos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto asfáltico com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico com 12,5 cm de espessura

Fonte: adaptado de Souza (1981, p.16).

Parâmetros de tráfego e coeficientes estruturais

Um dos principais fatores que influencia no dimensionamento da estrutura do pavimento é o tráfego. As cargas que solicitam o pavimento durante a sua vida em serviço (vida útil) são representadas pela passagem das rodas dos veículos sobre a estrutura. O tráfego que irá solicitar pavimento é representado pelo número “N”, número de operações dos eixos dos veículos, equivalente às solicitações do eixo padrão de 8,2 t durante o período de projeto. Vale lembrar que, para definir o “N”, é preciso obter o volume por tipo de

veículos, considerando as cargas por eixo, assim como o número de eixos correspondentes a cada tipo de veículo, conforme recomendado pelo manual de estudos de tráfego do DNIT (2006). Se as cargas por eixo e o número de eixos não forem considerados, a previsão da solicitação do tráfego será provavelmente imprecisa, podendo causar ruptura do pavimento antes do final da sua vida útil, pois não é possível simular o efeito do tráfego sobre a estrutura do pavimento (DNIT, 2006).

Outro fator que influencia no dimensionamento da estrutura do pavimento é a resistência dos materiais que serão empregados em suas camadas, pois cada material apresenta resistência diferente. Com base nos resultados da pista experimental da AASHO (PAVEMENT INTERACTIVE, 2017), o Corpo de Engenheiros do Exército Americano, USACE (United States Army Corpy of Engineers) definiu os valores de coeficientes estruturais, k , considerando o material granular como padrão, adotando $k = 1,0$. Os diferentes materiais constitutivos do pavimento foram comparados com o material padrão, sendo definidos coeficientes de equivalência estruturais apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 | Coeficientes estruturais dos materiais constitutivos do pavimento

Componentes do Pavimento	Coefficiente k
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento de pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento de pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo-cimento com resistência a compressão a 7dias superior a 45 kgf/cm ²	1,70
Idem, com resistência a compressão a 7dias entre 45 e 28 kgf/cm ²	1,40
Idem, com resistência a compressão a 7dias entre 28 e 21 kgf/cm ²	1,20

Fonte: Souza (1981, p. 15).

Misturas asfálticas e ensaios aplicados

Mistura asfáltica, também chamada de mistura betuminosa, de concreto asfáltico ou até mesmo de massa asfáltica, é composta da mistura de agregados e de asfalto. Geralmente é utilizada na camada superficial de pavimentos rodoviários e aeroportuários (ODA, 2018a).

Segundo o NCHRP (2011), uma mistura asfáltica quando aplicada em camada superficial do pavimento (revestimento ou capa) deve apresentar as seguintes propriedades:

- Resistência à deformação permanente (em temperaturas elevadas): a mistura não deve deformar ou ser deslocada quando submetida às cargas de tráfego.

- Resistência à fadiga: a mistura não deve trincar quando submetida a cargas repetidas de tráfego num determinado período de tempo.
- Resistência a trincas térmicas (a baixa temperatura): a mistura não deve trincar quando submetida a temperaturas baixas; esta propriedade é mais comum em regiões de clima frio.
- Durabilidade: a mistura deve conter asfalto suficiente para garantir uma adequada espessura da película asfáltica em torno das partículas de agregados. A mistura compactada não deve ter vazios muito elevados, pois isso acelera o processo de envelhecimento.

Para produzir misturas asfálticas que atendam a essas propriedades, é fundamental utilizar um método de dosagem, que possibilite a seleção e avaliação de materiais (individualmente e também da mistura de materiais), assim como a definição das proporções de cada material. A metodologia empregada para definir a quantidade de asfalto da mistura asfáltica engloba alguns ensaios essenciais para a dosagem da mistura asfáltica.

- **Agregados:** granulometria; resistência ao desgaste por abrasão Los Angeles ME 383 (DNER, 1998a); densidades real e aparente e absorção ME 081 (DNER, 1998b); adesividade a produtos asfálticos (NBR 12583 (ABNT, 2017a) e NBR 12584 (ABNT, 2017b)).
- **Asfalto:** viscosidade Saybolt Furol para asfaltos puros (NBR 14950 (ABNT, 2003)), viscosidade Brookfield para asfaltos modificados (NBR 15184 (ABNT, 2004)).

Dosagem de mistura asfáltica

O projeto de dosagem tem como objetivo determinar a combinação de agregados minerais e asfalto de forma a produzir uma mistura asfáltica para ser aplicada em camadas de pavimentos flexíveis com as seguintes características (ASPHALT INSTITUTE, 2011):

- Teor de asfalto adequado para garantir a durabilidade do pavimento.
- Estabilidade da mistura para atender as solicitações de tráfego sem se deformar.
- Quantidade de vazios suficiente na mistura compactada para que a compactação final seja executada pelas cargas de tráfego e também pelo aumento de temperatura do pavimento, mas sem ocorrer exsudação ou perda de estabilidade.
- Um volume máximo de vazios para evitar a “infiltração” de ar e de umidade na mistura.

- Trabalhabilidade suficiente para permitir aplicação adequada da mistura, sem que ocorra segregação ou perda de estabilidade e de qualidade.
- Textura do agregado adequada para que o pavimento apresente atrito (resistência à derrapagem) suficiente em condições climáticas desfavoráveis.

Dosagem Marshall

O método de dosagem Marshall foi desenvolvido na década de 30, pelo engenheiro Bruce Marshall e tinha como objetivo determinar a quantidade ótima de asfalto para misturas asfálticas preparadas a quente para fins de pavimentação rodoviária. O método foi adotado, durante a Segunda Guerra Mundial, pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano, USACE (United States Army Corpy of Engineers) para fins de dosagem e controle de qualidade de misturas asfálticas, preparadas a quente, para pavimentação de pistas de aeroportos militares. Os resultados desses testes permitiram associar o desempenho dos pavimentos a determinados valores da estabilidade e da fluência Marshall, criando um novo critério para a avaliação das misturas asfálticas, em que a estabilidade da mistura asfáltica corresponde à medida da capacidade de suportar os carregamentos oriundos do tráfego sem sofrer deformações plásticas (permanentes e irreversíveis). A compactação Marshall emprega um soquete com uma carga de 4,54 kgf e corpos de prova de 100 mm de diâmetro (NHCRP, 2011). No Brasil, a norma ME 43 (DNER, 1995) recomenda que sejam aplicados 50 golpes para pressão de pneu até 7 kgf/cm² (tráfego leve a médio) e 75 golpes para pressão de 7 kgf/cm² a 14 kgf/cm² (tráfego pesado).

Os parâmetros considerados na metodologia Marshall para determinar o teor de projeto (“teor ótimo”) de asfalto são:

- **Estabilidade, E:** é a carga (kgf) sob a qual o CP rompe quando submetido à compressão diametral, ou seja, é resistência máxima do corpo de prova à compressão diametral.
- **Fluência, F:** deformação total apresentada pelo CP de mistura asfáltica, desde a aplicação da carga inicial até a aplicação da carga máxima, expressa em décimos de milímetros ou centésimos de polegada.
- **Densidade máxima possível, d:** garantir máxima estabilidade.
- **Volume de vazios, Vv:** garantir que não ocorra oxidação (envelhecimento) da massa asfáltica pela ação da água e/ou ar, e que também não ocorra exsudação (excesso de asfalto).

- **Relação betume vazios, RBV:** garantir que exista asfalto suficiente e que não ocorra exsudação.

Para determinar o teor de asfalto das misturas asfálticas por meio da metodologia Marshall, devem ser seguidas as normas: ME 43 (DNER, 1995) e NBR 15785 (ABNT, 2010).

Roteiro de dosagem Marshall

a) Seleção da Granulometria

O objetivo da seleção da granulometria é determinar as proporções de cada material, de forma que a mistura desses agregados proporcione uma curva granulométrica que atenda à faixa especificada, incluindo as tolerâncias e considerando que os materiais, individualmente, não satisfazem à especificação da mistura selecionada. A seleção da granulometria da mistura de agregados pode ser feita aplicando um dos diversos métodos analíticos ou gráficos existentes, sendo que o mais comum é o “método das tentativas”, que consiste em determinar por meio de tentativa a quantidade de cada material de forma que a combinação atenda aos limites da especificação selecionada, de acordo com a seguinte equação:

$$P = PA \cdot a + PB \cdot b + PC \cdot c + \dots$$

onde: P = % total de materiais que passam em uma dada peneira da combinação de agregados A, B, C, ...

P_A , P_B , P_C ... = % de material que passa em uma dada peneira de agregados A, B, C, ...

a, b, c, ... = proporções de agregados A, B, C, ..., usados na combinação, de forma que o total seja 100%.

b) Determinação do teor de asfalto provável

Após a definição da curva granulométrica da mistura de agregados, deve-se determinar os teores de asfalto tentativos em torno de um teor provável, que podem ser determinados empregando o método da superfície específica dos agregados, desenvolvido por Duriez. A superfície específica é inversamente proporcional ao diâmetro do agregado: quanto mais fino, maior será a superfície específica e maior o consumo de ligante. No entanto, o consumo cresce em diferentes proporções, pois a espessura do filme asfáltico diminui com o diâmetro do agregado. No Brasil, emprega-se a fórmula de Voigt, adaptação de Duriez, em função das peneiras correspondentes às especificações brasileiras, dada pela equação (ODA, 2018b):

$$S = \frac{0,17 \times G + 0,33 \times g + 2,3 \times A + 12 \times a + 135 \times f}{100}$$

onde:

S = superfície específica do agregado, em m²/kg

G = massa retida na # 9,5 mm

g = massa retida entre as peneiras # 9,5 mm e # 4,75 mm

A = massa retida entre as peneiras # 4,75 mm e # 0,300 mm

a = massa retida entre as peneiras # 0,300 mm e # 0,075 mm

f = massa passada na peneira # 0,075 mm

Após a determinação da superfície específica, deve-se calcular o teor de cimento asfáltico (% de cimento asfáltico, T_{ca}) em relação à massa de agregado mineral empregando a seguinte expressão:

$$T_{ca} = m \sqrt[3]{S}$$

onde: m = módulo de riqueza, de 3,75 - 4,00 para pavimentos rodoviários (adota-se 3,75 quando se exige nas capas de rolamento máxima resistência à deformação por compressão e 4,00 para capas que necessitam ter maior flexibilidade);

A equação (3) considera a densidade dos agregados igual a 2,650. No caso de agregados com densidades diferentes, deve ser feita a correção do teor de cimento asfáltico (T'_{ca}), considerando a massa específica real média dos agregados combinados (G_{sa médio}):

$$T'_{ca} = 2,650 \times \frac{T_{ca}}{G_{sa \text{ médio}}}$$

Com o teor de cimento asfáltico corrigido, calcula-se a teor de asfalto provável (porcentagem de cimento asfáltico, P_{ca}) em relação à mistura:

$$P_{ca} = \frac{100 \cdot T'_{ca}}{100 + T'_{ca}}$$

Após estimar a porcentagem de cimento asfáltico (P_{ca}), devem ser moldados pelo menos 3 corpos de prova (CPs) cilíndricos de 4" (101,6 mm) de diâmetro e 63,5*1,3 mm de altura, com cerca de 1.200 gramas cada, para cada teor de asfalto: P_{ca}, P_{ca} ± 0,5% e P_{ca} ± 1,0%. A moldagem dos CPs, empregando o compactador Marshall, deve seguir a norma NBR 15785 (ABNT, 2010).



Dica

Você poderá saber um pouco mais sobre o método Marshall lendo o texto do item 3.4.2 - Projeto da mistura pelo método Marshall do livro indicado a seguir, que pode ser encontrado na sua biblioteca virtual:

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação Asfáltica** - Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos. Rio de Janeiro – RJ. LTC, 2015.

c) Determinação das temperaturas de mistura e compactação

Vale ressaltar que o principal parâmetro responsável pela qualidade do revestimento composto por uma mistura asfáltica a quente é a temperatura. É fundamental a aplicação das temperaturas adequadas para a produção, aplicação e compactação de misturas asfálticas a quente para que o pavimento seja executado da forma possível que atenda às solicitações de tráfego durante toda sua vida útil. A propriedade utilizada para caracterizar o comportamento dos asfaltos a altas temperaturas é a viscosidade, definida como a relação entre a tensão de cisalhamento aplicada e a taxa de deformação obtida.

No caso de misturas com asfaltos não modificados, os valores recomendados a partir do ensaio executado com equipamento Saybolt-Furol são aqueles correspondentes a viscosidade de 75 a 95 sSF para mistura e de 125 a 155 sSF para compactação e de 170 ± 20 cP para a mistura, e de 280 ± 30 cP para a compactação quando executado ensaio com equipamento Brookfield.

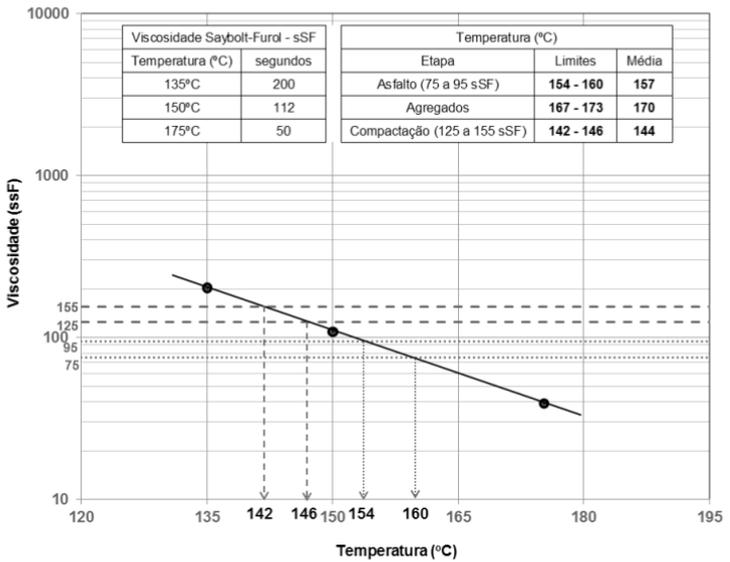
No caso de asfaltos modificados, os intervalos de temperaturas devem ser fornecidos pelo fabricante do produto, uma vez que geralmente não é informada a composição do produto e, dependendo do aditivo, as temperaturas devem ser mais elevadas.



Assimile

A determinação das temperaturas dos materiais (asfalto e agregados), de mistura e de compactação é fundamental para determinar o teor ótimo de asfalto, assim como para atender as propriedades desejadas do revestimento asfáltico. Vale lembrar que a temperatura da mistura é a mesma do asfalto, correspondente à viscosidade Saybolt entre 75 e 95 sSF, enquanto da compactação corresponde à viscosidade de 125 a 155 sSF. A temperatura do agregado deve ser de 10 a 15°C mais alta que a temperatura do asfalto. Para determinar essas temperaturas, é necessário traçar o gráfico viscosidade x temperatura, conforme exemplo apresentado na Figura 2.6.

Figura 2.6 | Determinação das temperaturas de materiais, mistura e compactação



Fonte: elaborada pela autora.

Os materiais e os moldes devem permanecer em estufa nas temperaturas determinadas durante pelo menos 2 horas antes da moldagem.

d) Determinação do teor “ótimo” de asfalto

Após a desmoldagem, os CPs (já frios) devem ser numerados e devem ser determinadas suas dimensões (altura e diâmetro). Em seguida, os CPs devem ser pesados ao ar (seco) e imersos em um recipiente com água para determinação de sua densidade, d , empregando a seguinte equação.

$$d = \frac{M_{ar}}{M_{ar} - M_{água}}$$

onde: M_{ar} = massa do CP ao ar, em g

$M_{água}$ = massa do CP imerso, em g

Antes de ser submetido ao ensaio de compressão diametral, o CP deve ser colocado em banho-maria a 60°C, por 40 minutos. Em seguida, os CPs devem ser levados à prensa Marshall, sendo aplicada uma carga contínua de compressão diametral, a uma velocidade média de 2” (50,8 mm) por minuto, até o seu rompimento.

A carga máxima aplicada que provoca o rompimento do CP representa o valor da estabilidade Marshall (em kgf). A deformação sofrida pelo CP até o momento da ruptura (deformação máxima) é a fluência, definida em 0,01” (centésimo de polegada) ou 0,1 mm (décimo de milímetro).

Em seguida devem ser determinados os outros parâmetros volumétricos dos CPs (ODA, 2018b).

- Densidade máxima teórica, D, para cada teor de asfalto:

$$D = \frac{100}{\frac{\%ag}{d_{ag}} + \frac{\%af}{d_{af}} + \frac{\%f}{d_f} + \frac{\%b}{d_b}} = \frac{100}{\frac{100 - P_{ca}}{d_{am}} + \frac{P_{ca}}{d_b}}$$

onde:

%b = P_{ca} = % de ligante asfáltico, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;

%ag = % de agregado graúdo, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica

%af = % de agregado fino, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica

%f = % de filer, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica

d_b = densidade real do asfalto

d_{ag} = densidade real do agregado graúdo

d_{af} = densidade real do agregado fino

d_f = densidade real do filer

- Volume de vazios (V_v) para cada teor de asfalto:

$$V_v = 100 \times \frac{(D - d)}{D}$$

- Volume de asfalto (V_b) para cada teor de asfalto:

$$V_b = \frac{(d \times P_{ca})}{d_b}$$

- Vazios do agregado mineral (VAM) para cada teor de asfalto:

$$VAM = V_v + V_b$$

- Relação betume vazios (RBV) para cada teor de asfalto:

$$RBV = \frac{100 \times V_b}{VAM} = \frac{100 \times V_b}{V_b + V_v}$$

A determinação do teor de projeto (“ótimo”) de asfalto pode ser feita de diversas formas. Uma das formas é utilizando os parâmetros volumétricos e mecânicos, onde devem ser elaborados gráficos do teor de asfalto versus os parâmetros: E, F, d, V_v e RBV, onde o teor ótimo de asfalto é aquele que atende a todos os parâmetros ($E \geq 750 \text{ kg}$; $8 \leq F \leq 16$; $75\% \leq RBV \leq 85\%$; $3\% \leq V_v \leq 5\%$) e apresente a maior densidade possível. No entanto, no Brasil, atualmente, se utiliza apenas o volume de vazios para determinar o teor ótimo de asfalto.



Exemplificando

Você acabou de receber os resultados da moldagem dos corpos de prova, CPs, de uma mistura do tipo concreto asfáltico, CA, com CAP 50/70, que apresenta densidade, $d_b = 1,02$. Foram moldados 3 CPs para cada teor de asfalto (5,0%; 5,5%; 6,0%; 6,5% e 7,0%). Os resultados da densidade máxima de cada mistura (D), juntamente com os pesos médios dos CPs seco (M_{ar}) e imerso (M_{imerso}), são apresentados na Tabela 2.3. Todos os CPs apresentaram valores de E e F dentro dos limites estabelecidos pela especificação. Considerando apenas o V_v , qual o teor ótimo de asfalto que você escolheria?

Tabela 2.3 | Dados de projeto de uma mistura tipo CA

Teor de asfalto, Pca (%)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Densidade máxima, D	2,456	2,438	2,421	2,403	2,385
Peso seco do CP (g), M_{ar}	1181,9	1182,2	1182,0	1185,9	1180,7
Peso imerso do CP(g), M_{imerso}	673,2	674,9	677,5	681,0	679,5

Fonte: elaborada pela autora.

Inicialmente, precisamos calcular o volume (V) subtraindo o peso do CP imerso do peso CP ao ar, e a densidade aparente (d) dos CPs. Em seguida, empregando as equações citadas anteriormente, vamos determinar os parâmetros d, V_v , V_b , VAM e RBV. Os resultados são apresentados na Tabela 2.4.

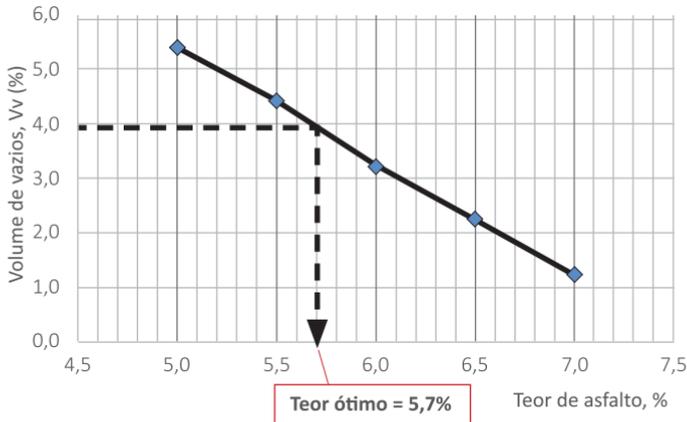
Tabela 2.4 | Determinação dos parâmetros das misturas asfálticas

Teor de asfalto, P_{ca} (%)	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Volume, V (cm ³)	508,7	507,3	504,5	504,9	501,2
Densidade aparente, d	2,323	2,330	2,343	2,349	2,356
Volume de Vazios, V_v (%)	5,4	4,4	3,2	2,3	1,2
V_b (%)	11,4	12,6	13,8	15,0	16,2
VAM (%)	16,8	17,0	17,0	17,2	17,4
RBV (%)	67,8	74,0	81,0	86,9	92,9

Fonte: elaborada pela autora.

Para determinar o teor ótimo de asfalto correspondente ao volume de vazios médio de 4%, vamos traçar o gráfico teor de asfalto x volume de vazios, conforme mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 | Gráfico Teor de asfalto x Volume de vazios



Fonte: elaborada pela autora.

A partir do gráfico da Figura 2.7, podemos concluir que o teor ótimo de asfalto correspondente ao volume de vazios médio de 4,0% é 5,7%

Agora você já conhece os revestimentos asfálticos, os parâmetros para definir a espessura e o tipo de misturas asfáltica mais adequada, além de saber como realizar a dosagem Marshall para definir o teor ótimo de asfalto. Preparado para aplicar esses conceitos na solução de um problema prático? Vamos lá, você já tem conhecimentos suficientes para isso.



Refleta

O teor ótimo de asfalto é determinado em função do volume de vazios da mistura compactada, que deve estar dentro do intervalo recomendado pela especificação técnica correspondente a cada tipo de mistura asfáltica. O que pode acontecer se o revestimento asfáltico apresentar um volume de vazios maior do que o determinado pela especificação?

Sem medo de errar

Na fase anterior do projeto, você percebeu que é fundamental fazer a caracterização e avaliação dos materiais disponíveis para saber se atendem as especificações técnicas e definiu que o tipo de pavimento que será executado é o flexível, que possui uma camada de revestimento composto por uma mistura asfáltica.

Além disso, você teve que coletar dados de tráfego, por meio de uma contagem volumétrica classificatória, considerando os principais parâmetros de tráfego (cargas por eixo e o número de eixos de cada tipo de veículo que irá solicitar o pavimento) a fim de definir o tráfego total, representado pelo “N”, número de operações de um eixo simples de rodas duplas de 8,2 t. Com os dados de tráfego, número “N”, você poderá definir que tipo de revestimento irá executar, assim como a sua espessura, conforme recomendação do DNIT (SOUZA, 1981).

No caso da rodovia SP-2018, em função do número “N”, a mistura que será aplicada no revestimento será um concreto asfáltico, CA, de 7,5 cm de espessura.

Agora, para completar a definição dos materiais constituintes das camadas do projeto executivo do pavimento da rodovia analisada, você terá que determinar as características do concreto asfáltico que será empregado no revestimento do pavimento flexível. Para isso, você deverá fazer uma dosagem usando a metodologia Marshall.

O primeiro passo é determinar a granulometria de agregados, empregando o método das tentativas, em que devem ser determinadas as proporções de cada agregado, que deverá atender a especificação do tipo de mistura asfáltica selecionada.

Em seguida, com a granulometria, você irá determinar o teor provável de asfalto, P_{ca} , por meio do método da superfície específica e deverá moldar 3 CPs para cada um dos teores de asfalto: P_{ca} , $P_{ca} \pm 0,5\%$ e $P_{ca} \pm 1,0\%$. Vale lembrar que, antes de preparar os CPs, você deverá determinar as temperaturas dos materiais, de mistura e de compactação, traçando o gráfico viscosidade x temperatura. Isso é fundamental!

Após a moldagem e desmoldagem os CPs, você terá que determinar os parâmetros volumétricos (densidade aparente, densidade máxima da mistura, volume de vazios, VAM, RBV) para definir o teor ótimo de asfalto, que será adotado na mistura asfáltica que será aplicada no revestimento do pavimento da rodovia analisada.

O teor ótimo deve ser definido considerando o volume de vazios da mistura, $V_v = 4\%$, que é o recomendado para misturas do tipo concreto asfáltico, CA. Para isso, você irá traçar o gráfico teor de asfalto x volume de vazios, para cada teor de asfalto.

Para finalizar, você poderá verificar se os outros parâmetros são atendidos para o teor ótimo de asfalto, analisando os limites estabelecidos na especificação da mistura de CA.

Nesta fase do projeto, você já tem condições de determinar quais as características da mistura selecionada (composição dos materiais, temperatura dos materiais e da produção da mistura asfáltica), assim como os parâmetros que devem ser considerados na seleção do tipo de mistura e da espessura da camada do revestimento. Além disso, você também adquiriu conhecimentos para realizar dosagem de misturas asfálticas empregando a metodologia Marshall para determinar o teor ótimo de asfalto, assim como o método da superfície específica para definir o teor provável de asfalto.

Vamos praticar um pouco mais? Temos um outro problema para resolver sobre a utilização de agregados alternativos em misturas asfálticas especiais. Você já tem conhecimento suficiente para fazer uma análise desse tipo.

Avançando na prática

Utilização de agregados alternativos em misturas asfálticas especiais

Descrição da situação-problema

O avanço da tecnologia no mundo tem levado ao desenvolvimento de caminhões mais modernos, de maiores dimensões e capacidade de cargas, elevando consideravelmente as solicitações dos pavimentos. Sabe-se, no entanto, que os pavimentos da maioria das rodovias não foram dimensionados para atender a essas solicitações durante a vida útil que foi considerada no projeto. Por esse motivo, o governo resolveu lançar editais de licitação, que inclui o projeto e a execução da obra do novo pavimento de algumas rodovias federais, que passarão a ser responsabilidade de concessionárias, para atender a essas solicitações.

Sua empresa acaba de vencer a licitação para realizar o projeto da BR-2018.

Você será o responsável pelo desenvolvimento do projeto de pavimento, sabendo que a estrutura deverá ser composta por um revestimento asfáltico mais resistente, formada por uma mistura especial do tipo SMA ou gap-graded.

Após a análise e levantamento de todas as informações necessárias para o desenvolvimento do projeto, você, juntamente com sua equipe, fez a avaliação de diversas alternativas, concluindo que a mistura asfáltica mais indicada para o revestimento dessa obra é um SMA com asfalto modificado por borracha.

Infelizmente, em várias regiões do Brasil, a escassez dos materiais pétreos (agregados) tem exigido a busca por materiais alternativos que possam ser empregados em misturas especiais para a construção de camadas de revestimentos asfálticos. Você tem participado de eventos na busca por materiais alternativos para empregar em pavimentos e verificou que o agregado reciclado da indústria siderúrgica, mais conhecido como escória, parece ser uma opção, pois apresenta uma alta densidade, por ser resíduo da fabricação de aço. No entanto, para ser aplicado em misturas especiais, esses materiais devem atender às especificações técnicas.

Quais são os ensaios que devem ser realizados para determinar se esse tipo de material pode ser utilizado em misturas do tipo SMA para revestimento asfáltico? Quais os cuidados que devem ser considerados na produção de misturas de SMA com asfalto modificado por borracha para aplicação em revestimento asfáltico ?

Resolução da situação-problema

Vale lembrar que o SMA é uma mistura asfáltica de granulometria descontínua, composta por uma maior fração de agregados graúdos (entre 70% e 85%), uma argamassa (chamada de mastique) formada pela mistura de asfalto, filer (10% passante na peneira N° 200), fibras e asfalto modificado, e 4% de volume de vazios, produzida, aplicada e compactada a quente. Para que o esqueleto mineral, formado pelo contato grão a grão entre as partículas graúdas, apresente alta estabilidade e suporte as cargas exercidas pelo tráfego é fundamental que os agregados graúdos sejam bem resistentes.

A especificação de SMA, de acordo com a Norma ET-DE-P00/031 (DER/SP, 2007), recomenda que a resistência dos agregados graúdos medida pelo ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles seja menor que 30%. Caso isso não seja atendido, as partículas graúdas podem quebrar quando submetidas ao tráfego pesado, provocando o afundamento nas trilhas de rodas e

originando um dos defeitos mais comuns nos pavimentos asfálticos que é denominado de deformação permanente.

Outro aspecto importante é que a granulometria dos agregados deve apresentar pelo menos 10% passante na peneira N° 200 para que possa formar o masticue. Além disso, a escória pode ser expansiva, devendo ser avaliada de acordo com as normas EM 262 (DNER, 1994) e D 4792 (ASTM, 2013).

Portanto, os ensaios que devem ser realizados para verificar se a escória atende à especificação são granulometria, resistência ao desgaste por abrasão Los Angeles e expansão.

Outra característica típica do SMA é que o asfalto tem que apresentar uma maior resistência (representada pela maior viscosidade) e um teor mínimo de 6,0%, devido a maior absorção de asfalto pelos materiais finos que formam o masticue, sendo, portanto, recomendado o uso de asfalto modificado. Em função da viscosidade mais elevada, as temperaturas dos materiais, mistura e compactação são mais altas também, o que pode provocar o escorrimento do asfalto durante o transporte. Para evitar que isso aconteça, recomenda-se adicionar uma fibra.

Portanto, o cuidado na determinação das temperaturas adequadas das misturas asfálticas com asfalto modificado, assim como o seu controle durante todas as etapas de execução, é fundamental para que se construa um revestimento que irá apresentar resistência ao tráfego pesado durante toda a vida útil do pavimento.

Faça valer a pena

1. O método de dosagem Marshall de misturas asfálticas foi adotado pelo Corpo de Engenheiros do Exército Americano na Segunda Guerra Mundial por sua simplicidade e facilidade de execução para construir pavimentos de aeroportos. Esse método ainda é o mais empregado no mundo inteiro. Qual é o principal parâmetro determinado no ensaio Marshall que mede a capacidade da mistura asfáltica de suportar os carregamentos oriundos do tráfego sem sofrer deformações plásticas?

Assinale a alternativa correspondente a resposta correta.

- a) Volume de vazios.
- b) Estabilidade.
- c) Teor de asfalto.
- d) Deformabilidade.
- e) Expansão.

2. O pavimento flexível é uma estrutura em camadas constituído por um revestimento asfáltico na sua camada superficial. A espessura mínima da camada de revestimento é definida pelo DNER em função do tráfego que irá solicitar o pavimento. Qual é o objetivo de fixar a espessura mínima de revestimento asfáltico?

Identifique a alternativa com a resposta correta

- a) Reduzir a vida útil do pavimento flexível.
- b) Acelerar o processo de envelhecimento do revestimento.
- c) Proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego.
- d) Contribuir com a ruptura do revestimento por esforços repetidos de tração na flexão.
- e) Aumentar a formação de deformações plásticas do revestimento asfáltico.

3. Uma mistura asfáltica deve apresentar propriedades adequadas de durabilidade para resistir à formação de defeitos, como deformação permanente, trincas por fadiga e trincas térmicas. O aparecimento desses defeitos pode ser evitado quando a quantidade de materiais (agregados e asfalto) é definida de forma correta e, para isso, é necessário empregar um método de dosagem de mistura asfáltica. O que acontece quando o teor de asfalto empregado na mistura asfáltica for mais baixo do que o necessário?

Indique a alternativa com a resposta correta.

- a) Aumento do volume de vazios e envelhecimento precoce.
- b) Aumento da densidade da mistura asfáltica e, conseqüentemente, maior resistência.
- c) Redução da temperatura necessária para compactação da massa asfáltica.
- d) Aumento da durabilidade, em função da redução de vazios.
- e) Maior resistência à derrapagem, principalmente em dias de chuva.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D4792-13 - Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions, 2013.

ANDRADE, M.H.F. **Introdução à Pavimentação**. Notas de Aulas. TT051 – Pavimentação. UFPR. Disponível em: <http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/MODULO%201%20-%20Introducao.pdf>. Acesso em 29/10/2018.

ASPHALT INSTITUTE. Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types. Manual Series No. 2 (MS-2). Sixth Edition, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12583:2017** - Agregado graúdo - Determinação da adesividade ao ligante betuminoso. Rio de Janeiro, RJ, 2017a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12584:2017** - Agregado miúdo - Verificação da adesividade ao ligante betuminoso. Rio de Janeiro, RJ, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14950:2003** - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15184:2004** - Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional urol. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15785:2010** - Misturas asfálticas a quente - Utilização da aparelhagem Marshall para preparação dos corpos-de-prova com diferentes dimensões e aplicações. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11341:2005** Derivados de petróleo - Determinação do ponto de fulgor em vaso aberto de Cleveland. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12583:1992** Determinação da adesividade a ligante betuminoso de agregado graúdo. Rio de Janeiro, RJ, 1992a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12584:1992** Determinação da adesividade a ligante betuminoso de agregado miúdo. Rio de Janeiro, RJ, 1992b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14950:2003** Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt-Furol de material betuminoso. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15184: 2004** Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6293: 2015** Ligantes asfálticos - Determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6560:2008** Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6576:2016** Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- ASSOCIAÇÃO DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO - ABEDA. Evolução do Mercado. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/mercado/?target=id-4>. Acesso em: 16 out. 2018.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica. Materiais, Projeto e Restauração**. Editora Oficina de Textos. São Paulo, 2007.
- CAPRIGLIONE, L.; BARROS, M. Fluxo de pedestres na Paulista cresce 15%. Cotidiano. **Folha de São Paulo**. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff2501200909.htm>. Acesso em: 13 dez. 2018.
- COELHO, V. **Pavimentação**. Notas de Aula. Curso de Graduação em Engenharia Civil. UNESP – Universidade Estadual Paulista. Bauru, SP, 1991.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES - CNT. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas 2018**. Disponível em: <http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2018/>. Acesso em: 3 out. 2018.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES - CNT. Conheça os 13 principais defeitos do pavimento das rodovias. **Agência CNT de notícias**, 2018. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/conheca-principais-defeitos-pavimento>. Acesso em: 28 out. 2018.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES - CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias**. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>. Acesso em: 1 nov. 2018.
- CORSINI, R. Drenagem Concreta. **Téchné – Seção Projetos**, ed. 176, nov. 2011. Disponível em: <http://techn17.pini.com.br/engenharia-civil/176/artigo286873-2.aspx>. Acesso em: 13 dez. 2018.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DER/SP ET-DE-P00/031** - Concreto Asfáltico Tipo SMA. São Paulo, 2007. P.41. Disponível em: ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-031_A.pdf. Acesso em: 5 nov. 2018.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DER/SP ET-DE-P00-026** - Pré-misturado a quente. São Paulo, 2006. p. 34. Disponível em: <ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-026-A.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - EM 262/94** – Escória de aciaria para pavimentos rodoviários. Norma Rodoviária. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dner-em262-94.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER PRO 263/94** – Emprego de escória de aciaria em pavimentos rodoviários. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/procedimento-pro/dner-pro263-94.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 386/99**. Pavimentação - Pré-misturado a quente com asfalto polímero – Camada porosa de atrito. Norma Rodoviária. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dner-es386-99.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95** - Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall. Norma Rodoviária. Disponível em: http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20043-95.pdf. Acesso em: 5 nov. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 081/98** - Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregados graúdos. Norma Rodoviária. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me081-98.pdf/view>. Acesso em: 5 nov. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 383/99** - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cantabro. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me383-99.pdf/>. Acesso em 05 nov 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 080/94** - Análise granulométrica por peneiramento. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1994. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me080-94.pdf>. Acesso em: 25 out. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 083/98** - Agregados - Análise granulométrica. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1998b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me083-98.pdf>. Acesso em: 25 out 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 089/94** - Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994c. Disponível em: http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20089-94.pdf. Acesso em: 25 out. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 383/98** - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cantabro. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1998c. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me383-99.pdf>. Acesso em: 25 out. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 399/99** - Agregados - Determinação da perda ao choque no aparelho Treton. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1999. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me399-99.pdf>. Acesso em: 25 out. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Rodoviárias: IPR. Publicação IPR 719, ed. 3, p. 274, 200. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em: 3 out. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **Manual de Pavimentos Rígidos**. Publicação IPR -714. Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Rodoviárias: IPR, 2005. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/714_manual_de_pavimentos_rigidos.pdf. Acesso em: 16 out. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **Manual de Pavimentação**. Publicação IPR – 719. Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Rodoviárias: IPR – 719, 2006. ed. 3, p. 274. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em: 16 out. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT . **NORMA DNIT 031/2006-ES:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico. Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2006. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf. Acesso em: 5 nov. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **NORMA DNIT 032/2004-ES:** Pavimentos Flexíveis – Areia Asfalto a quente Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2004. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/normas/download/DNIT032_2004_ES.pdf. Acesso em: 14 nov. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **NORMA DNIT 035/2005-ES:** Pavimentos flexíveis - Microrrevestimento asfáltico a frio com emulsão modificada por polímero. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2005. Disponível em http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit035_2005_es.pdf Acesso em 05 nov 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **NORMA DNIT 112/2009-ES:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” quente Especificação de serviço. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2009. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit112_2009_es.pdf. Acesso em: 5 nov. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **NORMA DNIT 146/2012-ES:** Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Simples com ligante asfáltico convencional. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2012a. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit146_2012_es.pdf. Acesso em: 14 nov. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **NORMA DNIT 147/2012-ES:** Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Duplo com ligante asfáltico convencional. Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2012b. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit147_2012_es.pdf. Acesso em: 14 nov. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **NORMA DNIT 148/2012-ES:** Pavimentação asfáltica - Tratamento Superficial Triplo com ligante asfáltico convencional. Especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2012c. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit148_2012_es.pdf. Acesso em: 14 nov. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **NORMA DNIT 153/2010-ES:** Pavimentos flexíveis – Pré-misturado a frio com emulsão catiônica convencional. Especificação de serviço. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2010. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit153_2010_es.pdf. Acesso em: 5 nov. 2018.

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. **Manual de Estudos de Tráfego.** Publicação 723, p. 384. Rio de Janeiro: IPR, 2006. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em: 14 nov. 2018.

GRAEL, P. F. F.; BEZERRA, B. S. Sistema de Produto para a Avaliação de Ciclo de Vida para Construção de Rodovias. **6th International Workshop Advances in Cleaner Production.** São Paulo, 24-26 maio 2017. Disponível em: http://www.advancesincleanerproduction.net/sixth/files/sesoes/5A/5/grael_and_bezerra_academic.pdf. Acesso em: 29 out. 2018.

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO – IMCYC. **Construcción y tecnología em concreto**. Disponível em: <http://www.imcyc.com/revistacyt/feb11/pavimentos.htm>. Publicado em 2009. Acesso em: 16 out. 2018.

NASSOUR A. C. A roda: a maior invenção tecnológica . **Revista Eletrônica de Ciências**. n. 19, maio/jun. 2003. Disponível em: http://www.cdcc.sc.usp.br/ciencia/artigos/art_19/roda.html. Acesso em: 3 out. 2018.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - NCHRP. **NCHRP Report 673 - A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary**. Transportation Research Board of the National Academies (Estados Unidos da América). Washington: National Academy of Sciences, 2011. Disponível em: <http://dl.icdst.org/pdfs/files/b306d3f6b158fcb10c85362e-ed557b2b.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2018.

NEVES FILHO, C. L. D. **Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas SMA Produzidas com Ligante Asfalto-Borracha**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2004. Disponível em: www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde.../Dissert_NevesFilho_ClaudioLD.pdf. Acesso em: 16 out. 2018.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica do uso de asfalto-borracha em obras de pavimentação**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – EESC/USP. Tese de Doutorado. 251 p., São Carlos, SP, 2000. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-30012018-151928/pt-br.php>. Acesso em: 3 out. 2018.

ODA, S. **Dosagem Marshall**. Notas de Aulas. Disciplina EER551 Pavimentação A. Departamento de Engenharia Transportes da Escola Politécnica da UFRJ, 2018b.

ODA, S. **Notas de Aulas**. Disciplina EER 551 Pavimentação A. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ODA, S. **Pavimentação**. Notas de Aulas. Disciplina DEC712 – Estradas. Grupo de Engenharia de Transportes – GET . Departamento de Engenharia Civil – DEC. Universidade Estadual de Maringá. Disponível em: https://www.academia.edu/6463183/DEC_712 ESTRADAS_PAVIMENTAÇÃO. Acesso em: 7 nov. 2018.

ODA, S. **Revestimentos Asfálticos**. Notas de Aulas. Disciplina EER551 Pavimentação A. Departamento de Engenharia Transportes da Escola Politécnica da UFRJ, 2018a.

PAVEMENT INTERACTIVE. AASHO Road Test. Disponível em: <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/design/structural-design/aasho-road-test/>. Acesso em: 13 dez. 2018.

PESCARINI, T. **Pavimentação de vias urbanas. Infraestrutura Urbana: Projetos, Custos e Construção**. ed. 6, ago. 2011. São Paulo: Editora Pini. Disponível em: <http://infrastrukturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/6/pavimentacao-de-vias-urbanas-227267-1.aspx>. Acesso em: 16 out. 2018.

PINTO, S.; PINTO, I. E. **Pavimentação Asfáltica - Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos**. Rio de Janeiro: LTC, 2015. Disponível em: [https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2916-0/cfi/6/2\[vnd.vst.idref=cover\]!](https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2916-0/cfi/6/2[vnd.vst.idref=cover]!). Acesso em: 16 nov. 2018.

SOUZA, M. L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. IPR - Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Publicação 667, ed. 3. Rio de Janeiro, 1981. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/667_metodo_de_projeto_de_pavimentos_flexiveis.pdf. Acesso em: 14 nov. 2018.

WRI BRASIL. BRT. **Bus Rapid Transit**. Disponível em: <http://wricidades.org/BRT>. Acesso em: 29 out. 2018.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of Pavement Design**. Ed. John Wiley & Sons Inc., 2nd Edition, p. 736, 1975. Disponível em: <http://readofcopy.com/lib/yoder-principles-of-pavement-design-2nd-edition.pdf?web=fullsize.io>. Acesso em: 11 ago. 2018.

Unidade 3

Dimensionamento dos pavimentos

Convite ao estudo

Viajando pelo Brasil, podemos ver diferentes paisagens, como serras, montanhas e florestas com muitas árvores e flores de cores vibrantes. Em muitas regiões, nosso litoral é cercado, de um lado da estrada, por árvores de folhas verdes, e do outro lado, por uma vegetação rasteira e muita areia que leva à imensidão do mar, que pode ser de cor azul ou verde. Por que a água é azul em alguns lugares e verde em outros, se o mar é o mesmo? Por que muda de cor? Será que é por causa da cor da areia? Por que, na mesma região, as paisagens são diferentes? Por que os solos têm cores variadas, marrom, cinza, preto, amarelo? Seria devido à sua composição de minerais? O que essas cores podem indicar? Essas perguntas fazem o nosso instinto de engenheiro aflorar, tentando entender o sentido de tudo isso.

Percorrendo novos caminhos nos deparamos com as estradas de terra, de diferentes solos e cores, de condições nem sempre tão boas. Por que não há pavimento?

Você, recém-formado em Engenharia Civil, foi enviado pela empresa em que trabalha para desenvolver projetos de pavimentos na região norte do Brasil, carente de infraestrutura de transportes, e será responsável pelo projeto executivo dos pavimentos. Para isso, você deverá aplicar os conceitos básicos sobre pavimentação para definir que tipo de pavimento poderá adotar e quais parâmetros definem essa seleção. Você já aprendeu que a camada da base é a que deve apresentar maior resistência, portanto, os materiais devem ser selecionados de forma que atendam às especificações e apresentem adequada capacidade de suporte, definida pelo CBR (California Bearing Rating) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia).

Além disso, será necessário ter conhecimentos mais específicos para desenvolver o projeto do pavimento. Como identificar as características do subleito? Qual é a resistência do solo? Será preciso um reforço do subleito? Como determinar essas características? Que tipo de ensaio deve ser realizado? Que materiais disponíveis na região podem ser empregados nas camadas de base e da sub-base? E se os materiais locais não apresentarem resistência adequada, qual é o custo para importar materiais? Quais são os parâmetros para selecionar os materiais para cada camada? E quando chove, como será o desempenho do pavimento? Como evitar que a água fique empochada e que

a estrada fique alagada? Como deverá ser a drenagem? Quais são os dispositivos necessários para que a água das chuvas escoe e não fique acumulada? Como dimensionar a estrutura do pavimento? Quais são os equipamentos necessários para a execução do pavimento?

Nesta unidade vamos estudar os materiais que podem ser aplicados nas camadas de base e sub-base dos pavimentos, como identificar os materiais adequados empregando o ensaio de CBR ou ISC, assim como os parâmetros para seleção dos materiais para cada camada. Além disso, você vai aprender sobre as camadas constituintes do pavimento, sobre os sistemas de drenagem, sobre os métodos de dimensionamento de pavimentos (flexível e rígido) e sobre os equipamentos usados na construção da estrutura do pavimento.

Portanto, após estudar os conteúdos abordados, você deverá saber selecionar os materiais para as camadas constituintes do pavimento (base, sub-base e reforço do subleito) e dimensionar a estrutura pavimento, além de ter ciência dos principais parâmetros para dimensionar o sistema de drenagem, dos equipamentos necessários e das técnicas para construção das camadas do pavimento.

Ficou curioso? Vamos lá, temos muita coisa para aprender sobre isso! Bons estudos!

Materiais para pavimentação (base e sub-base)

Diálogo aberto

O Brasil é um país de gigante extensão territorial, temos estradas não pavimentadas e diversas rodovias conectando várias regiões e cidades em nosso país. Em algumas regiões, a quantidade de estradas sem pavimento ainda é significativa, o que gera grande dificuldade de movimentação de cargas e de pessoas em períodos de chuva. Dependendo do tipo de solo no local, essas condições podem ficar ainda mais complicadas.

Você, engenheiro civil, foi nomeado na sua empresa como responsável pelo projeto executivo dos pavimentos na Região Norte do Brasil. Sua empresa acabou de ganhar a licitação para desenvolver o projeto de um trecho de 48 km da BR-208, que ainda não tem pavimento.

Sabe-se que, durante o período de chuva, é quase impossível transitar pela estrada sem pavimento. Para desenvolver o projeto, inicialmente, você terá que fazer uma avaliação das condições do subleito do trecho em que será construído o pavimento, por meio de ensaios em campo e no laboratório. Além disso, deverá verificar os materiais disponíveis para as camadas de base, sub-base e reforço do subleito e, caso não sejam adequados, como selecionar os materiais em função dos custos de transportes quando for necessário importar de outras regiões, ou da utilização de aditivos, como cimento ou cal.

Para isso, você identificou a necessidade de realizar sondagens para verificar as características do material do subleito, assim como do nível de água (do lençol freático) e preparou uma planilha indicando a localização e a quantidade de pontos de sondagens para coleta de materiais do subleito. Além disso, solicitou que fosse realizado um reconhecimento da região para determinar os materiais disponíveis para as camadas do pavimento.

Agora você tem que listar os ensaios que devem ser realizados para verificar se os materiais atendem às especificações técnicas e podem ser empregados nas camadas do pavimento. Quais são os ensaios necessários para caracterizar os materiais do subleito? Como devem ser feitas as sondagens? Quais são os materiais disponíveis na região que podem ser empregados nas camadas de base-sub-base? Quais parâmetros devem ser considerados para o uso desses materiais, incluindo os custos?

Para conseguir responder a essas e outras perguntas, vamos fazer uma apresentação sobre os conceitos de geotecnia aplicada à pavimentação, à

capacidade de suporte e à qualidade dos materiais das camadas; a identificação do uso de determinados solos será por meio do ISC e estudaremos também os parâmetros de uso de materiais e estudos econômicos.

Preparado para aprender um pouco mais sobre estes conceitos? Vamos lá?

Não pode faltar

Geotecnia aplicada à pavimentação

O pavimento é uma estrutura em camadas construída sobre o terreno natural denominado subleito. A estrutura é definida no dimensionamento, principalmente, em função das características do tráfego e do material do subleito. Portanto, é fundamental conhecer as características do material do subleito para entender seu comportamento, o que deve ser feito através de estudos geotécnicos, que incluem também a análise de ocorrência de materiais para outras camadas do pavimento.

Segundo o DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006a), o estudo do subleito tem como objetivo o reconhecimento dos solos visando a caracterização das diversas camadas e o posterior traçado dos perfis dos solos para efeito do projeto de pavimentação. O reconhecimento do subleito deve ser realizado de acordo com o Anexo B6 – IS-206 – Estudos Geotécnicos constante nas Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos do DNIT (2006b, p. 273).

Geralmente, o reconhecimento do subleito é feito em três fases (DNIT, 2006b):

- Inspeção expedita no campo através de sondagens superficiais no eixo e nos bordos da plataforma da rodovia para identificação dos diversos horizontes de solos (camadas), em intervalos máximos de 500 m.
- Coleta de amostras para fornecer material para ensaios em laboratório.
- Traçado do perfil longitudinal.

A **sondagem de solo** consiste na investigação ou prospecção do subsolo de um determinado terreno e deve fornecer as seguintes informações (PEREIRA, 2015):

- Espessura de cada camada do solo até a profundidade desejada.

- Existência de água e o nível de água encontrado durante a investigação do solo.
- Profundidade da camada rochosa ou do material impenetrável ao amostrador.
- Propriedades do solo ou da rocha como permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento.

Existem vários métodos de investigação de subsolos, mas o mais comum no Brasil é a sondagem SPT (*Standard Penetration Test*), também conhecida como sondagem à percussão. Por meio dela é possível determinar o tipo de solo atravessado pelo amostrador padrão, a resistência (N) oferecida pelo solo, a cravação do amostrador e a posição do nível de água, se encontrada água durante a perfuração.

Após a realização das sondagens e a inspeção expedita no campo, são realizados os seguintes ensaios com as amostras de solos: granulometria por peneiramento, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), índice de plasticidade (IP), equivalente areia (EA), compactação, massa específica aparente seca máxima in situ, ISC ou CBR e expansão.

A coleta das amostras deve ser feita em todas as camadas que aparecem na seção transversal, de preferência onde a inspeção expedita indicar maiores espessuras de camadas. Para os ensaios de caracterização (granulometria, LL e LP) deve ser coletada uma amostra representativa a cada 100 m ou 200 m de extensão longitudinal de cada camada, e para os ensaios de ISC recomenda-se retirar uma amostra representativa de cada camada a cada 200 m de extensão longitudinal. O número de amostras pode ser aumentado em função da variabilidade dos solos.

A massa específica aparente seca máxima in situ do subleito deve ser determinada em amostras coletadas para o ensaio de compactação e esses valores devem ser comparados com os obtidos em laboratório para determinar o grau de compactação. Para materiais do subleito, o DNIT (2006a) exige um grau de compactação mínimo de 100%, sendo o ISC determinado em corpos de prova moldados nas condições de umidade ótima.

Com os resultados dos ensaios de caracterização são determinados o índice de grupo (IG) e a classe do solo, de acordo com a classificação TRB (*Transportation Research Board*) na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 | Classificação de solos- TRB

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES (35% ou menos passando na peneira Nº 200)							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS (mais 35% passando na peneira Nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7* A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Granulometria - % passando nas peneiras Nº 10 - 2,00 mm	50 máx.										
Nº 40 - 0,42 mm	30 máx.	50 máx.	51 mín.								
Nº 200 - 0,075 mm	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração passando na Nº 40											
Limite de liquidez, %				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice plasticidade, %	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 máx.	11 máx.	10 máx.	10 máx.	11 máx.	11 máx.
Índice de grupo	0	0	0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areia siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

*O IP do grupo A-7-5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT (2006a, p. 56).



Exemplificando

O IG é um número inteiro variando de 0 a 20, que define a capacidade de suporte do subleito de um pavimento, em função das características, como o LL, IP e a granulometria (DNIT, 2006a). Quanto menor o valor de IG, melhor será o solo.

O IG é calculado através da seguinte equação:

$$IG = 0,2 \times a + 0,005 \times a \times c + 0,01 \times b \times d$$

Em que:

a = % de material passante na #200 menos 35 (a varia de 0 a 40);

se a % > 75, adota-se 75; se a % < 35, adota-se 35.

b = % de material passante na #200 menos 15 (b varia de 0 a 40);

se a % > 55, adota-se 55; se a % < 15, adota-se 15.

c = valor do LL menos 40 (c varia de 0 a 20);

se LL > 60%, adota-se 60; se LL < 40%, adota-se 40.

d = valor do IP menos 10 (d varia de 0 a 20);

se IP > 30%, adota-se 30; se IP < 10%, adota-se 10.

Por exemplo, considerando as características dos materiais apresentados na Tabela 3.2, determina-se o IG de cada amostra.

Tabela 3.2 | Caracterização dos materiais

Amostra	Granulometria (% passante)			Índices físicos (%)			Class. TRB	IG
	Nº 10	Nº 40	Nº 200	LL	LP	IP		
1	100	100	25	23	21	2	A-2-4	0
2	100	100	30	25	20	5	A-2-4	0
3	100	100	41	25	21	4	A-4	2
4	100	100	46	27	25	2	A-4	3
5	100	100	55	27	21	6	A-4	4

Fonte: elaborada pela autora.

Para entender como determinar o IG, vamos calcular os valores a, b, c e d da amostra 1, considerando as características dos materiais, LL, IP e granulometria fornecidos na Tabela 3.2.

A amostra 1 apresenta as seguintes características:

- $LL = 23\%$
- $IP = 2\%$
- $\%_{passante \neq 200} = 25\%$

Empregando as condições fornecidas, obtemos os seguintes valores:

$a = \% \text{ de material passante na } \#200 \text{ menos } 35; \text{ se } \% \text{ for } < 35\%, \text{ adota-se } 35.$ Como $a \% \text{ passante} = 25\% \rightarrow a = 35 - 35 = 0$

$b = \% \text{ de material passante na } \#200 \text{ menos } 15 = 25 - 15 \Rightarrow b = 10$

$c = \text{valor do LL menos } 40; \text{ se } LL < 40\%, \text{ adota-se } 40.$ Como $LL = 23\% \Rightarrow c = 40 - 40 = 0$

$d = \text{valor do IP menos } 10; \text{ se } IP < 10\%, \text{ adota-se } 10 \Rightarrow d = 10 - 10 = 0$

Substituindo esses valores na equação do IG, temos:

$$IG = 0,2 \times a + 0,005 \times a \times c + 0,01 \times b \times d$$

$$IG = 0,2 \times 0 + 0,005 \times 10 \times 0 + 0,01 \times 0 \times 0 = 0$$

Portanto, $IG_{amostra1} = 0$.

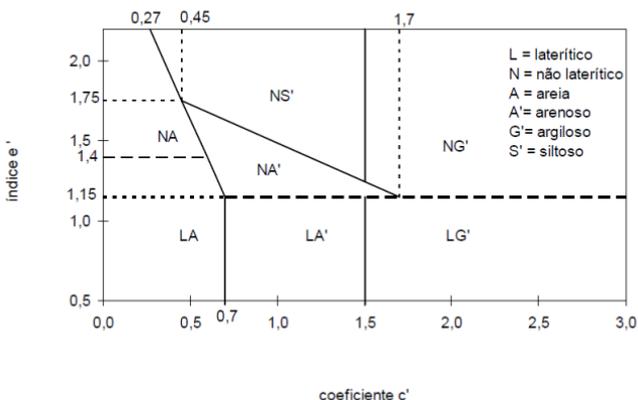
No entanto, vale lembrar que essa classificação foi desenvolvida para países de clima frio e temperado, muito diferentes do Brasil e, muitas vezes, os solos lateríticos, típicos de clima tropical, são considerados inadequados pela classificação do TRB. As principais características dos solos lateríticos são:

- Fração de argila: possui óxidos de ferro e/ou alumínio hidratados, bem como argilominerais (caulinita) que conferem baixa expansibilidade e alta capacidade de suporte quando compactados, não sendo encontrados em solos não lateríticos.
- Fração arenosa: pode conter elevada porcentagem de concreções de resistência inferior à da areia tradicional (essencialmente quartzo). A presença de mica e/ou feldspato reduz a capacidade de suporte

e o índice de plasticidade e aumenta o teor de umidade ótimo e a expansão do solo.

Por esse motivo foi desenvolvida, por Nogami e Villibor (1995), na década de 1980, uma nova classificação de solos para fins rodoviários no Brasil, denominada MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) em que os critérios classificatórios foram relacionados com as propriedades mecânicas e hidráulicas dos solos compactados. Os solos são divididos em duas classes: solos de comportamento laterítico (L) e solos de comportamento não lateríticos (N), de acordo com o gráfico da Figura 3.1.

Figura 3.1 | Gráfico da classificação MCT



Fonte: adaptada de Nogami e Villibor (1995, p. 90).

Os solos são classificados a partir de dois índices, c' e e' , determinados através do ensaio de mini-MCV (mini-Moisture Condition Value) e ensaio de perda de massa por imersão (Figura 3.2):

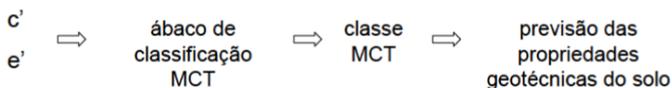
- c' indica a argilosidade do solo e é obtido através do ensaio de mini-MCV.
- e' expressa o caráter laterítico do solo e é calculado mediante a seguinte expressão:

$$e' = \sqrt{\frac{20}{d'} + \frac{P_i}{100}}$$

Em que: P_i = perda de massa por imersão (%).

- d' = inclinação do ramo seco da curva de compactação (kg/m^3).

Figura 3.2 | Esquema de classificação MCT de solos



Fonte: elaborada pela autora.



Dica

Para entender a metodologia MCT, sugerimos o vídeo abaixo, a partir de 11'40":

EGIS. Aula teórica 02: Sistemática MCT. 23 nov. 2017.

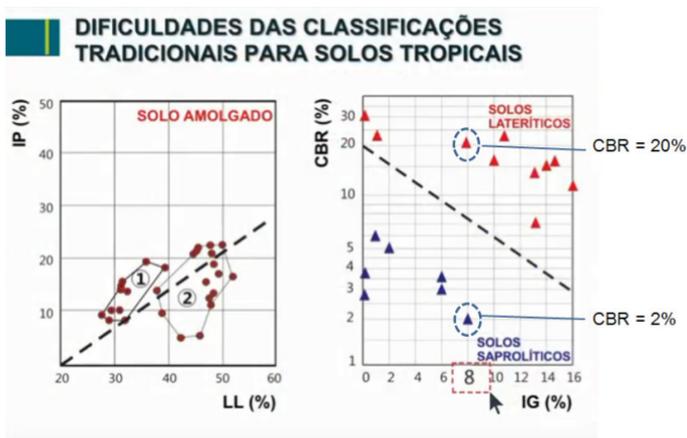


Assimile

Por que foi necessário desenvolver uma nova classificação de solos para fins rodoviários no Brasil?

O Brasil é um país de clima tropical úmido e, com isso, os solos são diferentes dos solos de países de clima frio e temperado. Considerando as diferenças dos materiais, os engenheiros brasileiros identificaram a necessidade de desenvolver uma nova classificação para solos tropicais, pois muitos eram classificados com o mesmo IG, mas apresentavam capacidade de suporte muito diferentes, como pode ser observado na Figura 3.3.

Figura 3.3 | Nova classificação para solos tropicais



Fonte: Villibor (2018).

Isso acontece em função da composição da fração fina de argilas e siltes e do argilomineral, a caulinita cimentada por óxidos de ferro e o alumínio hidratado.

No exemplo, pode-se observar que um solo foi classificado como laterítico, com CBR = 20%, e o outro é saprolítico, com CBR = 2%.

Identificação do uso de determinados solos por meio do ISC

O ensaio para determinar o índice de suporte Califórnia, mais conhecido como ensaio de CBR (*California Bearing Ratio*), foi desenvolvido em 1939 pelo engenheiro O. J. Porter e posteriormente aprimorado pelo United States Corps of Engineers (USACE), com o objetivo de determinar a capacidade de suporte de um solo compactado para ser empregado em projetos de dimensionamento de pavimentos rodoviários (DNIT, 2006a).

Somente em 1966, o ensaio de CBR foi introduzido no Brasil pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza, por ser um ensaio simples e de fácil adaptação à realidade brasileira na época e, em 1981, foi implantado o método de projeto de pavimentos flexíveis pelo DNER, em que o ensaio de CBR é o principal parâmetro considerado. Esse método é conhecido como Método do CBR. O CBR ou ISC é definido como a relação entre a resistência à penetração de um cilindro padronizado em uma amostra do solo compactado e a resistência do mesmo cilindro em uma brita graduada padrão. O ensaio determina também o valor de expansão do solo que permanece imerso em água por quatro dias.



Dica

Para entender como fazer o ensaio de CBR sugerimos o vídeo: TECNOCON ENGENHARIA. Ensaio CBR - Índice de suporte Califórnia - (Moldagem, expansão e penetração). 18 dez. 2017.

Segundo o DNIT (2006a), os materiais do subleito devem apresentar expansão $\leq 2\%$ e ISC $\geq 2\%$. As exigências para os materiais de reforço do subleito, sub-base e base são as seguintes:

- Materiais para reforço do subleito: devem apresentar ISC maior que o do subleito e expansão $\leq 1\%$.
- Materiais para sub-base: devem apresentar ISC $\geq 20\%$, IG = 0 e expansão $\leq 1\%$.
- Materiais para base: devem apresentar ISC $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$, LL $\leq 25\%$ e IP $\leq 6\%$. Caso o tráfego seja $N \leq 5 \times 10^6$, podem ser empregados materiais com ISC $\geq 60\%$.

Capacidade de carga e qualidade dos materiais das camadas

Em pavimentação, a capacidade de carga das camadas do pavimento é conhecida como a sua capacidade de suporte e está diretamente relacionada com as características e a qualidade dos materiais (resistência) empregados na sua estrutura.

Para determinar a capacidade de suporte do material, deve ser empregado o ensaio de ISC, que determina a sua resistência comparando-o com um material padrão, a brita graduada. Além disso, devem ser realizados os ensaios de caracterização do material (granulometria, índices físicos, perda por abrasão Los Angeles, massas específicas, equivalente areia etc.), que foram apresentados na Seção 2.1.

É importante ressaltar que, além da resistência dos materiais, a capacidade de suporte depende da composição granulométrica desses materiais e da qualidade da compactação durante a execução da camada. Portanto, é fundamental o controle tecnológico de execução das camadas, que deve atender, principalmente, à especificação técnica quanto à umidade e ao grau de compactação (GC), que é a relação entre a massa específica determinada em campo (γ_{Scampo}) e a massa específica máxima determinada em laboratório ($\gamma_{Smáx.laboratório}$). O valor recomendado para as camadas de base, sub-base e reforço do subleito é de $GC \geq 100\%$ (DNIT, 2006a).

Para determinar a massa específica em campo deve ser empregado o método do frasco de areia, norma ME 092 (DNER, 1994a), e para determinar a umidade higroscópica em campo pode ser empregado o método conhecido como Speedy Test, de acordo com a norma ME 052 (DNER, 1994b).

Além do Speedy, outra forma simples de determinar a umidade muito empregada no meio rodoviário é conhecida como método da frigideira. Esse método consiste em colocar uma pequena porção de solo úmido, pesada previamente, em uma frigideira que, por sua vez, é colocada sobre uma fonte de calor (fogareiro). Com o auxílio de uma espátula, mistura-se a amostra suavemente até que a água evapore. Para certificar-se de que a água evaporou, deve-se colocar uma placa de vidro sobre a frigideira e observar se existe vapor se formando na placa. Caso não forme o vapor, a amostra está seca. Em seguida, pesa-se a amostra. Para determinar a quantidade de água, calcula-se a diferença entre o peso inicial e o peso final da amostra. Com esse valor, determina-se o teor de umidade da amostra de solo.



Dica

Para saber como é feito o ensaio de massa específica em campos pelo método do frasco de areia, sugerimos o vídeo abaixo:

SANDRO MATOS. Densidade in situ. 11 fev. 2014.

Sobre o ensaio de determinação da umidade em campo, sugerimos o vídeo:

SANDRO MATOS. Umidade Higroscópica. 28 mar. 2015.

Para entender como deve ser realizado o ensaio de determinação da umidade pelo método Speedy, sugerimos o vídeo:

TÉCNICO EM EDIFICAÇÕES DE SINOP. Determinação do grau de umidade dos agregados por método expedito rápido (Speedy). 16 ago. 2016.

Parâmetros de uso de materiais e estudos econômicos

A seleção dos materiais para compor a estrutura do pavimento depende do tipo de pavimento que será construído, escolhido em função de alguns parâmetros, como o tráfego e as características da região (clima, relevo, resistência do material do subleito etc.).

Antes da elaboração do projeto do pavimento, é fundamental realizar um reconhecimento do subleito e da região (estudo de ocorrências) onde será construída a rodovia, para que sejam identificadas as jazidas de materiais disponíveis que poderão ser empregados nas camadas do pavimento. Para que os materiais possam ser empregados em obras de pavimentação, devem atender às normas e especificações técnicas quanto à granulometria, aos índices físicos (LL e IP) e à capacidade de suporte (ISC e expansão).

Muitas vezes, um material puro não apresenta características adequadas, necessitando realizar a mistura com outros materiais granulares ou com aditivos, para que seja possível atender às especificações, principalmente quanto à capacidade de suporte (resistência).

A seleção do produto que será misturado (solo, brita ou aditivo) depende de alguns parâmetros, como o tráfego que solicitará o pavimento, e das características e da disponibilidade do material que será utilizado na mistura. Caso o material tenha que ser importado de outra região, o custo de transporte deverá ser considerado na tomada de decisão sobre o tipo de mistura que será adotado, pois em alguns casos a seleção de outra alternativa, como o uso de aditivos, pode tornar mais viável do que o transporte de grandes volumes de materiais de regiões distantes. Porém, vale lembrar que o uso de materiais com aditivos também implica em um custo adicional. Portanto, quando for necessário realizar a mistura de materiais, é essencial estudar alternativas técnicas e econômicas para definir o tipo de mistura a ser adotado.



Refleta

Durante a elaboração do projeto de um pavimento surgiu uma dúvida sobre qual alternativa seria mais viável. As jazidas existentes na região onde será construída a rodovia apresentam materiais para camada de base que não atendem aos limites de capacidade de suporte (ISC ou CBR) estabelecidos pela especificação técnica. Após uma análise foram definidas duas alternativas: 1) Importar material de outra jazida localizada a 140 km de distância do local da obra; 2) Fazer a mistura do solo local com cimento (solo cimento com teor de 10% de cimento).

Sabendo-se que o tráfego que vai solicitar o pavimento é considerado pesado, o que deve ser considerado na seleção da melhor alternativa?

Até agora você já conheceu os materiais que podem ser empregados nas camadas de base e sub-base, já sabe como realizar o reconhecimento dos materiais do subleito e de jazidas próximas ao local da construção da rodovia. Além disso, também já aprendeu como selecionar os materiais mais adequados, considerando a capacidade de suporte determinada pelo ISC e os parâmetros de custos. Desta forma, já cumpriu mais uma fase do seu processo de aprendizagem. Já sabe caracterizar os materiais a partir de ensaios de granulometria, LL, IP e ISC e, na próxima etapa, vai aprender um pouco mais sobre cada camada do pavimento (base, sub-base e reforço do subleito) e o que deve conter um sistema de drenagem.

Que tal agora resolvermos um problema sobre seleção de materiais para o pavimento?

Sem medo de errar

Você ficou responsável pelo desenvolvimento do projeto de pavimento do trecho da BR-208. Para elaborar o projeto, inicialmente você deverá coletar informações sobre a região e, para isso, começará fazendo um reconhecimento do subleito, por meio de ensaios em campo e coleta de amostras de materiais para realizar ensaios em laboratório.

O reconhecimento do subleito será realizado através de sondagens à percussão, SPT, para verificar as características dos solos, assim como do nível do lençol freático. Para determinar a quantidade de pontos de sondagens, você deve seguir o Anexo B6 – IS-206 – Estudos Geotécnicos constante nas Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos do DNIT (2006b, p. 273).

Para estudo do subleito, o DNIT (2006b) recomenda que, ao longo do eixo do traçado, as sondagens sejam executadas em intervalos de no máximo

500 m, localizadas de forma que se tenha no mínimo uma sondagem representativa em cada corte. As sondagens devem atingir a profundidade de 1 m abaixo do greide do projeto geométrico, e as amostras coletadas em cada furo, nos diversos horizontes de material, devem ser levadas ao laboratório para que sejam submetidas aos ensaios de caracterização (índices físicos e granulometria), compactação e ISC.

Para realizar as sondagens, você deve seguir a norma NBR 6484 - Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio (ABNT, 2001). O boletim de sondagem deverá conter as seguintes informações: estaca, posição do furo, profundidades de início e fim do horizonte coletado e classificação expedita do material. Para verificar o nível de água (NA), as sondagens deverão ser realizadas nos cortes, sendo, no mínimo, três furos, um em cada ponto de passagem (PP) e o outro no meio do corte, todos até a profundidade de 1,50 m abaixo da cota do subleito.

Além do reconhecimento do subleito, você também solicitou que fosse realizado um estudo da região para determinar se existem jazidas de materiais que possam ser empregados nas outras camadas do pavimento. Como resultado, você deverá elaborar um relatório contendo os croquis com a indicação das características e a localização das ocorrências de materiais (incluindo endereço, distância ao eixo da rodovia, condições de acesso etc.), indicando os furos com os respectivos números, as áreas de materiais aproveitáveis, bem como os perfis dos solos correspondentes com as espessuras de material aproveitável. No relatório também deverá ser apresentado um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização e as curvas granulométricas dos materiais.

No caso de ocorrência de solos devem ser realizados os seguintes ensaios: granulometria por peneiramento, limite de liquidez, limite de plasticidade, equivalente de areia, ensaios de compactação, ISC e massa específica in situ.

No caso de ocorrência de materiais pétreos (em pedreiras), devem ser realizados os seguintes ensaios: perda por abrasão Los Angeles, granulometria, massas específicas (real e aparente), absorção, adesividade, durabilidade e índice de forma. Após a análise de todos os resultados dos ensaios e também da localização das ocorrências, você selecionará os materiais que atendem às especificações para desenvolver o projeto do pavimento.

No caso de não existir materiais “puros” que atendam às especificações, você poderá analisar alternativas de mistura de materiais, de preferência, por meio de estabilização granulométrica e, quando necessário, do uso de aditivos. No caso de aditivos, será necessário verificar quais são os produtos disponíveis e determinar o custo final da mistura. Outra alternativa a considerar é a possibilidade de importar de regiões mais distantes solos ou britas que atendam às especificações, mas para isso deverá analisar a viabilidade

técnica e econômica, considerando a distância de transporte para determinar o custo total.

Com os resultados obtidos nas sondagens e dos ensaios realizados em laboratório, você já está pronto para começar o projeto do pavimento.

Avançando na prática

Pavimento de baixo custo com base de solo laterítico

Descrição da situação-problema

Durante o estudo do subleito da BR-2018, você fez a caracterização dos materiais por meio de ensaios em laboratório e aplicou a classificação do TRB (Transportation Research Board) para verificar o comportamento do subleito. É possível observar que alguns solos foram classificados como não adequados para o subleito (“sofrível a mau”). Para evitar a troca do material sem necessidade, o que iria gerar um custo elevado, uma vez que teria que importá-lo de outras regiões, você resolveu aplicar a metodologia MCT para solos de clima tropical, pois alguns materiais apresentavam características de solos lateríticos, como a cor e a resistência. Os resultados mostraram que os solos eram lateríticos e poderiam ser aplicados nas camadas do pavimento. Por que a classificação de solos do TRB indicou um solo não adequado para a pavimentação, enquanto a classificação MCT mostrou que os solos são adequados?

Resolução da situação-problema

Durante muitas décadas, o Brasil adotou a classificação de solos para fins rodoviários, desenvolvida pelo TRB para países de clima frio e temperado, muito diferente do clima brasileiro. Com isso, muitos solos tropicais foram descartados, pois eram considerados como “sofrível a mau” nessa classificação. O solo tropical, típico de regiões de clima tropical úmido, como o Brasil, é aquele em que a fração fina composta por argila e silte apresenta como argilomineral a caulinita revestida de óxido de ferro e alumínio.

O solo laterítico apresenta uma variação granulométrica, em função da composição da fração fina e, com isso, os valores de LL e IP apresentam variação para um mesmo solo. A principal característica do solo arenoso fino laterítico é que, quando compactado, apresenta uma excelente capacidade de suporte e baixa expansão em presença de água, por causa da cimentação natural da caulinita com os óxidos de ferro e alumínio. Em função da alta

capacidade de suporte do material, o solo laterítico tem sido muito indicado para uso em camadas de base de pavimentos, fazendo com que o custo do pavimento seja menor.

Faça valer a pena

1. Os pavimentos devem ser dimensionados considerando as características do subleito e dos materiais disponíveis para a construção das outras camadas. Qual é o principal ensaio que deve ser realizado para determinar a capacidade de suporte desses materiais?

Selecione a alternativa com a resposta correta.

- a) Granulometria.
- b) Índice de Suporte Califórnia.
- c) Limite de Plasticidade.
- d) Equivalente de Areia.
- e) Absorção.

2. Antes de elaborar o projeto de pavimento, é necessário realizar o reconhecimento do subleito e do local onde será construída a rodovia. Esse reconhecimento geralmente pode ser efetuado por meio de diversos métodos. Qual é o método mais empregado no reconhecimento do subleito?

Indique a alternativa com a resposta correta.

- a) Levantamento aerofotogramétrico.
- b) Sondagem à percussão.
- c) Levantamento topográfico.
- d) Estudo hidrológico.
- e) Caracterização reológica dos materiais.

3. Os resultados dos ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC) das 10 amostras coletadas nos pontos de sondagens do subleito apresentaram os seguintes valores: ISC1=5%; ISC2=3%; ISC3=7%; ISC4=5%; ISC5=9%; ISC6 =7%; ISC8=3%; ISC9=5% e ISC10=4%. Se tivesse que escolher apenas um valor, qual você definiria como ISC do subleito (ISC_{subleito}) e quanto deveria ser o ISC do material para reforço do subleito ($ISC_{\text{reforço}}$)?

Selecione a alternativa com a resposta correta.

- a) $ISC_{subleito} = 3\%$ e $ISC_{reforço} \leq 3\%$.
- b) $ISC_{subleito} = 3\%$ e $ISC_{reforço} \geq 4\%$.
- c) $ISC_{subleito} = 5\%$ e $ISC_{reforço} \geq 2\%$.
- d) $ISC_{subleito} = 9\%$ e $ISC_{reforço} \leq 3\%$.
- e) $ISC_{subleito} = 5\%$ e $ISC_{reforço} \leq 3\%$.

Camadas constituintes e sistemas de drenagens

Diálogo aberto

Permitir o escoamento da água de forma rápida nas rodovias é fundamental para evitar acidentes, garantir a segurança dos usuários e aumentar a durabilidade do pavimento.

Após a realização das sondagens, da coleta e da caracterização de materiais, você poderá selecionar os materiais que serão aplicados em cada camada do pavimento (base, sub-base e reforço do subleito), a partir da comparação com as resistências exigidas pelas especificações correspondentes às diferentes camadas. Para facilitar essa comparação, será necessário preparar uma planilha com os dados desses materiais para elaborar o projeto do pavimento. Quais dados devem constar no arquivo?

Vale lembrar que, antes de dar andamento ao projeto, você terá que definir o tipo de pavimento que será adotado, em função do tráfego e das condições climáticas, considerando que, no local, o período de chuva é longo, por isso, é fundamental a implantação de um sistema de drenagem muito eficiente. Portanto, você terá que verificar, antes de desenvolver o projeto do pavimento, os materiais que atendem às especificações técnicas quanto à qualidade (resistência) para serem empregados em cada camada do pavimento. Além disso, deverá ter respostas para elaborar o sistema de drenagem da estrada: quais parâmetros e dispositivos precisam ser considerados em um sistema de drenagem que atenda, de forma eficiente, ao tipo de pavimento selecionado?

Para que você tenha condições de responder a essa pergunta, nesta seção, vamos estudar os conceitos relacionados à capacidade de carga e à qualidade dos materiais das camadas, base e sub-base de pavimentos, leito e reforço de subleito de pavimentos e sistemas de drenagem superficiais e subterrâneos.

Vamos lá, temos muita coisa para aprender.

Não pode faltar

Apresentação dos principais materiais

Os principais tipos de materiais empregados nos pavimentos são compostos por granulares, puros ou com aditivos. Geralmente, quando um

material puro não atende às especificações, tanto de granulometria quanto de resistência, é necessário realizar a mistura com outro produto, que pode ser outro material granular (solo ou britas) ou até aditivos, como cimento, cal, asfalto etc. Independentemente do tipo de pavimento, a estrutura sempre terá uma camada de base, considerada a mais importante, por ser a camada com material mais resistente e que suporta as solicitações do tráfego. Os materiais utilizados na camada da base podem ser puros (britas e solos), mistura de dois ou mais materiais (solo-brita etc.) ou com aditivos (solo cimento, solo cal, solo betume etc.). A recomendação do DNIT (2006a) é que o material ou a mistura de materiais para a base apresente $ISC \geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$. No entanto, para tráfego leve ($N \leq 10^6$), $ISC \geq 60\%$ e expansão $\leq 0,5\%$.

A camada de sub-base pode ou não existir e tem a mesma função da base em pavimentos flexíveis. No caso de pavimentos rígidos, a sub-base é executada para evitar que o material do subleito fique em contato direto com a placa de concreto, que tem a função de base e revestimento. Os materiais utilizados na camada de sub-base podem ser os mesmos que os empregados na camada de base e devem apresentar $ISC \geq 20\%$.

Base e sub-base de pavimentos

Segundo a classificação do DNIT (2006a), as bases e as sub-bases podem ser flexíveis ou semirrígidas e são divididas de acordo com o Quadro 3.1.

Quadro 3.1 | Classificação de bases e sub-bases flexíveis e semirrígidas



Fonte: DNIT (2006a, p. 96).

Para melhorar as propriedades dos materiais sem uso de aditivos, pode ser empregado o processo de estabilização granulométrica, que é a mistura de solos ou britas com o objetivo de obter um produto final com

granulometria apropriada e maior capacidade de suporte (resistência). Os principais materiais utilizados na estabilização granulométrica são: solos, britas de rochas, escória de alto forno, ou ainda, resíduos da construção civil. Os principais produtos obtidos da estabilização granulométrica são: o solo-brita, os macadames e a brita graduada simples (BGS).

Outro tipo de material sem aditivo empregado em camadas de base e sub-base é o macadame hidráulico, que consiste em uma camada de brita de graduação aberta que, após a compactação, tem os vazios preenchidos por material fino obtido de britagem (pó de pedra) ou por solos de granulometria apropriada. A penetração do material fino é obtida pela compactação (sem ou com vibração) realizada após o espalhamento do material na superfície, seguido de molhagem, no caso, de macadame hidráulico. O macadame seco não necessita de irrigação, o que evita o encharcamento do subleito, simplificando o processo de construção.

Um material muito utilizado em base de pavimentos de baixo volume de tráfego é o solo arenoso fino laterítico (SAFL), constituído por solo de graduação fina, com uma fração de mais de 50% retida na peneira de abertura 0,075 mm, composto por areia de grãos de quartzo. Os solos empregados nas camadas de base de SAFL podem ser pertencentes aos grupos LA, LA' e LG' da classificação MCT e, quando compactados adequadamente, apresentam alta capacidade de suporte e estabilidade (NOGAMI & VILLIBOR, 1995).

Os principais materiais com aditivos são descritos em seguida (DNIT, 2006a).

Solo-cimento: é uma mistura de solo, cimento Portland e água, que deve satisfazer aos requisitos de densidade, durabilidade e resistência definidos nas especificações. O teor de cimento recomendado varia de 6 a 10% e a mistura obtida deve apresentar uma acentuada rigidez à flexão.

Solo melhorado com cimento: este tipo de mistura é obtido com a adição de pequeno teor de cimento (2 a 4%) e tem como finalidade modificar o solo quanto à sua plasticidade e sensibilidade à água, sem cimentação acentuada.

Solo-cal: é uma mistura de solo, cal (teor variando de 5 a 6%) e água e, às vezes, cinza volante, uma pozolana artificial. O processo de estabilização ocorre por carbonatação ou por pozolanização, que é uma cimentação fraca e forte, respectivamente.

Solo melhorado com cal: é uma mistura de solo, cal e água que melhora a textura e a estrutura dos solos, melhorando a plasticidade e a sensibilidade à água e aumentando a resistência mecânica.

Solo-betume: é uma mistura de solo, água e material asfáltico (emulsão asfáltica).

Subleito e reforço de subleito de pavimentos

O subleito é o terreno natural que vai receber a estrutura do pavimento. Segundo o DNIT (2006a), o estudo do subleito é a primeira etapa que deve ser realizada antes de iniciar o projeto do pavimento. Esse estudo tem como objetivo realizar o reconhecimento dos solos, a caracterização das diversas camadas e o posterior traçado dos seus perfis para auxiliar no projeto. A recomendação do DNIT (2006a) é que o material do subleito deve apresentar as seguintes características:

- Limite de liquidez, $LL \leq 25\%$.
- Índice de plasticidade, $IP \leq 6\%$.
- Equivalente de areia, $EA \geq 30\%$.
- Índice de suporte Califórnia, $ISC \geq 2\%$.
- Expansão $\leq 2\%$.

No caso de o material do subleito apresentar $ISC \leq 2\%$, recomenda-se que seja feita substituição de pelo menos 1 m de profundidade por um material com $ISC > 2\%$ (DNIT, 2006a). Geralmente, quando o subleito apresenta baixa capacidade de suporte, é necessário construir acima dele um reforço do subleito, que consiste em uma camada de material granular (solos locais, disponíveis nas regiões próximas à obra) devidamente compactada e regularizada.

Os materiais para o reforço, após compactados, devem apresentar capacidade de suporte (resistência) superior ao do subleito, devendo atender à especificação técnica da norma 138-ES (DNIT, 2010b). Vale lembrar que, para o controle tecnológico em campo, devem ser realizados os ensaios de umidade higroscópica e massa específica aparente seca in situ para determinar o grau de compactação da camada.

Em alguns casos, antes de executar o reforço, é necessário fazer a regularização do subleito, que tem como objetivo apenas nivelar a superfície transversal e longitudinalmente, obedecendo às larguras e cotas constantes das notas de serviço do projeto de terraplenagem. A regularização não é considerada uma camada de pavimento, uma vez que a espessura pode ser variável, pois pode ser apenas uma operação de raspagem. Para execução da regularização, devem ser atendidas as exigências constantes na especificação de serviços da norma 137-ES (DNIT, 2010a).

Vale ressaltar que o pavimento só terá desempenho adequado se tiver um sistema de drenagem que evite que a água das chuvas infiltre para camadas inferiores ou fique acumulada sobre a sua superfície. Se a água atingir as camadas inferiores e elas não apresentarem resistência à variação de umidade, pode desestabilizar a estrutura, provocando afundamentos e, em casos mais graves, até a ruptura do pavimento. Segundo o DNIT (2006), a falta de um sistema de drenagem eficiente pode provocar os seguintes efeitos prejudiciais ao pavimento:

- a) Redução da capacidade de suporte do subleito, em função de sua saturação, podendo ocorrer também expansão do solo.
- b) Bombeamento de finos de solo do subleito e materiais granulares das outras camadas, com redução de capacidade de suporte do pavimento.
- c) Arrastamento de partículas dos solos e de materiais superficiais, em função da velocidade do fluxo de água.

Sistemas de drenagem superficiais e subterrâneos

A água é considerada o maior inimigo do pavimento, portanto, é fundamental que, junto com ele, deve ser construído um sistema de drenagem extremamente eficiente. Segundo o DNIT (2006a), o principal objetivo da drenagem de uma rodovia é eliminar a água que, sob qualquer forma, possa atingir a via, captando-a e conduzindo-a para locais que não afetem a segurança e durabilidade do pavimento. De forma geral, “um sistema de drenagem consiste de um conjunto de operações e instalações destinadas a remover os excessos de água das superfícies e do solo” (DER, 2008, p. 3).

A água que cai sobre a superfície do pavimento, proveniente das chuvas e também dos lençóis subterrâneos, deve ser escoada para fora o mais rápido possível por meio da drenagem superficial, e a água que infiltra deve ser retirada através da drenagem subterrânea, de forma a evitar que os materiais das camadas do pavimento e do subleito sofram grandes variações de teor de umidade e, conseqüentemente, de capacidade de suporte, durante toda a vida útil.

Segundo o DNIT (2006b), a água da chuva atravessa o revestimento asfáltico em uma taxa variando de 33 a 50% e de 50 a 67% no revestimento de concreto de cimento, o que pode causar sérios danos à estrutura do pavimento, inclusive à base e à sub-base, se o sistema de drenagem não for eficiente e houver o acúmulo de água.



Assimile

Os sistemas de drenagem superficial devem ser dimensionados para coletar e redirecionar o fluxo de água precipitada sobre o pavimento da rodovia para uma área segura de deságue. No projeto é muito importante avaliar a velocidade das águas. Fluxos intensos podem causar a erosão do talude ao redor da rodovia, comprometendo a segurança e infraestrutura do pavimento. Tão importante quanto construir de forma adequada os elementos que compõe o sistema de drenagem é efetuar as manutenções preventivas. Realizar com frequência desentupimentos, consertos, remendos e desobstrução de vertedouros são atividades que fazem parte da manutenção do sistema de drenagem superficial (QUINALIA, 2005).

De acordo com o DNIT (2006b), para evitar problemas, existem alguns dispositivos de drenagem que podem ser utilizados:

- Camada drenante: composta por material granular, deve ser construída abaixo do revestimento, asfáltico ou de concreto de cimento, com o objetivo de drenar a água infiltrada para fora da camada de rolamento.
- Dreno raso longitudinal: recebe a água que passa pela camada drenante, conduzindo-a longitudinalmente para fora da estrada.
- Dreno lateral de base: tem a função de coletar e retirar para fora as águas infiltradas na camada de base. Deve estar localizado entre a borda livre do acostamento e a borda da camada drenante, fazendo com que o material drenado passe a escoar junto à base do acostamento até os drenos laterais, que vão conduzir a água para desaguar em local seguro.
- Dreno transversal: deve ser posicionado transversalmente à pista de rolamento em toda a largura da plataforma. Localiza-se em pontos baixos das curvas verticais e em locais onde pode ocorrer o acúmulo de água não drenada pelos demais drenos.



Dica

Para saber como dimensionar os dispositivos de drenagem, sugerimos ver as páginas 212 a 229 do seguinte material: DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE – DNIT. **Manual de Drenagem do DNIT**. Rio de Janeiro, RJ, Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. Publicação IPR, 2. ed., 304 p., 2006a.

Para evitar que a água que atravessa a rodovia prejudique e comprometa a estrutura do pavimento, recomenda-se a instalação de bueiros sob os aterros e também a construção de pontes ou pontilhões para transpor os cursos de água que escoam pelos talwegues (DNIT, 2006a).

Bueiro: é uma estrutura empregada para possibilitar a passagem de pequeno volume de água, sendo que as bacias devem ter área inferior a 40 km². Pode estar localizado sob os aterros (para realizar a transposição dos talwegues), nas bocas dos cortes (para evitar a erosão) e nos cortes (quando o volume de água é maior do que a capacidade das sarjetas) (DNIT, 2006a).

Pontilhões: são pontes de pequenas dimensões (vãos de 3 até 10 metros) adotadas quando não é possível construir bueiros para transposição de cursos d'água de médio porte (DNIT, 2006a).

Ponte: é uma obra de arte especial construída para transpor a água que não pode ser transposta por bueiros ou pontilhões. O dimensionamento de uma ponte deve levar em consideração os custos, a vida útil e principalmente a segurança dos usuários (DNIT, 2006a).

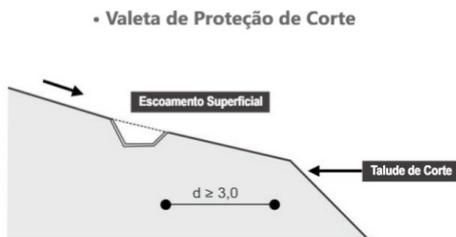
O objetivo da drenagem superficial de uma rodovia é interceptar e captar a água que se precipita sobre o corpo estradal, proveniente de suas áreas adjacentes, mantendo a segurança e a estabilidade da estrutura do pavimento até um local de deságue seguro. Os dois principais dispositivos de drenagem do pavimento são os seguintes (DNIT, 2006a):

- a) Sarjeta: serve para coletar as águas da chuva que correm pelo leito estradal e pelos taludes, conduzindo-as até as caixas coletoras ou para fora do corte.
- b) Meio-fio e/ou banquetas: dispositivo construído junto ao bordo da plataforma dos aterros, com a função de conduzir a água da chuva para a saída de água, impedindo a erosão da plataforma e dos taludes de aterros.

No entanto, em função das características da rodovia, um sistema de drenagem superficial precisa de outros dispositivos para conseguir evitar que a água prejudique o pavimento, podendo ser composto pelos seguintes dispositivos:

- Valeta de proteção de corte: intercepta a água que escoar à montante do talude de corte, evitando que ocorra a saturação do solo, provocando a ruptura do talude, o que poderia ocasionar danos à rodovia e até acidentes (Figura 3.4).

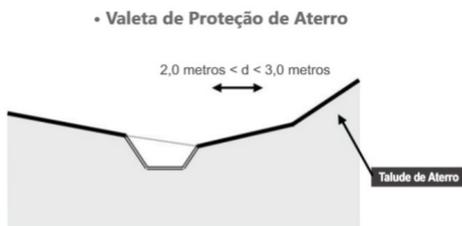
Figura 3.4 | Valeta de proteção de corte



Fonte: Jabor (2017, p. 131).

- Valeta de proteção de aterro: é uma estrutura que serve para interceptar a água que escoar na parte superior do aterro, impedindo-a de chegar ao pé do talude de aterro, evitando a erosão do solo, além de conduzir as águas das sarjetas e valetas de corte para algum dispositivo de transposição de talvegue (DNIT, 2006a), conforme Figura 3.5.

Figura 3.5 | Valeta de proteção de aterro



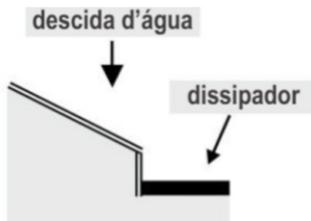
Fonte: Jabor (2017, p. 131).

- Sarjeta de corte: serve para conduzir longitudinalmente a água que precipita sobre os taludes de corte e a plataforma da rodovia até uma caixa coletora. Esse tipo de dispositivo é essencial em todos os cortes e deve estar localizado à margem dos acostamentos (DNIT, 2006a).
- Sarjeta de aterro: tem a mesma função que a sarjeta de corte, mas deve ser colocada na borda do acostamento. Ela serve para captar a água precipitada sobre o pavimento e conduzi-la até uma descida de água, impedindo a erosão do talude de aterro (DNIT, 2006a).
- Valeta de canteiro central: dispositivo utilizado para drenar superficialmente a água do canteiro central em rodovias de pista dupla. É utilizada para captar a água da pista e do próprio canteiro central e conduzi-la até a caixa coletora de bueiro de greide (DNIT, 2006a).
- Descida de água: tem como objetivo conduzir a água captada por outro dispositivo de drenagem dos taludes de corte e aterro. A

descida de água deve ser empregada quando as valetas e sarjetas atingem seu comprimento crítico. Em talude de corte, leva a água da valeta de proteção de corte até uma caixa coletora ou sarjeta de corte. No caso do talude de aterro, conduz a água proveniente da sarjeta de corte ou da saída de bueiro, com o objetivo de escoar o fluxo do talude até o terreno natural. Dependendo da velocidade do escoamento, a descida de água pode ser em degraus, o que contribui para dissipar a energia do fluido (DNIT, 2006a).

- Saída de água: dispositivo destinado a conduzir a água coletada pela sarjeta de aterro até a uma descida de água, servindo de transição entre a sarjeta de aterro e a descida de água (DNIT, 2006a).
- Caixa coletora: coleta a água proveniente das sarjetas, descidas de água e áreas a montante. Também pode ser usada para inspeção dos condutos que por elas passam, permitindo verificar seu funcionamento e estado de conservação (DNIT, 2006a).
- Bueiros de greide: dispositivos que levam as águas captadas pelas caixas coletoras até um deságue adequado (DNIT, 2006a).
- Dissipador de energia (Figura 3.6): reduz a velocidade do fluxo de água, dissipando sua energia, o que minimiza a chance de ocorrer erosão do solo e desgaste do revestimento das sarjetas e valetas que são compostas por cobertura vegetal (DNIT, 2006a).

Figura 3.6 | Dissipador de energia



Fonte: Jabor (2017, p. 153).

- Escalonamento de taludes: serve para evitar que a água precipitada sobre a plataforma e/ou sobre os taludes atinja uma velocidade que poderá provocar erosão. A sarjeta de banquetta é um dispositivo de captação que conduzirá a água ao local de deságue (DNIT, 2006a).
- Corta-rios: são canais empregados para evitar que um curso de água existente interfira na diretriz da rodovia, obrigando a construção de obras de transposição de talvegues. Serve também para afastar a água em torno da estrada, que poderia colocar em risco a estabilidade dos aterros (DNIT, 2006a).



Dica

Para saber como dimensionar os dispositivos de drenagem superficial, sugerimos ler o capítulo 5 do seguinte material:

DEPARTAMENTO DE NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE – DNIT.
Manual de Drenagem do DNIT. Rio de Janeiro, RJ, Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. Publicação IPR, 2. ed., 304 p., 2006a.

A drenagem subterrânea ou profunda tem como finalidade interceptar o fluxo subterrâneo e rebaixar o lençol freático. Para evitar problemas, são utilizados os seguintes dispositivos:

- Dreno profundo: tem a função de interceptar o fluxo da água subterrânea através do rebaixamento do lençol freático, impedindo que a água chegue ao subleito. Deve ser instalado em profundidade da ordem de 1,5 m a 2 m, servindo para captar e aliviar o lençol freático e proteger o corpo estradal (DNIT, 2006a).
- Dreno espinha de peixe: normalmente empregado em série, quando o lençol freático estiver próximo da superfície e quando o solo natural não for permeável. Deve ser instalado em pequena profundidade e sem tubos (DNIT, 2006a).
- Colchão drenante: o objetivo da camada drenante é captar a água de pequena profundidade do corpo estradal em que o dreno de espinha de peixe não funciona. Pode ser empregado em cortes de rocha, em cortes em que o lençol freático estiver próximo do greide, em base de aterro onde houver água livre próximo do aterro natural e em aterro sobre terreno impermeável. A remoção da água coletada pelo colchão drenante deverá ser realizada por dreno longitudinal (DNIT, 2006a).
- Dreno horizontal profundo: é aplicado para prevenção e correção de escorregamentos quando é feita a elevação do lençol freático (DNIT, 2006a).
- Valetão lateral: é executado no bordo da rodovia, aumentando a segurança em épocas de chuvas. Em regiões planas, o dispositivo é usado como sarjeta ou como dreno profundo (DNIT, 2006a).
- Dreno vertical de areia: é construído em aterros onde existem depósitos de solos moles como argilas, siltes e turfas (DNIT, 2006a).



Refleta

Você já aprendeu que um sistema de drenagem é composto por dispositivos de drenagem superficial e subterrânea (também chamada de profunda). Você consegue explicar com suas palavras, as principais características e funções dessas duas formas diferentes de captar a água em rodovias? Percebe como estes dispositivos precisam ser dimensionados para favorecer a segurança das pessoas? Você já dirigiu em alguma rodovia com sistema de drenagem deficiente?

Devemos sempre estar atentos ao dimensionamento adequado de todos os dispositivos do sistema de drenagem de acordo com as características naturais do terreno. A interação harmoniosa entre eles garantirá a integridade da estrutura do pavimento e a segurança dos usuários, bem como evitará a erosão do solo e uma possível ruptura de talude.



Exemplificando

Exemplos de sistema de drenagem ineficiente podem ser vistos, nas Figuras 3.7 e 3.8, apresentados na reportagem abaixo.

G1 SOROCABA E JUNDIAÍ. Motoristas reclamam de crateras no asfalto da estrada vicinal Mário Covas. 29 out. 2018.

Figura 3.7 | Crateras na estrada Mário Covas



Fonte: <https://g1.globo.com/sp/sorocaba-jundiai/noticia/2018/10/29/motoristas-reclamam-de-crateras-no-asfalto-da-estrada-vicinal-mario-covas.ghtml>. Acesso em: 28 jan. 2019.

Figura 3.8 | Crateras na rodovia em Mairinque



Fonte: <https://g1.globo.com/sp/sorocaba-jundiai/noticia/2018/10/29/motoristas-reclamam-de-crateras-no-asfalto-da-estrada-vicinal-mario-covas.ghtml>. Acesso em: 28 jan. 2019.

“Segundo relatos, pelo menos três pontos do asfalto cederam e a situação preocupa os motoristas que passam pelo local, próximo ao bairro Dona Catarina” (G1, 2018). As fotos apresentadas mostram dois trechos em que as estruturas dos pavimentos cederam. Segundo resultados apresentados no laudo técnico, o sistema de drenagem executado não é adequado, pois muitos pontos estão obstruídos principalmente por restos de vegetação. Isso é agravado com a falta de manutenção dos taludes, estruturas que dão sustentação nas laterais da rodovia, deixando a pista exposta a riscos de deslizamentos.

Agora você já sabe como selecionar os materiais adequados para as camadas de base, sub-base e reforço do subleito, assim como quais parâmetros devem ser atendidos para que o subleito seja considerado apto a receber a estrutura do pavimento. Além disso, já tem noção do que deve conter um sistema de drenagem, tanto superficial, quanto subterrâneo. Portanto, já está pronto para responder algumas questões. Você tem um problema importante para resolver no *Sem medo de errar*. Vamos lá?

Sem medo de errar

Após a realização das sondagens, da coleta e caracterização de materiais, você deve preparar uma planilha com os resultados dos ensaios para auxiliar na seleção dos materiais que podem ser aplicados em cada camada do pavimento (base, sub-base e reforço do subleito), comparando os valores obtidos com os limites estabelecidos nas especificações correspondentes às diferentes camadas.

Segundo o DNIT (2006a), para considerar que os materiais podem ser empregados nas camadas dos pavimentos, você deve comparar os valores obtidos nos ensaios com os seguintes valores limites:

- Limite de Liquidez, $LL \leq 25\%$.
- Índice de plasticidade, $IP \leq 6\%$.
- Equivalente de Areia, $EA \geq 30\%$.

Material do subleito:

- Índice de suporte Califórnia, $ISC \geq 2\%$.
- Expansão $\leq 2\%$.

Material do reforço do subleito:

- ISC maior que o do subleito.
- Expansão $\leq 2\%$.

Material para sub-base:

- $ISC \geq 20\%$.
- Expansão $\leq 1\%$.

Material para base:

- $ISC \geq 80\%$ ($ISC \geq 60\%$ para $N \leq 10^6$) .
- Expansão $\leq 0,5\%$.

Para selecionar o material da base, você deverá ter os dados do tráfego (número N), assim como as condições climáticas (intensidade de chuva etc.) para dimensionar o sistema de drenagem da rodovia, que deverá ser composto por drenagem superficial e subterrânea.

Você deverá analisar de forma minuciosa as características do terreno, propondo soluções adequadas para cada tipo de situação que julgar necessária, seja na drenagem superficial, profunda ou na transposição de talvegues, considerando que a solução adotada afetará diretamente a vida útil da via e a qualidade do pavimento.

O projeto de drenagem subterrânea ou profunda tem como objetivo interceptar o fluxo subterrâneo e rebaixar o lençol freático. Para desenvolver o projeto de drenagem subterrânea, é preciso ter disponível as seguintes informações:

- a) Conhecimento da topografia da área.
- b) Informações dos solos, obtidas a partir da caracterização de amostras coletadas por meio de sondagens.
- c) Pluviometria da região, obtidas a partir de recursos que oferecem a hidrologia.

Os dispositivos que poderá ter um sistema de drenagem completo são listados em seguida.

Drenagem superficial:

- Valetas de proteção de corte e de aterro.

- Sarjetas de corte, de aterro e de canteiro central.
- Descidas e saídas de água.
- Caixas coletoras.
- Bueiros de greide.
- Dissipadores de energia.
- Escalonamento de taludes.
- Corta-rios.

Drenagem subterrânea:

- Drenos profundos, espinhas de peixe; horizontais profundos e verticais de areia.
- Colchão drenante.
- Valetões laterais.

Você já aprendeu a selecionar os materiais para as camadas de base, sub-base e reforço do subleito, assim como analisar e verificar se o subleito apresenta características adequadas para suportar a estrutura do pavimento. Também viu a importância da drenagem do pavimento e os tipos de drenagem que pode compor um sistema de drenagem completo. Dessa forma, cumpriu mais uma fase do seu processo de aprendizagem. Já sabe escolher os materiais para cada camada e na próxima etapa, vai aprender como dimensionar a estrutura do pavimento.

Que tal agora resolvermos um problema sobre a importância da caracterização dos materiais e do controle tecnológico da execução do pavimento?

Avançando na prática

Importância da caracterização dos materiais e do controle tecnológico na execução do pavimento

Descrição da situação-problema

Durante a execução de uma obra de pavimentação, os fiscais solicitaram que fosse feito o controle tecnológico de compactação das camadas do pavimento. Você é o engenheiro responsável pela execução da pavimentação

e vai fazer a análise dos resultados dos ensaios. O projeto foi desenvolvido por outra empresa e você não participou dessa etapa.

Após a execução da camada do reforço de subleito, foram determinadas a umidade pelo método da frigideira e a densidade pelo método do frasco de areia. Em seguida, foram calculados o grau de compactação (GC) e os valores obtidos variaram de 93 a 96%, inferiores ao limite determinado pelo DNIT, que é $GC \geq 100\%$. O que pode ter causado o problema? Quais parâmetros devem ser analisados?

Resolução da situação-problema

Antes de fazer o projeto executivo do pavimento, é fundamental analisar os resultados das sondagens e dos ensaios de caracterização dos materiais, verificando se atendem às especificações técnicas de cada camada e do subleito. Caso o material do subleito não apresente resistência adequada (ISC), deverá ser feita a troca de materiais a uma profundidade de pelo menos 1 m.

No caso dessa obra, você deverá verificar se todos os materiais adotados na estrutura do pavimento foram caracterizados adequadamente e, se necessário, solicitar amostragens e ensaios dos materiais empregados na camada de reforço do subleito. Se os resultados obtidos não atenderem às especificações técnicas, significa que o material não deveria ter sido aplicado na construção do pavimento e medidas de correção devem ser adotadas imediatamente.

É por isso que o controle tecnológico durante a execução das camadas do pavimento é tão importante, pois permite identificar problemas e evitar que seja construída uma nova camada sobre uma faixa com material que não atende às especificações e, futuramente, traria problemas mais graves.

Faça valer a pena

1. Para selecionar os materiais para as camadas de base, sub-base e reforço do subleito, devem ser realizados alguns ensaios de caracterização, como granulometria, índices físicos (LL e IP) e capacidade de suporte, ISC. Quais são os valores limites para que o material possa ser empregado na camada de base dos pavimentos?

Selecione a alternativa com a resposta correta:

- a) $LL \geq 25\%$ e $IP \leq 9\%$.
- b) $LL \geq 25\%$ e $IP \leq 6\%$.
- c) $LL \leq 25\%$ e $ISC \leq 80\%$.

- d) $ISC \geq 80\%$ e $Expansão \leq 0,5\%$.
- e) $ISC \leq 60\%$ e $Expansão \geq 0,5\%$.

2. A água é considerada o principal inimigo do pavimento, devendo ser eliminada para fora o mais rápido possível. No entanto, dependendo do tipo de revestimento e da estrutura do pavimento, a água pode infiltrar para camadas inferiores. Quando isso acontece é fundamental que o sistema de drenagem subterrâneo funcione. Quais dispositivos têm por objetivo interceptar o fluxo da água subterrânea, impedindo-o de atingir o subleito?

Selecione a alternativa com a resposta correta:

- a) Valetões laterais.
- b) Drenos espinhas de peixe.
- c) Drenos profundos.
- d) Caixas coletoras.
- e) Sarjetas laterais.

3. Os resultados dos ensaios de ISC das 10 amostras coletadas nos pontos de sondagens do subleito apresentaram os seguintes valores: $ISC_1=5\%$; $ISC_2=3\%$; $ISC_3=7\%$; $ISC_4=5\%$; $ISC_5=9\%$; $ISC_6=7\%$; $ISC_8=3\%$; $ISC_9=5\%$ e $ISC_{10}=4\%$. Se tivesse que escolher apenas um valor, qual você definiria como ISC do subleito ($ISC_{subleito}$) e quanto deve ser o ISC do material para reforço do subleito ($ISC_{reforço}$)?

Indique a alternativa com as respostas corretas:

- a) $ISC_{subleito} = 3\%$ e $ISC_{reforço} \leq 3\%$.
- b) $ISC_{subleito} = 3\%$ e $ISC_{reforço} \geq 4\%$.
- c) $ISC_{subleito} = 5\%$ e $ISC_{reforço} \geq 2\%$.
- d) $ISC_{subleito} = 9\%$ e $ISC_{reforço} \leq 3\%$.
- e) $ISC_{subleito} = 5\%$ e $ISC_{reforço} \leq 3\%$.

Dimensionamento e construção de pavimentos

Diálogo aberto

Viajando pelo norte do Brasil, você se depara com muitas estradas de terra, de diferentes solos e cores, de condições nem sempre tão boas. Novamente, o instinto de engenheiro começa a aflorar, tentando entender por que isso acontece e pensando que pode construir muitos pavimentos para melhorar as condições de transportes, contribuindo com o desenvolvimento da região.

Você acabou de ser nomeado pela empresa em que trabalha como responsável pela área de infraestrutura e foi enviado para desenvolver projetos de pavimentos na região do norte do Brasil, carente de infraestrutura de transportes. Para isso, deverá aplicar os conceitos básicos sobre pavimentação para definir que tipo de pavimento poderá adotar, aplicando os parâmetros que definem essa seleção. Além disso, você já verificou que será preciso fazer um reconhecimento do subleito para determinar a resistência do solo, por meio de sondagens e ensaios em laboratório, assim como deverá selecionar os materiais disponíveis na região para serem empregados nas outras camadas do pavimento (base, sub-base e reforço do subleito).

Depois de analisar todos os parâmetros e selecionar os materiais que serão empregados em cada camada do pavimento, você realizará o dimensionamento do pavimento. Para isso, deverá ter todas as informações necessárias da obra para desenvolver o projeto: número N , valores de ISC ou CBR do subleito e de cada material disponível para as camadas de base, sub-base e reforço do subleito. Em função do tráfego, $N = 3,0E+06$ e das características do local, você definiu que será um pavimento flexível, com revestimento de concreto asfáltico. Para finalizar o projeto, terá que elaborar uma planilha com os tipos e as quantidades de cada equipamento, assim como as técnicas construtivas para a execução da estrutura do pavimento.

Nesta seção, você vai estudar o dimensionamento de pavimento flexível e de pavimento rígido, conceitos sobre a construção de rodovias, abordando técnicas construtivas, equipamentos e controle tecnológico.

Animado para estudar mais um pouco sobre pavimentos? Vamos lá.

Dimensionamento de pavimento flexível

No Brasil, segundo a ABEDA (2018), mais de 90% dos pavimentos são flexíveis, sendo que o dimensionamento dessas estruturas é realizado empregando o método de projeto de pavimentos flexíveis desenvolvido pelo engenheiro Murilo Lopes de Souza, em 1981 (SOUZA, 1981), do antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER, mais conhecido como método do CBR, que tem como base o método americano que foi desenvolvido a partir dos resultados dos estudos realizados na pista experimental da AASHO (AASHO Road Test), construída em 1960, nos Estados Unidos. O método é baseado na classificação de solos do TRB (*Transportation Research Board*), no ensaio de índice de suporte Califórnia, ISC, mais conhecido como CBR (*California Bearing Ratio*) e no tráfego, N, que solicitará o pavimento.

Além do ISC ou CBR, o método considera o coeficiente de equivalência estrutural, k , de cada material que vai compor o pavimento. Os diferentes materiais constitutivos do pavimento foram comparados com o material granular, considerado padrão, $k = 1,0$, sendo definidos coeficientes de equivalência estruturais apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 | Coeficientes de equivalência estrutural dos materiais constitutivos do pavimento

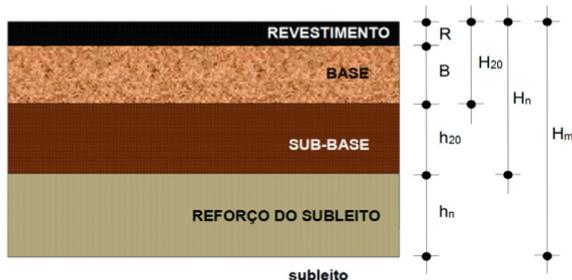
Componentes do Pavimento	Coefficiente k
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento de pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento de pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo-cimento com resistência a compressão a 7dias superior a 45 kgf/cm ²	1,70
Idem, com resistência a compressão a 7dias entre 45 e 28 kgf/cm ²	1,40
Idem, com resistência a compressão a 7dias entre 28 e 21 kgf/cm ²	1,20

Fonte: Souza (1981, p. 15).

Os coeficientes estruturais das camadas constituintes do pavimento são designados por k_R (revestimento), k_B (base), k_S (sub-base) e k_{Ref} (reforço do subleito).

O dimensionamento do pavimento consiste em determinar as espessuras das camadas que vão constituir o pavimento, considerando o tráfego (N) e a capacidade de suporte de cada material (ISC ou CBR). A Figura 3.9 apresenta um esquema de uma estrutura de pavimento com todas as camadas que pode ter um pavimento e suas respectivas espessuras.

Figura 3.9 | Espessuras das camadas de uma estrutura de pavimento



Fonte: adaptada de Souza (1981).

Os símbolos R , B , h_{20} e h_n designam, respectivamente, as espessuras do revestimento, da base da sub-base e do reforço do subleito. A espessura H_{20} corresponde à soma das espessuras das camadas de revestimento e base ($R+B$), que estarão apoiadas sobre a camada de sub-base (h_{20}). Mesmo que o CBR do material da sub-base seja superior a 20, determina-se a espessura para CBR = 20, por esta razão, usam-se sempre, os símbolos H_{20} e h_{20} para designar as espessuras de pavimento sobre a sub-base e da sub-base, respectivamente.

A espessura H_n corresponde à soma das espessuras das camadas de revestimento, base e sub-base ($R+B+h_{20}$), que estarão apoiadas sobre a camada de reforço do subleito (h_n), que possui ISC ou CBR = n. A espessura H_m corresponde à soma das espessuras das camadas de revestimento, base, sub-base e reforço do subleito ($R+B+h_{20}+h_n$), que estarão apoiadas sobre o subleito de CBR = m.

A espessura mínima do revestimento asfáltico, R , é definida em função do tráfego N , de acordo com a Tabela 3.4. A espessura mínima recomendada para os revestimentos asfálticos é utilizada tanto para proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego, como para evitar a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração na flexão (SOUZA, 1981).

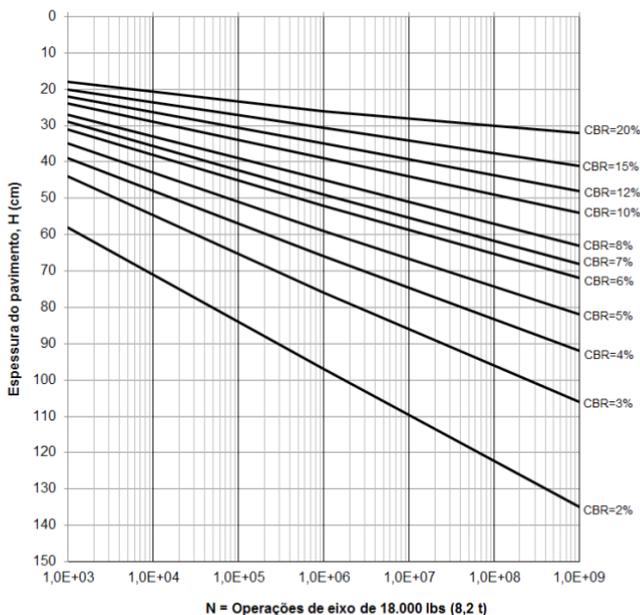
Tabela 3.4 | Espessura mínima de revestimento asfáltico

N (tráfego)	Espessura mínima de revestimento
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais
$10^6 < N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos asfálticos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto asfáltico com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto asfáltico com 12,5 cm de espessura

Fonte: adaptada de Souza (1981).

Para determinar os valores de H_{20} , H_n e H_m , deve ser utilizado o gráfico da Figura 3.10, que fornece a espessura total do pavimento em função do N e do ISC ou CBR.

Figura 3.10 | Gráfico de dimensionamento de pavimentos do Método do CBR



Fonte: adaptado de Souza (1981).

A espessura H é determinada da seguinte forma: entra-se em abscissa com o valor do N , procede-se verticalmente até encontrar a reta representativa ao valor de CBR. Em seguida, procede-se horizontalmente até as ordenadas e determina-se a espessura total do pavimento, H . A espessura fornecida corresponde aos materiais com coeficiente estrutural $k=1$, material granular. Uma vez determinadas as espessuras H_{20} , H_n e H_m pelo gráfico da Figura 3.10 e R pela tabela de espessura mínima de revestimento asfáltico, as espessuras da base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n) são obtidas pela resolução sucessiva das seguintes inequações:

$$R \times k_R + B \times k_B \geq H_{20}$$

$$R \times k_R + B \times k_B + h_{20} \times k_S \geq H_n$$

$$R \times k_R + B \times k_B + h_{20} \times k_S + h_n \times k_{Ref} \geq H_m$$

Para sub-base com $CBR \geq 40\%$ e $N < 10^6$, admite-se substituir na primeira inequação H_{20} por $0,8 \times H_{20}$. Para $N > 10^7$, recomenda-se substituir, na

primeira inequação, H_{20} , por $1,2 \times H_{20}$. A espessura mínima a considerar para camadas granulares é de 15 cm.

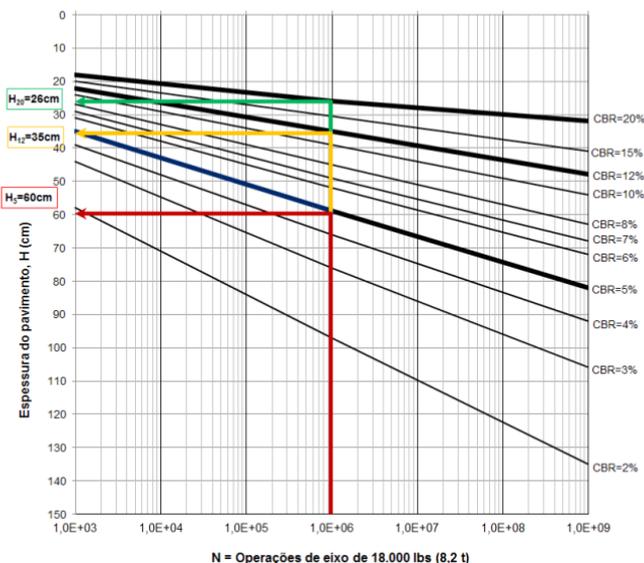


Exemplificando

Determine as espessuras, H , do pavimento para uma estrada em que $N = 1,0E + 06$, sabendo-se que o subleito apresenta $CBR = 5\%$, dispondo-se de material para base com $CBR = 80\%$, material para sub-base com $CBR = 40\%$ e material para reforço do subleito com $CBR = 12\%$.

Solução: a partir do valor de $N = 1,0E + 06$, você deve traçar uma reta verticalmente até atingir a reta correspondente ao $CBR = 5\%$. Em seguida, deve traçar uma reta perpendicular até atingir o eixo das ordenadas que vai fornecer o valor da espessura, $H_5 = 60$ cm, como mostra o gráfico da Figura 3.11. Para determinar o $H_{12} = 35$ cm e o $H_{20} = 26$ cm, você deve proceder da mesma forma.

Figura 3.11 | Determinação das espessuras do pavimento



Fonte: adaptada de Souza (1981).

Apesar de atualmente se falar em desenvolvimento de um método mecanístico, ainda o do CBR, como é conhecido o método desenvolvido por Souza (1981), é o que está em vigência e sendo adotado pelos órgãos rodoviários e empresas de projetos de pavimentos brasileiros.

Dimensionamento de pavimento rígido

Dentre os métodos de dimensionamentos de pavimentos rígidos, os mais difundidos são o da *Portland Cement Association* (PCA) de 1966 e 1984 e o método da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) (1993). O método da PCA (1984), atualmente um dos mais empregados no Brasil, está fundamentado na teoria de Westergaard (1925) e nos ábacos de Pickett e Ray e emprega a teoria de Boussinesq, em que o deslocamento é diretamente proporcional à pressão exercida, expresso pelo coeficiente de recalque (k) também denominado de módulo de reação ou módulo de Westergaard (DNIT, 2005).

A diferença entre os métodos da PCA é que o método de 1984 considera o uso de barras de transferência de cargas entre as placas, em que a posição crítica está na borda longitudinal. A espessura da placa de concreto é definida em função da resistência à flexão do concreto, com base no consumo de resistência à fadiga (CRF), quando essa placa é submetida à ação repetida de carga de tráfego durante o período de projeto (DNIT, 2005).

O consumo da resistência à fadiga é associado à relação tensão de tração/módulo de ruptura do concreto ao qual a placa de concreto será submetida durante a vida de serviço. Quando a relação tensão de tração/módulo aumenta, ocorre a diminuição do número de solicitações, que pode gerar falha à placa de concreto e, quando essa relação diminui, o número de solicitações para que ocorra a falha aumenta. Dessa forma, pode-se concluir que a passagem de uma única carga, suficiente para gerar tensões de tração a uma dada placa de concreto, não ocasionará dano. No entanto, a passagem de sucessivas cargas (na ordem de milhões) ocasionará a falha por fadiga da placa. O parâmetro tensão de tração é obtido através dos ábacos desenvolvidos por Pickett e Ray, que teve como base a equação de Westergaard e foi concebido considerando carga dinâmica, uma vez que se trata de cargas de veículos em movimento, enquanto o módulo de ruptura é um parâmetro determinado em laboratório através de um ensaio estático (DNIT, 2005). Devido à diferença da forma de atuação da carga, é preciso aplicar um fator de segurança de carga (FSC).

- FSC = 1,0 para tráfego leve – estradas rurais, ruas residenciais.
- FSC = 1,1 para tráfego médio – rodovias e vias urbanas com tráfego de caminhões pesados.
- FSC = 1,2 para tráfego pesado – rodovias.
- FSC = 1,3 para tráfego especial.

O método de dimensionamento do pavimento consiste em verificar se a espessura inicialmente adotada é compatível, considerando o consumo de resistência à fadiga provocada pela ação do tráfego. O método usa como dados de entrada as características do subleito da via (valor do CBR da camada subjacente), os dados do tráfego (obtidos através de contagem volumétrica classificatória) e as propriedades do concreto (expressas em resistência).

No pavimento rígido, a placa de concreto tem a função de base e de revestimento. A camada subjacente onde a placa de concreto está assente é a sub-base e abaixo dessa está o subleito. Sempre que nos referirmos à camada subjacente à placa de concreto estaremos nos referindo ao conjunto da sub-base e subleito.

As teorias que foram empregadas para desenvolvimento do método da PCA consideram a tensão de tração das placas que, por sua vez, depende do coeficiente de recalque (k) das camadas subjacentes (sub-base e subleito). Os coeficientes devem ser determinados no topo da camada onde a placa é assente e também no topo do subleito através de um ensaio em uma prova de carga estática, conforme a norma DNIT 055-ME (DNIT, 2004), onde são correlacionadas as pressões verticais transmitidas ao subleito por meio de uma placa rígida (com 76 cm de diâmetro) e os deslocamentos verticais correspondentes. No entanto, como é um procedimento muito demorado e dispendioso, admite-se considerar a correlação entre os valores do coeficiente de recalque do solo do subleito e os valores obtidos para o índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR) deste subleito.

A seguir são apresentados os passos para o dimensionamento de um pavimento rígido (DNIT, 2005):

- a) Definição dos parâmetros de dimensionamento:
 - determinação do tráfego esperado para cada nível de carga e de acordo com a vida de projeto do pavimento.
 - seleção do tipo de acostamento e adoção ou não de barras de transferência.
 - determinação da resistência à tração na flexão aos 28 dias.
 - determinação do coeficiente de recalque, k .
 - seleção do fator de segurança, FSC.

- b) Seleção de uma espessura tentativa de concreto (15 a 30 cm):
 - Determinação da tensão equivalente, obtida dos Quadros 12 e 13 (pavimento sem acostamento de concreto) ou 14 e 15 (pavimento

com acostamento de concreto) do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (DNIT, 2005 - páginas 111 a 114), para eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, em função da espessura estimada da placa, H, e do coeficiente de recalque do sistema, k.

- c) Determinação dos fatores de erosão, de acordo com o tipo de junta considerada e o tipo de acostamento, para os eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, obtidos nos Quadros 16 a 23 do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (DNIT, 2005 - páginas 105 a 112).
- d) Cálculo dos fatores de fadiga para os eixos simples, tandem duplos e tandem triplos, dividindo as tensões equivalentes pela resistência de projeto.
- e) Com o fator de fadiga e as cargas por eixos simples e tandem duplos, determinam-se as repetições admissíveis (análise por fadiga, obtidos das Figuras 27 a 29 do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (DNIT, 2005 - páginas 112 e 115)). Os eixos tandem triplos são considerados para a determinação das repetições admissíveis como 3 eixos simples, cada um com um terço da carga total.
- f) Com o fator de erosão e as cargas por eixo simples e tandem duplos, determinam-se as repetições admissíveis.
- g) Dividem-se as repetições esperadas pelas respectivas repetições admissíveis, determinadas tanto na análise por fadiga como na análise por erosão, determinando-se as porcentagens de resistência à fadiga consumida e o dano por erosão.
- h) Verifica-se se a espessura estimada cumpre os requisitos solicitados. Caso a espessura tentada seja insuficiente, deve-se repetir o cálculo com uma espessura maior.

Se a porcentagem de resistência à fadiga consumida ou a porcentagem de dano por erosão ficar próxima de zero, as condições são consideradas satisfeitas, mas a placa estará superdimensionada. Sendo assim, recomenda-se diminuir a espessura do pavimento para buscar obter porcentagens o mais perto possível de 100%.



Assimile

No método de dimensionamento de pavimento rígido da PCA de 1984, além do modelo de fadiga já existente, foi adicionado um modelo de ruína por erosão do subleito do pavimento.

No modelo de fadiga, as tensões de tração por flexão consideradas no

cálculo são produzidas pela carga tangente à borda longitudinal. A lei de Miner, do dano acumulado por fadiga, é aplicada nesse método. O consumo total admissível de fadiga é de 100%. No critério de fadiga, os eixos simples exercem maior influência no fenômeno de fadiga (DNIT, 2005).

A erosão consiste na perda de material da camada de suporte da placa de concreto por ação combinada da água e da passagem de cargas (principalmente dos eixos múltiplos). Os efeitos da erosão manifestam-se sob a forma de deformações verticais críticas, nos cantos e nas bordas longitudinais das placas, criando “degraus” nas juntas transversais, podendo ser causadas por bombeamento, formação de vazios sob a placa e perda de suporte ou contato entre a placa e o subleito. O critério de erosão depende da correlação entre os valores calculados das deformações verticais no canto das placas e das pressões verticais exercidas na interface entre a placa e a sua fundação. Para determinar o dano por erosão, foi desenvolvido o conceito de fator de erosão (P), que mede o efeito que uma certa carga tem para impor uma certa deformação vertical à placa, ligado ao parâmetro de erosão (DNIT, 2005). O fator de erosão é função da espessura (H) e do coeficiente de recalque (k) e pode ser determinado a partir dos Quadros 16 a 23 do Manual de Pavimento Rígidos (DNIT, 2005, páginas 105 a 112), de acordo com o tipo de junta considerada, o tipo de acostamento e o tipo de eixo (simples ou tandem). O dano acumulado por erosão deve ser inferior a 100% (DNIT, 2005).



Dica

Para ver os detalhes de um exemplo de dimensionamento de pavimento rígido pelo Método da PCA de 1984, sugerimos a leitura do Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT, páginas 115 a 119, Exemplo de cálculo da espessura de uma placa de concreto pelo método da PCA.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA TERRESTRE - DNIT. Manual de Pavimentos Rígidos. Rio de Janeiro, RJ, Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR. Publicação IPR 714, 3. ed., 234 p., 2005.

Construção de rodovias: técnicas construtivas e equipamentos

A construção do pavimento deve ser executada respeitando os procedimentos, as normas e as especificações do respectivo órgão responsável pela obra, de forma que as características técnicas essenciais sejam atendidas. Para isso, após a definição da estrutura do pavimento que será executado, é necessário fazer análise de todas as normas e especificações de serviço correspondentes aos diferentes tipos de materiais que serão aplicados na construção do pavimento. É importante que, junto com o projeto, sejam fornecidas as informações de todos os materiais que serão utilizados na construção das

camadas do pavimento, assim como do material do subleito. Além disso, antes de iniciar a construção também é essencial verificar a disponibilidade e as condições de todos os equipamentos necessários para a construção da rodovia. A Tabela 3.5 apresenta os principais equipamentos que podem ser utilizados na execução dos serviços de pavimentação.

Tabela 3.5 | Equipamentos utilizados nos serviços de pavimentação

Itens-serviços	Equipamentos utilizados
Desmatamento e limpeza	Tratores de esteira com lâmina
Escavação de solos	Tratores de esteira com lâminas ou escavadeiras
Extração de areia	Escavadeiras com caçambas tipo drag-line ou clam-shell, ou bombas de sucção
Extração de rocha	Compressores de ar, marteletes ou perfuratrizes de carreta e tratores de esteira
Cargas de materiais	Carregadeiras, escavadeiras
Produção de brita	Britadores de mandíbulas, girosféricos, peneiras e correias transportadoras
Transporte de materiais	Caminhões basculantes, carretas, carretas tanque para ligantes, caminhões fora-de-estrada
Espalhamento de materiais	Motoniveladoras, tratores de esteira com lâmina
Umedecimento de solos na pista	Caminhões tanques
Misturas de solos e homogeneização de umidade na pista	Pulvimisturadora, arados e grade de discos
Compactação	Motoniveladora
Espalhamento/distribuição de agregados e solos usinados	Rolo pé-de-carneiro, rolo de pneu (pressão variável), rolo vibratório liso
Misturas de solos em central	Distribuidor de agregados, acabadora com controle eletrônico e motoniveladora
Distribuição de materiais asfálticos	Usina de mistura de solos e carregadeira
Limpeza e varredura de pista	Caminhão com tanque distribuidor de asfalto
Estocagem de materiais asfálticos	Vassoura mecânica e trator de pneus
Preparo de concreto asfáltico	Tanques de asfalto com aquecimento a vapor
Preparo do pré-misturado a frio	Usina de asfalto
Espalhamento de concreto asfáltico usinado a quente	Usina de solos e carregadeira
Espalhamento de pré-misturado a frio	Vibroacabadora de asfalto, rolos vibratório e rolo de pneus de pressão variável
Preparo de concreto de cimento	Vibroacabadora de asfalto, rolos vibratório, rolo de pneus de pressão variável e rolos tandem
Transporte do concreto de cimento	Central de concreto cimento, ou central dosadora, e carregadeira
Espalhamento do concreto de cimento	Caminhões dumpers ou caminhões betoneiras
	Acabadora de concreto cimento

Fonte: DNIT (2006, p. 225 e 226).

Construção de rodovias: controle tecnológico

O controle tecnológico durante a construção é essencial para garantir a qualidade do pavimento.

As exigências de controle da qualidade e os métodos de ensaio são especificados para se assegurar de que a obra atenda às normas de qualidade mínima apropriadas ao comportamento desejado.

Durante a execução, uma das principais atividades de controle tecnológico é a realização de ensaios específicos em campo para garantir a qualidade da camada executada, devendo ser efetuados de forma que representem uma boa amostragem do serviço. O controle deve ser realizado por equipes treinadas que façam o acompanhamento de todas as etapas de construção da estrutura do pavimento: preparo do subleito, execução de base e sub-base, produção da mistura asfáltica em usina e execução da camada de rolamento. É importante salientar que existem parâmetros de aceitação e rejeição dos serviços, que devem ser atendidos e verificados através do controle tecnológico.

Vale lembrar que um controle importante é quanto à umidade dos solos do subleito ou de outra camada em época de chuvas, pois o material pode ficar encharcado, causando desestabilização da camada e, futuramente, deformações, caso não sejam tomadas as devidas providências. A recomendação é que não se deve executar qualquer camada do pavimento em épocas de chuva e, no caso de revestimento com mistura asfáltica a quente, quando a temperatura do ar estiver abaixo de 10 °C. Caso ocorra chuva não prevista, é necessário esperar que ela pare e, em seguida, deve-se verificar o teor de umidade do solo, empregando ensaio de umidade higroscópica e, em alguns casos, a caracterização do material através dos índices físicos (LL e IP) e a determinação da capacidade de suporte (ISC ou CBR).

As atividades de controle da qualidade também poderão descobrir falhas no projeto e, assim, indicar mudanças que podem melhorar a qualidade dos serviços executados e evitar futuros problemas ou má qualidade do serviço.



Refleta

Por que não é recomendada a execução de revestimentos com misturas asfálticas a quente em dias com temperatura inferior a 10 °C? O que pode acontecer com o revestimento? Existe algum risco de reduzir a resistência ou a durabilidade do pavimento nestas condições?

Agora você já sabe como dimensionar um pavimento flexível, sabe definir os parâmetros necessários para desenvolver o projeto de pavimento rígido e também os principais equipamentos que devem ser utilizados na construção

rodoviária. Além disso, viu que o controle tecnológico é importante para garantir a qualidade do pavimento.

Preparado para aplicar estes conceitos na solução de um problema prático?

Sem medo de errar

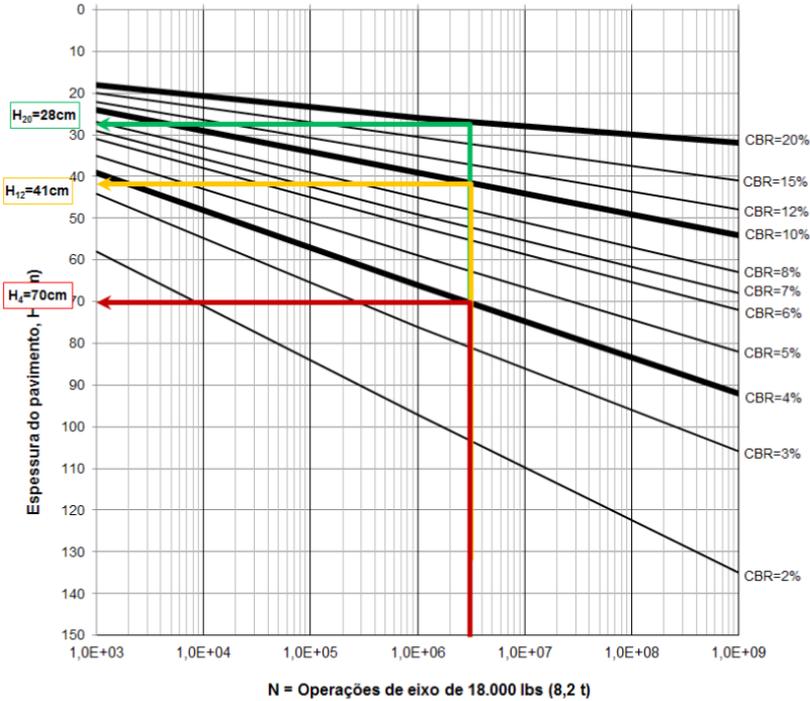
Você é responsável pelos projetos da área de infraestrutura na sua empresa e agora vai iniciar o desenvolvimento do projeto de pavimento.

A partir do valor de $N = 3,0E+06$, a espessura do revestimento do concreto asfáltico será $R = 5$ cm (obtido da Tabela 3.4) e $k_R = 2,0$ (obtido da Tabela 3.3). Os materiais disponíveis para as outras camadas apresentam as seguintes características:

- Material para base: brita graduada com CBR = 80%, $k_B = 1,0$
- Material para sub-base: material granular com CBR = 40%, $k_S = 1,0$
- Material para reforço do subleito: solo local, com CBR = 12%, $k_{ref} = 1,0$
- Material do subleito: solo, com CBR = 4%

A partir do gráfico da Figura 3.12, você determinou as espessuras $H_{20} = 28$ cm, $H_{12} = 41$ cm e $H_4 = 71$ cm.

Figura 3.12 | Determinação das espessuras do pavimento



Fonte: adaptada de Souza (1981).

Substituindo os valores nas inequações, temos:

$$R \times k_R + B \times k_B \geq H_{20} \Rightarrow 5 \times 2 + B \times 1,0 \geq 28 \Rightarrow B = 28 - 10 \Rightarrow B = 18 \text{ cm}$$

$$R \times k_R + B \times k_B + h_{20} \times k_S \geq H_{12}$$

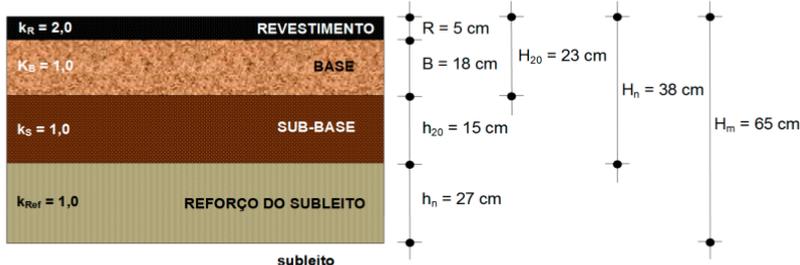
$5 \times 2 + 18 \times 1 + h_{20} \times 1 \geq 41 \Rightarrow h_{20} = 13 \Rightarrow h_{20} = 15 \text{ cm} \Rightarrow$ espessura mínima de camada granular

$$R \times k_R + B \times k_B + h_{20} \times k_S + h_n \times k_{ref} \geq H_4$$

$$5 \times 2 + 18 \times 1 + 15 \times 1 + h_n \times 1 \geq 70 \Rightarrow h_n = 27 \text{ cm}$$

Portanto, o pavimento terá as seguintes características (Figura 3.13):

Figura 3.13 | Estrutura do pavimento



Fonte: adaptada de Souza (1981).

Para execução do pavimento devem ser seguidas as recomendações técnicas de materiais, de técnicas construtivas, de equipamentos e de controle tecnológico constantes nas normas e especificações referentes a cada tipo de material selecionado para as diferentes camadas.

Para auxiliar na execução, você deve preparar planilhas com os ensaios de controle tecnológico para cada camada, como o exemplo apresentado na Tabela 3.6. Além disso, é preciso listar os equipamentos necessários para a execução de cada camada do pavimento.

Tabela 3.6 | Ensaios para o controle tecnológico do reforço do subleito

Ensaios	Normas	Quantidade	Descrição
M - Compactação	DNIT 164/2013-ME	5 ensaios	1 ensaio a cada 200 m
M - ISC, e expansão	DNIT 172/2016-ME	3 ensaios	1 ensaio a cada 400 m
M - Análise granulométrica	DNER-ME 080/94	5 ensaios	1 ensaio a cada 200 m
M - Limite de plasticidade, LP	DNER-ME 082/94	5 ensaios	
M - Limite de liquidez, LL	DNER-ME 122/94	5 ensaios	
E - Umidade higroscópica	DNER-ME 052/94	10 ensaios	1 ensaio a cada 100 m
E - Massa específica aparente seca	DNER-ME 092/94	10 ensaios	
E - Grau de compactação	DNER-ME 092/94	10 ensaios	

Nota: M - Controle tecnológico de materiais; E - Controle tecnológico de execução.

Fonte: elaborada pela autora.

Você já aprendeu os parâmetros necessários para dimensionar um pavimento flexível ou rígido. Também já sabe como selecionar os equipamentos para cada tipo de serviço que deve ser realizado na execução das camadas do pavimento e da importância do controle tecnológico da execução. Dessa forma, cumpriu mais uma fase do seu processo de aprendizagem.

Que tal agora resolvermos um problema sobre dimensionamento de pavimentos e controle tecnológico da execução do pavimento? Vamos lá!

Avançando na prática

Importância do controle tecnológico da execução do pavimento

Descrição da situação-problema

O projeto executivo foi aprovado e agora vai dar início a construção do pavimento. Apesar de não ser de sua responsabilidade a execução, seu chefe solicitou que você acompanhe os resultados do controle tecnológico da obra para que problemas que possam surgir sejam solucionados o mais rápido possível.

Antes de iniciar, você fez uma análise das normas e especificações técnicas correspondentes aos serviços que serão realizados e preparou as planilhas de controle tecnológico de materiais e de execução de cada camada do pavimento, em que definiu a quantidade de ensaios necessários que devem ser realizados em campo e em laboratório durante a execução do pavimento. Os materiais foram separados, e os equipamentos estão em condições adequadas e preparados para começar a obra.

De acordo com o cronograma físico, a obra vai ter uma duração de 15 meses e isso significa que vai ser preciso fazer uma pausa durante a época de chuvas. Infelizmente, em função das mudanças climáticas que tem ocorrido nos últimos anos, a notícia que você recebeu é que podem ocorrer chuvas em épocas não previstas. O que você deve fazer antes e após o período chuvoso para evitar problemas em função da água da chuva? E quando ocorrer uma chuva não prevista, quais medidas deverá tomar?

Resolução da situação-problema

Antes de iniciar a elaboração do cronograma físico da obra, você deve verificar qual é o período de chuva na região onde será construído o pavimento para evitar que tenha que parar a obra sem estar programado. A recomendação é que não deve ser realizado nenhum tipo de serviço nas camadas do pavimento durante o período de chuvas, pois os materiais podem ficar encharcados, reduzindo a sua resistência e desestabilizando a camada.

É necessário fazer a programação dos serviços de forma a evitar que as camadas compostas por solos puros fiquem expostas durante o período de

chuva, principalmente se for liberado o tráfego sobre a camada, pois poderá provocar afundamentos e deformações, implicando na necessidade de refazer a camada.

Após o período de chuva ou quando ocorrer uma chuva não prevista, antes de reiniciar os serviços, você deve fazer o controle tecnológico da umidade (por meio de ensaio em campo) e da capacidade de suporte (ISC ou CBR), assim como a caracterização dos materiais (LL e IP). Caso o material apresente valores fora dos limites estabelecidos pela especificação, você precisará analisar a necessidade de trocar o material ou realizar algum tipo de atividade que faça com que o material recupere suas características, no caso da capacidade suporte, que pode estar reduzida em função da umidade elevada.

Faça valer a pena

1. O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT (SOUZA, 1981) foi desenvolvido com base no método americano, em que foram considerados dois parâmetros principais para determinar as espessuras do pavimento. Quais são esses parâmetros?

Selecione a alternativa com a resposta correta.

- a) Tráfego (N) e capacidade de suporte (ISC ou CBR).
- b) Capacidade de suporte (ISC ou CBR) e coeficiente de recalque (k).
- c) Fator de erosão e coeficiente de recalque (k).
- d) Tráfego (N) e fator de fadiga.
- e) Tipo de solo e fator de segurança da carga (FSC).

2. O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis define uma espessura mínima para o revestimento, em função do tráfego (N). Qual é o principal objetivo da espessura mínima do pavimento?

Indique a alternativa com a resposta correta.

- a) Evitar o bombeamento dos solos do subleito para o revestimento asfáltico.
- b) Contribuir com a ruptura do próprio revestimento por esforços repetidos de tração.
- c) Proteger a camada de base dos esforços impostos pelo tráfego.
- d) Proteger a camada de reforço do subleito das cargas da base.
- e) Contribuir com a formação de trincas na camada da base.

3. Considerando o tráfego que vai solicitar o pavimento $N = 1,0E+07$ e sabendo-se que o material do subleito é um solo com $CBR = 6\%$, qual deve ser a espessura total do pavimento (H6)? E qual deve ser a espessura do revestimento (R)?

Selecione a alternativa com a resposta correta.

- a) $H_6 = 39$ cm e $R = 5$ cm.
- b) $H_6 = 59$ cm e $R = 7,5$ cm.
- c) $H_6 = 51$ cm e $R = 10$ cm.
- d) $H_6 = 59$ cm e $R = 10$ cm.
- e) $H_6 = 55$ cm e $R = 12,5$ cm.

Referências

ABEDA. **Evolução do Mercado**. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos, [s.d.] Disponível em: <http://www.abeda.org.br/mercado/?target=id-4#mercado-evolucao>. Acesso em: 25 jan. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: solo - sondagens de simples reconhecimento com SPT - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram? **Agência CNT de notícias**. Publicado em: 24 ago. 2017. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Imprensa/Noticia/cnt-divulga-estudo-por-que-pavimento-rodovias-brasil-nao-duram-resultados>. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DER). **Programa de Integração e Capacitação**. DER/PR – 2008. Disponível em: http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/RHTemp/ProjetoDrenagem_Oscar.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários Escopos Básicos/ Instruções de Serviço**. Rio de Janeiro. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR - 726, 3. ed., 484 p., 2006b. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/726_diretrizes_basicas-escopos_basicos-instrucoes_de_servico.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR - 719, 3. ed., 274 p., 2006. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentos Rígidos**. Rio de Janeiro. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR 714, 3. ed., 234 p., 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Drenagem de Rodovias**. Rio de Janeiro. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR, 2. ed., 304 p., 2006a. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/normas/download/Manual_de_Drenagem_de_Rodovias.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Reforço do subleito**. Especificação de serviço. Norma 138/2010-ES. Rio de Janeiro. IPR, 2010b. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit138_2010_es.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Regularização do subleito**. Especificação de serviço. Norma 137/2010-ES. Rio de Janeiro. IPR, 2010a. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit137_2010_es.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Norma 031/2006-ES. Rio de Janeiro. IPR, 2006. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimento rígido** – Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos. Norma 055/2004-ME. Método de ensaio. Rio de Janeiro, IPR, 2004. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit055_2004_me.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Solos** – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio. Norma 172/2016. Rio de Janeiro, mar. 2016. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit172_2016-me.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos e agregados miúdos - determinação da umidade com emprego do “Speedy”**. DNER-ME 052/94, Método de Ensaio. Rio de Janeiro, IPR, 1994a. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me052-94.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solo - determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do frasco de areia**. DNER-ME 092/94, Método de Ensaio. Rio de Janeiro, IPR, 1994b. Disponível em: <http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me092-94.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2019.

EGIS. Aula teórica 03: classificação de solos e estudos geotécnicos (PARTE I). 14 fev. 2018. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=e_8ggUNjoA4. Acesso em: 25 jan. 2019.

FORTES, R. M. **Índice de suporte Califórnia (ISC) ou CBR (Califórnia)**. Lateralos Servicos de Engenharia. [S.l., s.d.]. Disponível em: <http://www.lateralos.com.br/wp-content/uploads/2015/02/4-CAPACIDADE-DE-SUPORTE-CBR.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2019.

JABOR, M. A. **Curso Drenagem de Rodovias** – Estudos Hidrológicos e Projetos de Drenagem. Calameo, 2017. Disponível em: <https://pt.calameo.com/read/004910250ad66b09451a3>. Acesso em: 25 jan. 2019.

MARANGON, M. **Investigação Geotécnica de Campo**. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2011. Disponível em: <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF02-Investiga%C3%A7%C3%A3o-Geot%C3%A9cnica-de-Campo-2011.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2019.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentos de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Editora Villibor, 240 p., 1995. Disponível em: <http://www.portaldetecnologia.com.br/pavimentacao-obras/pavimentacao-de-baixo-custo-com-solos-lateriticos/>. Acesso em: 25 jan. 2019.

PEREIRA, C. Tipos de Sondagem de Solo. **Escola Engenharia**, 2015. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-sondagem/>. Acesso em: 25 jan. 2019.

QUINALIA, E. Projetos: Drenagem - Pista seca. **Revista Técnica**. 102. ed., set. 2005. Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/102/artigo285004-1.aspx>. Acesso: 25 jan. 2019.

SOUZA, M. L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Publicação 667, 3. ed. Rio de Janeiro, IPR, 1981. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/manuais/documentos/667_metodo_de_projeto_de_pavimentos_flexiveis.pdf. Acesso em: 25 jan. 2019.

Unidade 4

Projeto geométrico de rodovias

Convite ao estudo

Prezado aluno,

Percorrendo o Brasil, podemos ver diferentes paisagens que às vezes mudam quando menos esperamos, principalmente em regiões montanhosas, uma surpresa atrás da outra. Às vezes nos deparamos com paisagens inesperadas. Em algumas estradas, as subidas e descidas têm inclinações muito acentuadas e em outras quase não tem rampas. Algumas curvas são fechadas e outras, quase retas. Por que será que ali tem uma curva? Por que o traçado da rodovia não é uma reta? Não seria melhor uma ponte ligando os dois lados? Como será que são dimensionadas as curvas? Será que ela é um semicírculo certinho ou é uma parábola?

Quando está seco, tudo parece seguro e confortável, mas quando chove, parece que vamos escorregar, derrapar, sair pela tangente. Como ter certeza de que não vamos tombar numa curva? Quais os parâmetros que devemos utilizar para dimensionar uma rodovia com segurança nessas condições?

Você tem ideia de como são definidas as velocidades máximas, os raios das curvas e as inclinações do pavimento?

Algumas coisas parecem simples, mas como e o que deve ser considerado na seleção das características de uma estrada?

Você, engenheiro civil, acabou de ser transferido para a nova filial que a empresa em que trabalha abriu no interior do estado de Minas Gerais e será responsável pelo desenvolvimento dos projetos das novas estradas que serão construídas.

Para isso, precisará aplicar os conceitos sobre projeto geométrico de rodovias, selecionando todos os parâmetros necessários para desenvolver o projeto de uma estrada.

Nesta unidade, você terá a oportunidade de conhecer as principais características geométricas de vias e suas relações com o projeto final rodoviário. Vamos estudar quais os fatores que influenciam na definição do traçado, os elementos básicos para desenvolver o projeto geométrico, assim como os tipos de curvas horizontais e verticais que podem ser adotadas no projeto da estrada. Além disso, também apresentaremos a você

como definir um perfil transversal, qual deve ser a largura das faixas de rolamento e do acostamento e aprender a calcular o volume de materiais que devem ser transportados no serviço de terraplenagem. Para finalizar, vamos estudar quais os parâmetros que devem ser considerados no projeto de uma interseção rodoviária e como utilizar o programa AutoCAD Civil 3D na execução de um projeto geométrico.

Portanto, após aprender sobre os conteúdos abordados, você vai saber desenvolver um projeto geométrico em pequena escala, para aplicar os conhecimentos adquiridos, e desenvolver as competências adquiridas. Você deverá saber elaborar um projeto de estrada, selecionando e determinando suas características geométricas, como raios das curvas, rampas e super-elevação, saberá como calcular os volumes de materiais que deverão ser movimentados no projeto de terraplenagem, quais os parâmetros necessários para desenvolver um projeto de interseção rodoviária e como o AutoCAD Civil 3D pode auxiliar no desenvolvimento dos projetos.

Ficou curioso? Vamos lá, temos muita coisa para aprender sobre isso!

Bons estudos!

Escolha do traçado

Diálogo aberto

A definição das características geométricas de uma rodovia depende de alguns parâmetros, como a topografia do terreno, as condições geológicas e geotécnicas, a hidrologia, assim como das benfeitorias que existem na região onde será construída a estrada.

Você, engenheiro civil, vai desenvolver o projeto geométrico de uma pequena estrada que irá ligar duas comunidades em uma região de relevo ondulado, que deverá passar por um ponto obrigatório de passagem, fazendo com que seja necessária a construção de pelo menos uma curva horizontal simples. A extensão total da estrada é de aproximadamente 8.500 metros.

Você sabe que, para definir a velocidade de projeto ou velocidade diretriz, precisa definir a classe de projeto, que é função do VDM (volume diário médio) que irá trafegar na futura rodovia. Sabendo que o VDM é 1.200 veículos e o ângulo central da curva é $AC = 48$ graus, determine as distâncias de frenagem e de visibilidade de ultrapassagem e as características geométricas das curvas horizontais: raio da curva circular (R_c), grau de curva (G), desenvolvimento (D), tangente (T) e estacas dos pontos notáveis (PC , PI e PT).

Para determinar as estacas dos pontos notáveis, você tem que determinar a estaca do PI e a estaca final. Para isso, você fez um levantamento topográfico e determinou as distâncias entre a estaca 0 e o PI (3.578,00 m) e entre o PI e a estaca final (4.922,00 m).

Para que você tenha condições de elaborar o projeto da estrada, nesta seção, vamos estudar os conceitos relacionados ao desenvolvimento de projeto geométrico, começando pelos fatores que influenciam na definição do traçado, os elementos básicos para desenvolver o projeto geométrico, assim como os tipos de curvas horizontais que podem ser adotadas no projeto da estrada. Além disso, vamos aprender como fazer a variação da seção transversal para obtenção da superelevação necessária nas curvas.

Vamos lá, temos muita coisa para aprender nesta fase do projeto.

Fatores que influem nos estudos de traçado

O objetivo da construção de uma estrada é servir de ligação entre dois pontos, permitindo o acesso das pessoas e do transporte de produtos, além de contribuir com o desenvolvimento da região por onde irá passar. Teoricamente, o melhor traçado seria uma reta. Na verdade, seria o mais simples e fácil de executar se no meio do caminho não houvesse qualquer tipo de obstáculo ou ponto de interesse de passagem. Portanto, a definição do traçado depende de vários fatores e sempre deve ser resultado de uma análise de benefícios e custos. São vários os fatores que influenciam na seleção do traçado de uma estrada, sendo que os principais são (ODA, 2002):

- Topografia: em região com topografia acidentada, geralmente é necessário grande movimento de terra e, conseqüentemente, o custo de execução da infraestrutura da estrada acaba sendo elevado.
- Condições geológicas e geotécnicas: em função das características do terreno, pode ocorrer necessidade de obras de estabilização de cortes e aterros, resultando em custos adicionais.
- Hidrologia da região: pode exigir a construção de obras de arte (pontes) e obras de drenagem a um custo elevado.
- Existência de benfeitorias: pode ocasionar o aumento do custo de desapropriação para a construção da estrada (recomenda-se selecionar traçado por terreno de baixo valor).

Além dos fatores que influem na escolha do traçado, devem ser considerados os elementos básicos para o desenvolvimento do projeto geométrico da estrada.

Elementos básicos para projeto geométrico

A finalidade do projeto geométrico é proporcionar uma estrada segura, confortável e eficiente, atendendo com boas condições de escoamento ao volume de tráfego para o qual foi projetada. Os principais elementos que devem ser considerados no projeto geométrico são: velocidade, veículos de projeto e distância de visibilidade (ODA, 2002).

Velocidades

Segundo Oda (2002), a velocidade com a qual o veículo percorrerá a estrada depende das características do veículo, do motorista, das características geométricas do traçado e da qualidade da superfície de rolamento da estrada, assim

como do volume de tráfego, do limite de velocidade da estrada, das condições climáticas e do sistema de controle de velocidade dos veículos.

- a) Velocidade de projeto ou velocidade diretriz (V), segundo o DNER (1999), é a velocidade máxima que o veículo pode manter em um trecho da estrada com segurança. Quanto maior a velocidade de projeto, mais alto é o padrão da estrada e, conseqüentemente, maior é o custo, principalmente em região de topografia acidentada. A velocidade de projeto varia com a topografia da região e com a classe de rodovia (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 | Velocidades de projeto recomendadas pelo DNER

CLASSE DE PROJETO	CARACTERÍSTICAS	CRITÉRIO DE CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA	VELOCIDADE DE PROJETO (km/h)		
			Plano	Ondulado	Montanhoso
0	Via Expressa (Controle total de acessos)	Decisão administrativa.	120	100	80
I	A	Pista Dupla (Controle parcial de acessos)	100	80	60
	B	Pista Simples			
II	Pista Simples	VDM projetado: de 700 a 1.400 veículos.	100	70	50
III	Pista Simples	VDM projetado: de 300 a 700 veículos.	80	60	40
IV	A	Pista Simples	60	40	30
	B	Pista Simples			

Fonte: adaptada de Brasil (1999, p. 42).

- b) Velocidade de operação (V_o) é a média de velocidade de todo o tráfego, determinada a partir da soma das distâncias percorridas dividida pelo tempo de percurso. Varia com as características geométricas da estrada, com as condições e características do pavimento, do veículo, do motorista e do clima (ODA, 2002).

Veículos de projeto

A seleção dos tipos de veículos de projeto varia com a composição do tráfego que irá utilizar a rodovia, determinada a partir de contagem do tráfego existente ou de projeção do tráfego futuro, considerando o desenvolvimento da região. Os veículos são agrupados em quatro classes, sendo que, no Brasil, o mais comum é o tipo CO (DNER, 1999):

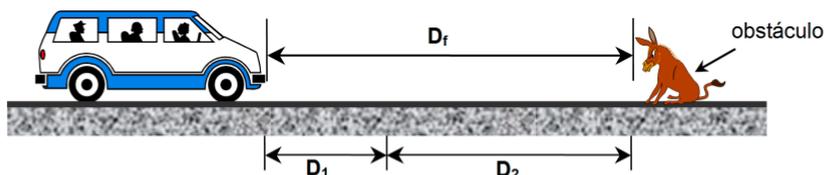
- VP – veículos de passeio: utilitários, picapes, furgões e similares;
- CO – veículos comerciais rígidos: caminhões e ônibus convencionais (de dois eixos e seis rodas);
- O – veículos comerciais rígidos maiores que o CO: caminhões longos e ônibus de turismo;
- SR – veículo comercial articulado: semirreboques.

Distância de visibilidade

É fundamental que a estrada ofereça visibilidade adequada para que o motorista desvie ou pare diante de qualquer obstáculo que possa surgir no seu percurso (Figura 4.1). Para isso, a distância de frenagem (D_f) ou distância de visibilidade de parada e a distância de ultrapassagem ($D_u >$) devem atender a valores mínimos, proporcionando segurança aos usuários (ODA, 2002).

A distância de frenagem (D_f) é a distância mínima necessária para que um veículo, na velocidade de projeto, consiga parar com segurança e não atingir o obstáculo que possa surgir em sua trajetória (Figura 4.1). A distância de frenagem varia com o tempo de percepção, que é o tempo entre o instante em que o motorista vê um obstáculo à sua frente e o instante em que inicia a frenagem ($t_p \sim 0,7$ s) e o tempo de reação do motorista, que é o tempo entre o momento em que o motorista decide frear e o instante em que efetivamente inicia a frenagem ($t_r \sim 0,5$ s). Os valores de tempo de reação e percepção devem considerar um fator de segurança, resultando um tempo t_{p+r} de 2,5 s (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

Figura 4.1 | Distância de frenagem necessária diante de um obstáculo



Fonte: elaborada pela autora.

onde: D_1 = distância percorrida pelo veículo entre o momento em que o motorista vê o obstáculo e o instante em que inicia a frenagem (m)

D_2 = distância percorrida pelo veículo durante a frenagem (m)

A distância de frenagem varia com o coeficiente de atrito (f), que diminui à medida que a velocidade aumenta. O DNER (1999) recomenda os valores de coeficiente de atrito (f) e de distância de frenagem (D_f) apresentados na Tabela 4.2.

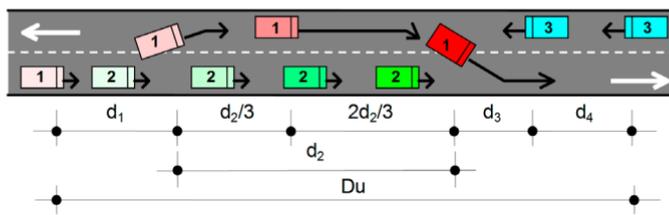
Tabela 4.2 | Valores de coeficiente de atrito (f) e distância de frenagem (D_f) recomendados para projeto.

Velocidade de projeto (km/h)	50	60	70	80	90	100	110	120
Pavimento seco	0,62	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54
Pavimento molhado	0,36	0,34	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
$D_{f_{seco}}$ (m)	51	66	82	99	119	140	163	189
$D_{f_{molhado}}$ (m)	62	84	109	137	165	201	235	279

Fonte: adaptada de Brasil (1999, p. 52).

A distância de visibilidade para ultrapassagem (D_u) (Figura 4.2) é a distância necessária para que o veículo possa realizar a manobra de ultrapassagem por outro veículo, com segurança, sendo que o valor mínimo de D_u deve ser respeitado em alguns trechos da estrada DNER (1999). Os valores de D_u variam em função das velocidades de projeto, conforme apresentados na Tabela 4.3.

Figura 4.2 | Distância de ultrapassagem



Fonte: adaptada de Brasil (1999, p. 59).

Hipóteses:

V_2 = velocidade do veículo (2) é constante

V_1 = velocidade do veículo (1) é 15 km/h mais alta do que a V_2

Definições:

d_1 = durante o tempo de reação e aceleração inicial

d_2 = durante o tempo de ocupação da faixa oposta

d_3 = distância de segurança entre os veículos (1) e (3)

d_4 = distância percorrida pelo veículo (3), que surge no momento em que o veículo (1) considera que não tem mais condição de desistir da ultrapassagem

Tabela 4.3 | Valores de D_u recomendados pelo DNER (1999)

Velocidade de projeto (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
D_u (m)	180	270	350	420	490	560	620	680	730	800

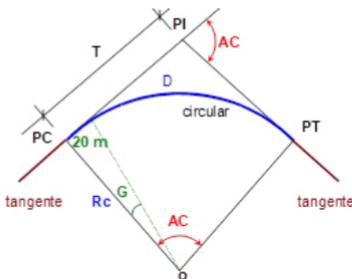
Fonte: Brasil (1999, p. 60).

Curvas horizontais simples – CHS

O traçado de uma estrada é formado por trechos retos concordados por curvas horizontais simples ou de transição, que são inseridas para desviar a estrada de obstáculos. A quantidade de curvas varia com a topografia da região, com as características geológicas e geotécnicas do terreno e com o custo de desapropriação de benfeitorias existentes nos locais por onde passará a estrada (ODA, 2002).

A Figura 4.3 apresenta uma curva horizontal simples, CHS.

Figura 4.3 | Pontos notáveis da CHS



- Estaca do PC = estaca do PI – T
- Estaca do PT = estaca do PC + D
- PI = ponto de interseção das tangentes
- AC = ângulo central da curva
- T = tangente da curva
- D = desenvolvimento da curva circular
- Rc = raio da curva circular

Fonte: elaborada pela autora.

As características geométricas de uma CHS são determinadas empregando as seguintes equações:

- Raio da curva circular (R_c)

$$R_c = \frac{V^2}{127 \times (e + f_i)}$$

- Grau da curva (G): ângulo com vértice no ponto o, correspondente a uma corda base de 20 m (uma estaca).

$$G = \frac{20 \times 360^\circ}{2 \times \pi \times R_c} = \frac{1146}{R_c}, \text{ para } G \text{ em graus e } R_c \text{ em metros}$$

- Tangente da curva (T)

$$T = R_c \times \operatorname{tg} \frac{AC}{2}, \text{ para } G \text{ em graus e } T \text{ em metros}$$

- Desenvolvimento (D): comprimento do arco de círculo entre o PC e o PT.

$$D = \frac{20 \times AC}{G}, \text{ para } AC \text{ e } G \text{ em graus e } D \text{ em metros}$$

$$\text{ou } D = \frac{\pi \times R_c \times AC}{180^\circ}, \text{ para } AC \text{ em graus e } D \text{ em metros}$$

Em DNER (1999), é recomendado que, para escolher o raio da curva, R_c , existem dois fatores que devem ser considerados: estabilidade do veículo que percorre a curva com grande velocidade e as condições de visibilidade. Para atender a essas condições, os dois parâmetros que devem ser selecionados em função da velocidade são: a superelevação (e) e o coeficiente de atrito transversal pneu-pavimento (f_i), sendo que a operação na condição de maior conforto acontece quando $f_i = 0$.

A inclinação transversal da pista em relação ao seu plano horizontal é definida como a superelevação (e) de uma curva circular. O valor máximo admissível pelo DNER (1999) para rodovias é $e_{m\acute{a}x} = 10\%$, e para zona urbana é $e_{m\acute{a}x} = 6\%$.

De acordo com DNER (1999), o máximo valor do coeficiente de atrito transversal (f_i) entre o pneu e a superfície do pavimento é obtido na iminência do escorregamento, quando o veículo percorre a curva horizontal. Geralmente, recomenda-se adotar um coeficiente de atrito transversal máximo corrigido por um coeficiente de segurança, considerando a menor velocidade com a qual a força centrífuga gerada com o movimento do veículo na curva cause a sensação de escorregamento ao motorista ou passageiro. A Tabela 4.4 apresenta os valores de $f_{tm\acute{a}x}$ recomendados pelo DNER (1999).

Tabela 4.4 | Valores máximos de coeficiente de atrito transversal, $f_{tm\acute{a}x}$

Velocidade (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$f_{tm\acute{a}x}$	0,20	0,18	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11

Fonte: Brasil (1999, p. 71).

As curvas circulares devem apresentar características que atendam as

seguintes condições: garantir que os veículos percorram a curva na velocidade diretriz (V) com estabilidade e segurança e proporcionar condições mínimas de visibilidade em toda a curva. Para isso deve ser adotado um raio mínimo, $R_{c_{\min}}$, considerando os valores máximos de superelevação (e_{\max}) e do coeficiente de atrito lateral (f_{\max}) na iminência do escorregamento. Para calcular o raio mínimo que atenda às condições de estabilidade e visibilidade, pode-se empregar a equação:

$$R_{c_{\min}} = \frac{V^2}{127 \times (e_{\max} + f_{\max})}$$



Exemplificando

Uma curva circular simples é composta pelos seguintes elementos: estaca do PI = [148 + 5,60 m], AC = 22 graus e $R_c = 600,00$ m. Calcular a tangente (T), o desenvolvimento (D), o grau (G) e as estacas do PC e PT, sendo uma estaca igual a 20 metros.

$$T = R_c \times \operatorname{tg} \frac{AC}{2} = 600,00 \times \operatorname{tg} \frac{22}{2} = 116,63 \text{ m}$$

$$G = \frac{1146}{R_c} = \frac{1146}{600} = 1,91 \text{ graus}$$

$$D = \frac{20 \times AC}{G} = \frac{20 \times 22}{1,91} = 230,38 \text{ m}$$

$$\text{Estaca do PC} = \text{Estaca [PI]} - T = (148 \times 20,00 \text{ m} + 5,60\text{m}) - 116,63 \text{ m}$$

$$\text{Estaca do PC} = 2.965,6 - 116,63 = 2.848,97 \text{ m}$$

$$\text{Estaca do PC} = [142 + 8,97 \text{ m}]$$

$$\text{Estaca do PT} = \text{Estaca [PC]} + D = 2.848,97 + 230,38 = 3.079,35 \text{ m}$$

$$\text{Estaca do PT} = [E153 + 19,35 \text{ m}]$$

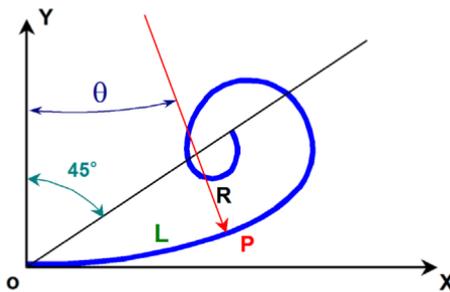
Curvas horizontais com transição – CHT

Em algumas estradas, pode ocorrer uma descontinuidade da curvatura na passagem do trecho em tangente para o trecho circular (ponto PC) e vice-versa (ponto PT). Por esse motivo, pode ser necessário inserir um trecho de curvatura progressiva com as seguintes funções (ODA, 2002):

- permitir a variação progressiva da superelevação, teoricamente nula na tangente e constante na curva;
- possibilitar a variação contínua de aceleração centrípeta na passagem da tangente para a curva;
- proporcionar um traçado sem impressão de descontinuidade da curvatura, graças à variação suave da curvatura.

O trecho de curvatura progressiva é denominado de curva horizontal com transição. Nesse tipo de curva, o raio varia em cada ponto, iniciando no valor R_c (na concordância com o trecho circular de raio R_c) até o valor infinito (na concordância com o trecho em tangente). Existem vários tipos de curvas que podem ser adotadas para a transição, sendo que a espiral (Figura 4.4) é a curva que melhor cumpre as exigências de um traçado racional. A espiral é a curva descrita por um veículo trafegando-a a uma velocidade constante, enquanto o motorista gira o seu volante a uma velocidade angular constante (ODA, 2002).

Figura 4.4 | Espiral



Equação da Espiral

$$RL = N$$

Para um ponto P genérico:

L = comprimento da curva desde a origem até o ponto P;

R = raio instantâneo no ponto P;

N = parâmetro da espiral (constante).

Fonte: elaborada pela autora.

O valor da constante N é função do comprimento de transição (L_s) que será adotado para a curva (ODA, 2002). A concordância da transição com a circular exige: $R_c \times L_s = N$, em que se deve definir o valor da constante N a partir dos valores do raio da curva circular (R_c) e do comprimento de transição (L_s) adotado. O comprimento de transição, L_s , deverá ser um valor entre os limites: $L_{s_{\min}}$ e $L_{s_{\max}}$, geralmente, recomenda-se um L_s igual a duas vezes o valor do $L_{s_{\min}}$ calculado, ou seja, $L_s = 2 \times L_{s_{\min}}$.

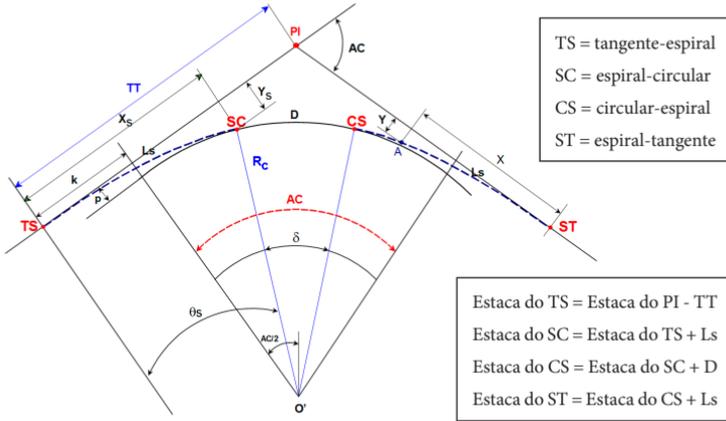
$$L_{s_{\min}} = 0,036 \times \frac{Vp^3}{Rc}$$

$$L_{s_{\max}} = 2 \times Rc \times \theta_{s_{\max}} \Rightarrow L_{s_{\max}} = Rc \times AC \times \frac{\pi}{180} \text{ (em metros)}$$

$$\theta_s = \text{ângulo da transição} \Rightarrow \theta_{s_{\max}} = \frac{AC}{2}$$

A Figura 4.5 mostra uma curva horizontal com transição.

Figura 4.5 | Curva horizontal com transição



O' = centro do trecho circular afastado
 PI = ponto de interseção das tangentes

Xs = abscissa dos pontos SC e CS

Ys = ordenada dos pontos SC e CS

k = abscissa do centro (O') da curva circular

$$k = X_s - R_c \times \text{sen} \theta_s$$

TT = distância do TS ou ST ao PI = tangente

$$TT_{\text{total}} = k + (R_c + p) \times \text{tg} \frac{AC}{2}$$

p = afastamento da curva circular

$$p = Y_s - R_c \times (1 - \cos \theta_s)$$

delta = ângulo central do trecho circular

X = abscissa de um ponto genérico A

Y = ordenada de um ponto genérico A

theta_s = ângulo da transição

AC = deflexão das tangentes = ângulo central

Fonte: elaborada pela autora.

D = desenvolvimento do trecho circular, $D = R_c \times \delta$.

No caso de espirais simétricas, com o mesmo comprimento Ls:

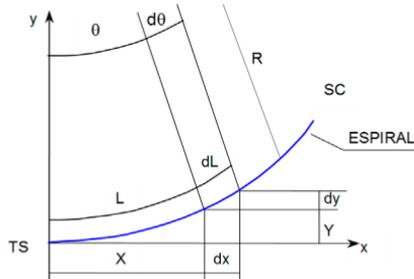
$$\delta = AC - 2 \times \theta_s \Rightarrow D = R_c \times (AC - 2 \times \theta_s)$$



Assimile

Cálculo dos elementos necessários à definição da curva de transição

Considerando Ls igual ao comprimento de transição e Rc o raio do trecho circular, temos:



$$R \times L = N = Rc \times Ls \Rightarrow R = \frac{N}{L}$$

$$dL = R \times d\theta$$

$$d\theta = \frac{L \times dL}{N} \Rightarrow \theta = \frac{L^2}{2 \times N} \Rightarrow \theta = \frac{L^2}{2 \times Rc \times Ls}$$

$$dx = dL \times \cos\theta$$

$$dy = dL \times \text{sen}\theta$$

Desenvolvendo-se $\text{sen}\theta$ e $\cos\theta$ em série e integrando, temos:

$$X = L \times \left(1 - \frac{\theta^2}{10} + \frac{\theta^4}{216} - \dots \right) \text{ e } Y = L \times \left(\frac{\theta}{3} - \frac{\theta^3}{42} + \frac{\theta^5}{1320} - \dots \right)$$

No ponto SC quando $L = Ls$ (ponto de concordância da espiral com a circular), temos:

$$\theta_s = \frac{Ls}{2 \times Rc} \text{ (em radianos)}$$

$$X_s = Ls \times \left(1 - \frac{\theta_s^2}{10} + \frac{\theta_s^4}{216} - \dots \right) \text{ e } Y_s = Ls \times \left(\frac{\theta_s}{3} - \frac{\theta_s^3}{42} + \frac{\theta_s^5}{1320} - \dots \right) \text{ (em metros)}$$

Superelevação

Superelevação, e , é a inclinação transversal necessária nas curvas com objetivo de eliminar a força centrífuga desenvolvida nos veículos, dificultando sua derrapagem. É determinada pela seguinte equação (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004):

$$e = \frac{V^2}{g \times Rc} - f_t$$

Dada uma velocidade e o raio, o valor da superelevação deve obedecer a relação, $e_{\text{máx}} > e_1 > e_2 > 0$, e atender ao intervalo entre os seguintes valores:

$$e_1 = \frac{V^2}{127 \times Rc} \quad f_t = 0: \text{ o veículo é equilibrado exclusivamente pelo efeito da superelevação, não existindo atrito lateral, é considerada a situação de maior conforto.}$$

$$e_2 = \frac{V^2}{127 \times Rc} - f_{\text{máx}} \quad f_t = f_{\text{máx}}: \text{ o veículo é equilibrado com a contribuição de todo o atrito lateral possível.}$$

Dessa forma, qualquer variação da superelevação em função do raio da curva que estiver dentro dos limites estabelecidos (entre e_1 e e_2) atende às exigências mínimas de estabilidade do veículo na curva (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

A variação da superelevação é o processo de variação da seção transversal da estrada entre a seção normal, adotada no trecho em tangente (reta), e a seção superelevada adotada no trecho circular (curva), conforme mostra a Figura 4.6 (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

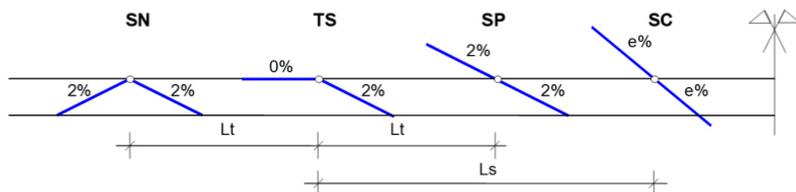
Figura 4.6 | Variação da seção transversal para obtenção da superelevação



Fonte: adaptada de Brasil (1999, p. 92).

A variação da superelevação (de 0 até $e\%$) deve ser realizada na curva de transição, conforme o raio da transição diminui, a superelevação irá aumentando até atingir o valor de $e\%$ no ponto SC do raio R_c , ponto de concordância entre a transição e a curva circular. O comprimento (L) do trecho de variação da superelevação será o próprio comprimento da transição (L_s). O processo de variação da superelevação mais comum é o do giro em torno do eixo da pista (Figura 4.7), pois altera pouco o greide do bordo externo, provoca menos distorções no pavimento, proporciona uma boa estética à curva e permite adotar um valor constante para a variação do ângulo de giro dos bordos ao longo da transição (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

Figura 4.7 | Variação da superelevação através do giro em torno do eixo



Fonte: adaptada de Brasil (1999, p. 94).



Refleta

Segundo o DNER (1999), o valor máximo adotado para a superelevação no projeto de curvas horizontais deve ser determinado em função dos seguintes fatores: condições climáticas (chuva, gelo ou neve); condições topográficas do local; tipo de área: rural ou urbana; frequência de tráfego lento.

Para estradas rurais, o valor máximo recomendado é de 12%, enquanto que para vias urbanas, o valor máximo é de 8%. O DNER (1999) recomenda o uso de $e_{máx} = 10\%$, quando não se tem informações detalhadas do local onde vai ser construída a estrada.

O que pode acontecer caso seja adotado um valor de superelevação acima do máximo? Como será o comportamento dos veículos em curvas com valores de superelevação acima do máximo?

Até aqui apresentamos para você os fatores que influenciam nos estudos de traçado rodoviário, os elementos básicos para um projeto geométrico, a importância das curvas horizontais circulares e com transição, além da superelevação de rodovias. Chegou a hora de você aplicar seus conhecimentos numa situação prática do dia a dia profissional como engenheiro, vamos lá?

Sem medo de errar

Seguindo as recomendações do DNER (1999), para definir a velocidade de projeto ou velocidade diretriz, é preciso definir a classe de projeto, que é função do VDM (volume diário médio) e do tipo de terreno em que será construída a rodovia. No caso dessa estrada, o terreno é ondulado e o VDM é de 1.200 veículos. Portanto, a partir da Tabela 4.1, você pode verificar que a estrada é Classe II e a velocidade de projeto ou velocidade diretriz é de 70 km/h.

A distância de frenagem, D_f , é obtida da Tabela 4.2, sendo que para pavimento molhado, a $Df_{molhado} = 109 \text{ m}$ e para o pavimento seco, a $Df_{seco} = 82 \text{ m}$.

A distância de visibilidade de ultrapassagem é obtida da Tabela 4.3, $D_u = 490 \text{ m}$.

Considerando que a curva será horizontal simples, você determinou o raio mínimo considerando as seguintes características: $V = 70 \text{ km/h}$; $e_{máx} = 10\%$ e $ft_{máx} = 0,15$.

$$Rc_{\min} = \frac{V^2}{127 \times (e_{máx} + ft_{máx})} \Rightarrow Rc_{\min} = \frac{70^2}{127 \times (0,10 + 0,15)} = 154,3 \text{ m}$$

Adotando o $R_c = 300$ m, vamos calcular os outros elementos da curva circular.

$$G = \frac{1146}{R_c} = \frac{1146}{300} = 3,82 \text{ graus}$$

$$T = R_c \times tg \frac{AC}{2} = 300,00 \times tg \frac{48}{2} = 133,57 \text{ m}$$

$$D = \frac{20 \times AC}{G} = \frac{20 \times 48}{3,82} = 251,31 \text{ m}$$

Vale lembrar que a distância entre estacas é de 20,00 m.

Para determinar a estaca do PI, você deve dividir 3.578,00 m por 20,00 m, o que resulta em 178,9. Isso significa que são 178 estacas inteiras + 18,00 m (0,9 multiplicado por 20,00 m).

Portanto, *Estaca* do PI = [E178 + 18,00 m]

$$\textit{Estaca} \text{ do PC} = [\textit{Estaca} \text{ do PI}] - T = [E178 + 18,00\text{m}] - 133,57 \text{ m}$$

$$\textit{Estaca} \text{ do PC} = 3.578,00 - 133,57 = 3.444,43 \text{ m} \Rightarrow \textit{Estaca} \text{ do PC} = [E172 + 4,43 \text{ m}]$$

$$\textit{Estaca} \text{ do PT} = [\textit{Estaca} \text{ do PC}] + D = [E172 + 4,43 \text{ m}] + 251,31 \text{ m}$$

$$\textit{Estaca} \text{ do PT} = 3.444,43 + 251,31 = 3.695,74 \text{ m} \Rightarrow \textit{Estaca} \text{ do PT} = [E184 + 15,74 \text{ m}]$$

Para determinar a estaca final, é preciso determinar a distância entre o PT e o final da estrada. Para isso, você deve subtrair da distância entre o PI e estaca final o valor da tangente (T), ou seja, $4.922,00 - T = 4.922,00 - 133,57 = 4.788,43$ m .

Somando o valor obtido com a estaca do PT, você encontrará a estaca final:

$$\textit{Estaca} \text{ final} = \textit{Estaca} \text{ do PT} + (4.922,00 - T) = 3.695,74 + 4.788,43 = 8.484,17 \text{ m}$$

Portanto, a estaca final = [E424 + 4,17 m].

Você já aprendeu quais os fatores que influenciam na escolha do traçado, assim como definir os elementos básicos para desenvolver o projeto geométrico (velocidades, distância de visibilidade, coeficiente de atrito e superelevação). Também já sabe como determinar as características geométricas de curvas horizontais, como raio, tangente, desenvolvimento e grau da curva. Já sabe determinar as estacas dos pontos notáveis das curvas horizontais. Dessa forma, cumpriu mais uma fase do seu processo de aprendizagem.

Que tal agora resolvermos um problema sobre a escolha do traçado e curvas horizontais?

Vamos lá, você já tem condições para isso.

Substituição da curva horizontal simples por uma curva horizontal com transição

Descrição da situação-problema

Você está desenvolvendo o projeto geométrico da rodovia que irá ligar duas comunidades no interior do estado de Minas Gerais. Inicialmente, você inseriu uma curva horizontal simples. No entanto, após alguns estudos, sua equipe chegou à conclusão de que é melhor trocar essa curva por uma com transição. Agora você terá de determinar as características geométricas da curva horizontal com transição (X_s , Y_s , p , k , TT , D), incluindo as estacas dos pontos notáveis.

Resolução da situação-problema

Inicialmente, você deve determinar o comprimento da curva de transição, L_s . Para isso, deve calcular o $L_{s_{\min}}$ e o $L_{s_{\max}}$, empregando as seguintes equações:

$$L_{s_{\min}} = 0,036 \times \frac{V^3}{Rc} = 0,036 \times \frac{70^3}{300} = 41,16 \text{ m}$$

$$L_{s_{\max}} = Rc \times AC \times \frac{\pi}{180} = 300 \times 48 \times \frac{\pi}{180} = 251,33 \text{ m}$$

A velocidade de projeto foi determinada em função da classe de projeto: $V = 70 \text{ km/h}$.

O ângulo central fornecido foi $AC = 48 \text{ graus}$.

A recomendação é adotar o $L_s = 2 \times L_{s_{\min}} = 2 \times 41,16 = 82,32 \text{ m}$.

Nesse caso, será adotado $L_s = 90 \text{ m}$.

Para determinar as estacas dos pontos notáveis, você precisa determinar os elementos da curva horizontal com transição: ângulo de transição (θ_s), X_s , Y_s , k , p , TT , δ , D .

$\theta_s = \text{ângulo da transição}$

$$\theta_s = \frac{L_s}{2 \times Rc} \Rightarrow \theta_s = \frac{L_s}{2 \times Rc} = \frac{90,0}{2 \times 300} = 0,15 \text{ rad}$$

$$X_s = L_s \times \left(1 - \frac{\theta_s^2}{10} + \frac{\theta_s^4}{216} - \dots \right) = 90,0 \times \left(1 - \frac{0,15^2}{10} + \frac{0,15^4}{216} \right) \Rightarrow X_s = 89,80 \text{ m}$$

Portanto, essa curva com transição terá as seguintes características:

$$L_s = 90 \text{ m} , TT = 178,97 \text{ m} , D = 161,40 \text{ m}$$

$$\text{Estaca do TS} = [E169+19,03 \text{ m}]$$

$$\text{Estaca do SC} = [E174+9,03 \text{ m}]$$

$$\text{Estaca do CS} = [E182+10,43 \text{ m}]$$

$$\text{Estaca do ST} = [E187+0,43 \text{ m}]$$

Faça valer a pena

1. A segurança em uma curva é fundamental para que não ocorra acidente (ODA, 2002). As curvas circulares devem atender às seguintes condições: garantir a estabilidade dos veículos que percorram a curva na velocidade diretriz (V) e garantir condições mínimas de visibilidade em toda a curva. Qual é o parâmetro que deve ser considerado na definição das características geométricas da estrada de forma que as curvas apresentem segurança para o usuário? (ODA, 2002)

Selecione a alternativa com a resposta correta.

- a) Rampa mínima de subida.
- b) Raio mínimo da curva.
- c) Inclinação longitudinal máxima.
- d) Comprimento mínimo da curva.
- e) Raio máximo da curva.

2. O raio adotado para uma curva é um dos parâmetros que influenciam no padrão da estrada, pois raios maiores proporcionam possibilidade de trafegar a uma velocidade mais alta. Qual é o menor raio que pode ser usado com segurança em uma curva horizontal de rodovia, com velocidade de projeto igual a 60 km/h, em uma via na zona urbana?

Indique a alternativa com a resposta correta.

- a) $R_{c_{min}} = 65,00 \text{ m}$
- b) $R_{c_{min}} = 238,48 \text{ m}$
- c) $R_{c_{min}} = 134,98 \text{ m}$
- d) $R_{c_{min}} = 98,65 \text{ m}$
- e) $R_{c_{min}} = 65,00 \text{ m}$

3. A superelevação é a inclinação transversal necessária nas curvas com a função de eliminar a força centrífuga desenvolvida nos veículos, impedindo sua derrapagem (ODA, 2002). Quais são os valores da superelevação e do coeficiente de atrito quando da operação na condição de maior conforto de trecho circular de uma curva com $R_c = 521,00$ m, sendo $V = 100$ km/h. (ODA, 2002)

Indique a alternativa com a resposta correta.

- a) $e = 6\%$
- b) $e = 10\%$
- c) $e = 1,5\%$
- d) $e = 15\%$
- e) $e = 8\%$

Perfil transversal e perfil longitudinal

Diálogo aberto

Prezado aluno, você já aprendeu que saber projetar curvas horizontais e verticais num projeto de rodovias é de extrema importância para garantir a segurança de seus usuários. Os raios de curvatura, ângulos de elevação e distâncias estão diretamente relacionados à visibilidade das pistas nas rodovias. Quanto melhor a visibilidade da pista, mais seguro ficam os movimentos de ultrapassagem realizados pelos motoristas. Essas características geométricas do traçado vão impactar as condições de operação da rodovia e precisam ser definidas de forma adequada para garantir a segurança de todos.

Trabalhando como engenheiro civil numa concessionária de rodovias, você foi designado para ser o responsável pelo desenvolvimento dos projetos das novas estradas que serão construídas.

Assumiu o projeto geométrico de um trecho curto de rodovia que ligará duas comunidades em uma região de relevo ondulado. Na fase anterior desse projeto, você já definiu o traçado em planta e as características geométricas das curvas horizontais da estrada (uma rodovia de classe II), que será construída em uma região de terreno ondulado e a velocidade de projeto é de 70 km/h. Agora vai ter que elaborar o projeto do perfil transversal e do perfil longitudinal da estrada, definindo características como número e largura das faixas de rolamento e do acostamento e os parâmetros necessários para projetar as curvas verticais, como os valores e comprimentos das rampas máximas, assim como os raios e comprimentos das curvas verticais, adotando a largura do canteiro central de 5,0 m e a drenagem terá 1,0 m. Vale ressaltar que é muito importante que o projeto do perfil longitudinal deve estar em harmonia com o traçado da planta. Como definir esses parâmetros e determinar essas características?

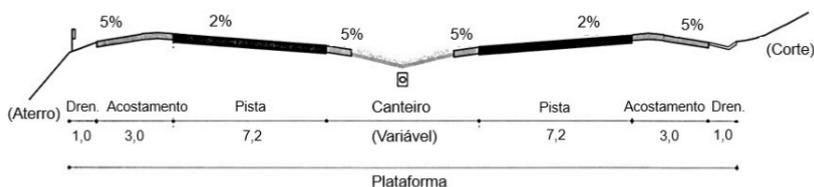
Para responder a essa pergunta e que você tenha condições de elaborar o projeto do perfil longitudinal da estrada, nesta seção vamos estudar quais parâmetros devem ser considerados no perfil longitudinal da estrada, quais os tipos de curvas e suas características (raios e comprimentos), como definir as rampas (inclinações e comprimentos), assim como calcular as cotas dos pontos das curvas verticais.

Vamos lá, temos muita coisa para aprender nesta seção.

Perfil transversal

O perfil transversal ou a seção transversal é o corte da estrada feito por um plano vertical ao eixo. Os elementos que compõem a seção transversal de uma estrada e suas dimensões são escolhidos e determinados em função do volume e das características do tráfego, classe e importância da estrada, assim como das condições mínimas de segurança. Os elementos básicos são: faixa de tráfego, pista de rolamento, acostamentos, taludes laterais, plataforma, espaços para drenagem, separador central, guias, faixa de domínio e pistas duplas independentes. A Figura 4.9 mostra uma seção tipo de uma rodovia de pista dupla com os elementos básicos.

Figura 4.9 | Seção tipo com os elementos básicos de um perfil transversal de uma rodovia de pista dupla



Fonte: Pimenta e Oliveira (2004, p. 64).

Faixa de tráfego ou faixa de rolamento: é o espaço destinado ao fluxo de veículos. **Pista de rolamento:** é o conjunto de duas ou mais faixas de tráfego. A largura da pista é a soma das larguras das faixas de tráfego que a compõem. A Tabela 4.5 apresenta a largura das faixas de tráfego em função do tipo de terreno (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

Tabela 4.5 | Largura das faixas de tráfego, em metros

Terreno	Classificação das Rodovias				
	Classe 0	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Plano	3,75	3,60	3,60	3,60	3,50 – 3,30
Ondulado	3,75	3,60	3,60	3,50	3,50 – 3,30
Montanhoso	3,60	3,60	3,50	3,30	3,30 – 3,00

Fonte: Pimenta e Oliveira (2004, p. 58).

Acostamentos: são faixas laterais, localizadas do lado externo das pistas, destinadas à parada de emergência dos veículos (Tabelas 4.6 e 4.7). A inclinação transversal deve variar de 3% a 5% dependendo do tipo de revestimento do acostamento. Em trechos em tangente, a inclinação deve ser

sempre maior que a da pista. Em trechos em curva superelevada, o acostamento do lado interno da curva pode manter a inclinação normal e do lado externo da curva deve ser inclinado para fora com inclinação mínima de 2% (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

Tabela 4.6 | Largura do acostamento direito, em metros

Terreno	Classificação das Rodovias				
	Classe 0	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Plano	3,50	3,50	3,00	2,50	2,00
Ondulado	3,00	2,50	2,50	2,00	2,00 – 1,50
Montanhoso	3,00	2,50	2,00	2,00	1,50 – 1,20

Fonte: Pimenta e Oliveira (2004, p. 59).

Tabela 4.7 | Largura do acostamento esquerdo, em metros

Terreno	Pistas de mão única – Classe 0 ou I		
	Número de faixas		
	2	3	4
Plano	0,60	3,00 – 2,50	3,00
Ondulado	0,60	2,50 – 2,00	3,00
Montanhoso	0,50	2,50 – 2,00	3,00 – 2,50

Fonte: Pimenta e Oliveira (2004, p. 60).

Taludes laterais: devem apresentar inclinações suaves, sendo acomodados ao terreno natural de forma contínua, sem variações bruscas de declividade. Ter inclinações suaves (1:4) em taludes baixos (de até 5,0 m) faz com que se aumente a segurança da estrada, melhorando as condições de visibilidade nas curvas em corte e oferecendo melhores condições para o plantio de vegetação na faixa de domínio (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

Plataforma: espaço que contém pistas, acostamentos, drenagem e separador central no caso de pistas duplas (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

Espaço para drenagem: em estradas de pista simples, recomenda-se deixar espaços de 1,0 m adjacentes aos acostamentos. Nas de pista dupla, além dos espaços laterais, são colocados dispositivos de drenagem ao longo do canteiro central (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

Guias: são recomendadas apenas para rodovias em áreas urbanas, onde as curvas verticais convexas deverão ter no máximo 5.000 m de

raio, e servem para auxiliar a drenagem, delinear e proteger as bordas do pavimento, melhorando a estética da estrada e reduzindo os custos de manutenção (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

Separadores centrais: servem para isolar as correntes de tráfego opostas e também para proporcionar a redução dos efeitos do ofuscamento noturno. Em regiões montanhosas, deve ter largura mínima de 1,5 m, e em regiões onduladas ou planas, de 3,0 m (Tabela 4.8). O tipo de seção transversal do separador depende de alguns fatores: largura disponível, tráfego, necessidade de dispositivos de drenagem e de defensas, etc. (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

Tabela 4.8 | Largura dos separadores centrais, em metros

Largura	Tipo
até 3 m	em nível, pavimentado ou gramado com meio-fio elevado e defesa
de 3 a 5 m	abaulado ou com depressão, pavimentado ou gramado
de 5 a 20 m	com depressão, inclinação transversal 4-1, gramado, drenagem central

Fonte: adaptada de DNER (1999, p. 154).

Faixa de domínio: é a faixa de largura constante destinada à construção da estrada, incluindo cortes e aterros, obras complementares, etc., e deve apresentar um espaço vazio de pelo menos 10 m de cada lado da estrada (Tabela 4.9) (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

Tabela 4.9 | Largura de faixas de domínio, em metros

Classe da rodovia	Mínima	Proximidade das cidades
Classe E	100	120
Classe I	50	80
Classe II	50	80
Classe III	50	80

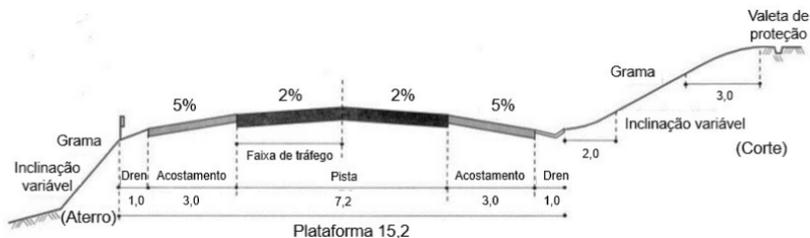
Fonte: Pimenta e Oliveira (2004, p. 62).

Pistas duplas independentes: para evitar problemas de ofuscamento e reduzir o custo de infraestrutura, em regiões onduladas ou montanhosas, recomenda-se a execução de um traçado para cada pista (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

Além desses elementos, a **inclinação transversal** (da pista e do acostamento), para escoamento de águas superficiais (chuvas), é uma característica

importante na composição do perfil transversal das rodovias. No caso de pistas simples, em trechos em tangente, as pistas devem ter uma inclinação transversal mínima de 2%, a partir do eixo, caindo para os dois lados (Figura 4.10). Nos trechos em curva, a pista deverá ter a superelevação de projeto. Os acostamentos pavimentados devem ter inclinação transversal (e) entre 2% e 5% e os não pavimentados, entre 4% e 6% (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

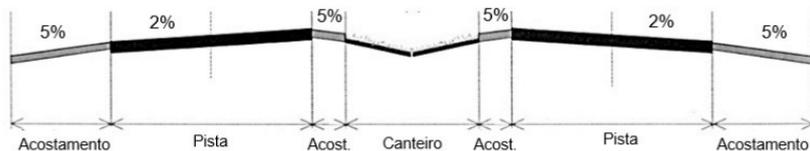
Figura 4.10 | Rodovia de pista única – seção tipo



Fonte: Pimenta e Oliveira (2004, p. 64).

Em estradas com pista dupla, nos trechos em tangente, pode-se considerar cada pista como se fosse pista simples. Uma alternativa é o uso de pistas com declividade única (Figura 4.11), o que elimina a mudança de inclinação transversal na passagem de uma faixa para outra (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

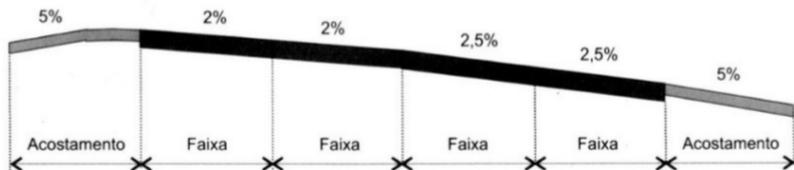
Figura 4.11 | Seções normais – pista dupla



Fonte: Pimenta e Oliveira (2004, p. 66).

Pistas com mais de duas faixas de tráfego com inclinação para o mesmo lado devem ter, nos trechos em tangente, inclinação de 2% nas duas primeiras faixas (no sentido do escoamento de água) e um acréscimo de 0,5% a 1% para cada conjunto de duas faixas (Figura 4.12). Nos trechos em curva, além desse acréscimo, poderá ser aumentada a inclinação das faixas da esquerda, considerando que, normalmente, são ocupadas pelos veículos mais rápidos (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

Figura 4.12 | Seção inclinada – pista de múltiplas faixas



Fonte: Pimenta e Oliveira (2004, p. 67).

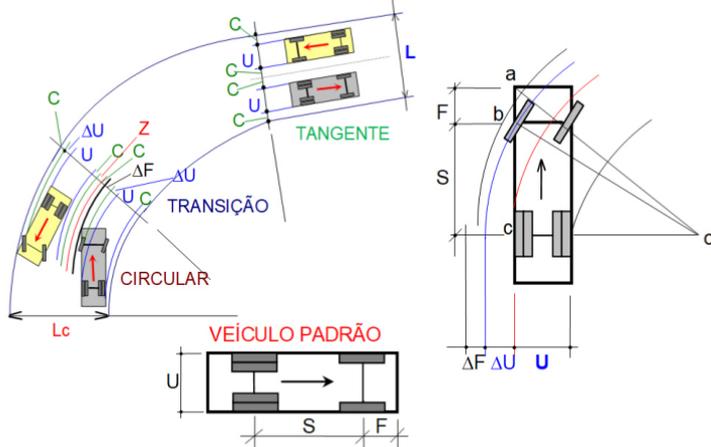


Assimile

Superlargura

As estradas com pistas estreitas e/ou com curvas fechadas necessitam de um alargamento (ΔL) de sua pista nos trechos em curva, mesmo que a velocidade do veículo seja baixa, porque a trajetória dos pontos externos do veículo é mais larga que o gabarito transversal do veículo em linha reta (Figura 4.13).

Figura 4.13 | Trajetória dos veículos em curvas



Fonte: adaptada de Brasil (1999, p. 75).

Considerando uma estrada de pista simples, duas faixas de tráfego com largura (L) no trecho tangente e largura $L_c > L$ no trecho circular, pode-se determinar o alargamento (ΔL) empregando a seguinte equação:

$$\Delta L = L_c - L$$

onde: L = largura da pista em tangente, em metros $\Rightarrow L = 2 \times U + 4 \times C$

U = largura do veículo padrão, em metros

C = espaço de segurança, em metros (Tabela 4.10)

Tabela 4.10 | Largura de segurança (C) em função da largura da pista (L)

Valores de L (m)	6,00 – 6,40	6,60 – 6,80	7,00 – 7,20
Valores de C (m)	0,60	0,75	0,90

Fonte: elaborada pela autora.

A largura da estrada no trecho circular será:

$$L_c = 2 \times (U + \Delta U) + 4 \times C + \Delta F + Z \quad \text{ou} \quad L_c = L + 2 \times \Delta U + \Delta F + Z$$

onde: L_c = largura da pista no trecho de curva circular em metros

ΔU = acréscimo de largura do veículo devido à diferença de trajetória das rodas dianteiras e traseiras

$$\Delta U = R_c - \sqrt{R_c^2 - S^2}$$

ΔF = acréscimo de largura devido à frente do veículo

$$\Delta F = \sqrt{R_c^2 + F \times (2S + F)} - R_c$$

Z = espaço de segurança para compensar a maior dificuldade de operação do veículo nas curvas, em metros

$$Z = \frac{V}{10 \times \sqrt{R_c}}$$

onde:

V = velocidade de projeto em km/h

R_c = raio da curva circular em metros

S = distância entre os eixos do veículo padrão

F = distância entre o eixo dianteiro e a frente do veículo padrão

Substituindo na equação de ΔL , temos:

$$\Delta L = L_c - L = L + 2 \times \Delta U + \Delta F + Z - L \Rightarrow \Delta L = 2 \times \Delta U + \Delta F + Z$$

Os valores de U , S e F são apresentados em seguida.

Valores de $U = 2,6$ m

Valores de S

- caminhões e ônibus de 2 eixos, não articulados (CO) = 6,1 m
- veículos comerciais articulados (SR) = 10,0 m

Valores de $F = 1,2$ m

Perfil longitudinal: rampas e curvas verticais

O perfil longitudinal do terreno é a representação no plano vertical das diferenças de nível (cotas), enquanto o perfil longitudinal de uma estrada é constituído por retas concordadas por curvas verticais ao longo do eixo da estrada (DNER, 1999).

O perfil longitudinal deve possibilitar que os veículos percorram a estrada com segurança e uma razoável uniformidade na velocidade de operação. A escolha desse perfil ideal está diretamente ligada ao custo da estrada, especialmente ao custo da terraplenagem. As condições geológicas

e geotécnicas das áreas atravessadas pela estrada vão influenciar diretamente na escolha do perfil, pois podem implicar a execução de cortes e aterros e de serviços especiais de alto custo, como escavações em rocha, obras especiais de drenagem ou de estabilização de solos. A definição da altura de corte ou de aterro deve atender às características técnicas mínimas, como concordância com outras estradas, cotas mínimas de aterros para deixar a estrada acima dos níveis de enchentes do local, etc. (DNER, 1999).

A linha que define o perfil do projeto é denominada greide, ou seja, é a linha curva representativa do perfil longitudinal do eixo da estrada acabada, composto de trechos retos, denominados de rampas, concordados entre si por trechos curvos, denominados de curvas de concordância vertical. No projeto, a linha tracejada é usada para representar o perfil do terreno, enquanto que a linha sólida é usada para representar o greide (perfil do eixo da estrada e as rampas e curvas de concordância verticais) (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

As rampas de até 8% têm pouca influência sobre veículos de passageiros (carros), sendo que até 3%, a operação é praticamente igual à dos trechos em nível. No caso de caminhões em rampas ascendentes, a velocidade depende de alguns fatores, como: inclinação e comprimento da rampa, peso e potência do caminhão, velocidade de entrada da rampa, habilidade e vontade do motorista (PIMENTA e OLIVEIRA, 2004).

A Tabela 4.11 apresenta as rampas máximas recomendadas em função do tipo de terreno e da classe da rodovia (DNER, 1999).

Tabela 4.11 | Rampas máximas (%)

Terreno	Classificação das Rodovias				
	Classe 0	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Plano	3	3	3	3	3
Ondulado	4	4,5	5	5 a 6	5 a 7
Montanhoso	5	6	6	6 a 7 a 9	

Fonte: Pimenta e Oliveira (2004, p. 99).

Recomenda-se adotar a rampa mínima de 1% para auxiliar na drenagem de águas pluviais, principalmente em estradas sem condições de retirada de água no sentido transversal.

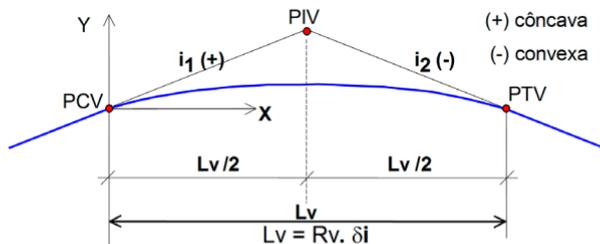
Além da inclinação, é muito importante determinar o comprimento crítico das rampas. Trechos de estrada subsequentes, com comprimento de rampas muito curtas, devem ser evitados, pois podem gerar problemas de visibilidade para ultrapassagem. No entanto, rampas com grande extensão reduzem a velocidade, gerando problemas de congestionamento de tráfego.

O comprimento crítico de uma rampa é definido como o máximo comprimento de uma determinada rampa ascendente, na qual um veículo pode operar sem uma perda excessiva de velocidade. A velocidade nos acíves depende da inclinação, do comprimento, do peso/potência e da velocidade dos caminhões na entrada da rampa.

Curvas verticais

As curvas de concordância verticais têm como objetivo concordar as rampas projetadas e atender às condições de segurança, boa aparência, boa visibilidade e permitir a drenagem adequada da estrada. As curvas mais utilizadas são as parábolas, que apresentam boa concordância entre as rampas (Figura 4.14).

Figura 4.14 | Propriedades das curvas verticais parabólicas



Fonte: elaborada pela autora.

$\delta i = i_2 - i_1$ = diferença algébrica entre as inclinações das tangentes

L_v = comprimento da curva vertical

- rampas ascendentes (+)
- rampas descendentes (-)

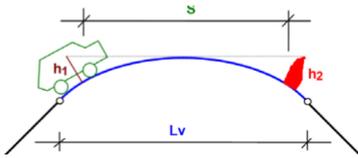
O comprimento da curva vertical (L_v) é obtido pela seguinte equação: $L_v = R_v \times \delta i$, onde R_v é o menor raio da parábola (no vértice), sendo que para curvas convexas adota-se R_v negativo (-) e para as curvas côncavas, R_v positivo (+).

O comprimento mínimo ($L_{v_{min}}$) das curvas verticais é determinado em função das condições necessárias de visibilidade das curvas, ou seja, do espaço necessário a uma frenagem segura diante de um obstáculo parado na pista. Quando as condições mínimas de visibilidade são atendidas, a curva apresenta condições de conforto e boa aparência.

No caso das curvas verticais convexas, o comprimento mínimo deve ser calculado de acordo com as situações apresentadas na Figura 4.15.

Figura 4.15 | Comprimento mínimo de curvas verticais convexas

a) Veículo e obstáculo sobre a curva vertical:

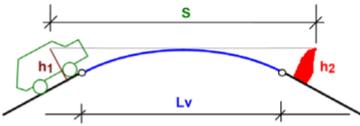


$$S = Df \leq Lv \Rightarrow Lv_{\min} = \frac{|\delta i| \times Df^2}{4,04}$$

$$h_1 = 1,07 \text{ m (vista do motorista)}$$

$$h_2 = 0,15 \text{ m (altura do obstáculo)}$$

b) Veículo e obstáculo sobre as rampas:



$$S = Df \geq Lv \Rightarrow Lv_{\min} = 2 \times Df - \frac{4,04}{|\delta i|}$$

$$Lv \geq 0,6 \times V, \text{ onde: } V = \text{velocidade de projeto}$$

Fonte: adaptada de Brasil (1999, p. 130-131).

No caso de curvas verticais côncavas, o comprimento mínimo é função das condições de conforto, da drenagem e da visibilidade noturna, podendo ser obtido de acordo com as situações apresentadas na Figura 4.16.

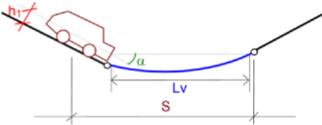
Figura 4.16 | Comprimento mínimo de curvas verticais côncavas

a) Veículo sobre a curva vertical:



$$S = Df \leq Lv \Rightarrow Lv_{\min} = \frac{|\delta i| \times Df^2}{1,2 + 0,035 \times Df}$$

b) Veículo sobre a rampa:



$$S = Df > Lv \Rightarrow Lv_{\min} = 2 \times Df - \frac{1,2 + 0,035 \times Df}{|\delta i|}$$

$$Lv \geq 0,6 \times V$$

Fonte: adaptada de Brasil (1999, p. 132-133).

Vale ressaltar que, para cada tipo de curva (côncava ou convexa), você deve determinar os comprimentos mínimos para as duas situações e considerar os maiores valores obtidos em cada caso, lembrando que sempre deve atender à condição $Lv \geq 0,6 \times V$.

Para aumentar o conforto e a segurança das estradas, recomenda-se usar curvas côncavas com os maiores comprimentos possíveis. As curvas de

mesmo raio apresentam maior conforto que nas curvas convexas, porque o efeito da gravidade e centrífuga tendem a compensar-se, enquanto que nas côncavas tendem a somar-se.

Cálculo das estacas e das cotas dos pontos das curvas verticais parabólicas

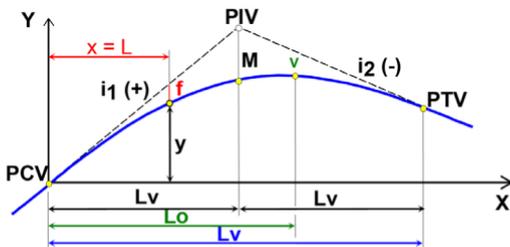
Estacas: $Estaca\ PCV = [Estaca\ PIV] - \frac{Lv}{2}$ Cotas: $Cota\ PCV = Cota\ PIV - i_1 \times \frac{Lv}{2}$

$Estaca\ PTV = [Estaca\ PIV] + \frac{Lv}{2}$ $Cota\ PTV = Cota\ PIV + i_2 \times \frac{Lv}{2}$

Equação da curva: $y = \frac{\delta i}{2 \cdot Lv} x^2 + i_1 \cdot x$

Coordenadas em relação ao PCV de alguns pontos singulares da curva (Figura 4.17):

Figura 4.17 | Pontos singulares da curva vertical parabólica



Fonte: adaptada de Fernandes Júnior (1999a, p. 42).

PCV: $x = 0, y = 0$ PTV: $x = Lv, y = (i_1 + i_2) \times \frac{Lv}{2}$

M: $x = \frac{Lv}{2}, y = \frac{\delta i}{8} + \frac{i_1 \times Lv}{2}$

V: ponto de ordenada máxima ou mínima da curva:

$L_o = -i_1 \times Rv$ (abscissa do ponto V) $y_o = -\frac{i_1^2 \times Lv}{2 \times \delta i}$ (ordenada do ponto V)

$f = -\frac{\delta i}{2 \times Lv} x^2$, sendo que no PIV, a flecha é máxima: $F = -\frac{\delta i \times Lv}{8}$

Considerações gerais sobre o traçado em planta e perfil combinados

As curvas horizontais e verticais não devem ser projetadas de forma independente, pois são complementares e, portanto, uma má combinação pode ressaltar os aspectos negativos e ofuscar os pontos positivos do projeto. Um projeto elaborado de forma adequada, em que curvas horizontais e verticais são bem combinadas, proporciona maior segurança, permitindo que os

veículos possam trafegar a uma velocidade uniforme, sem custos adicionais (FERNANDES JUNIOR, 1999b). A harmonização das curvas horizontais com as curvas verticais favorece as principais características que uma rodovia deve proporcionar aos usuários: conforto, segurança e economia. A velocidade de projeto determina os valores-limites de muitos elementos, tais como o raio mínimo e a distância de visibilidade, e também afeta muitos outros, como a largura das faixas e a rampa máxima. Para obter uma boa combinação das curvas horizontais com as verticais, devem ser seguidas as considerações gerais (FERNANDES JUNIOR, 1999b):

- Equilíbrio dos raios das curvas horizontais com as rampas: evitar retas ou curvas com grandes raios e rampas excessivas ou longos trechos em rampa, assim como curvas com raios pequenos e rampas suaves.
- Curva horizontal com pequeno raio deve ser evitada no topo ou perto do topo de uma curva vertical: a curva horizontal deve ser mais longa do que a curva vertical (adotar valores bem acima dos mínimos requeridos pela velocidade de projeto).
- Curva horizontal com pequeno raio não deve ser introduzida perto de ponto baixo de uma curva vertical com rampas acentuadas.
- Em rodovias com pista simples, em virtude da necessidade de pontos de ultrapassagem em número e frequência suficientes, podem ser necessários longos trechos em tangente, ainda que com o comprometimento da harmonia entre curvas horizontais e verticais.
- Em rodovias com pistas duplas, variação da largura do canteiro central e o uso de perfis e traçados independentes resultam em vantagens operacionais.

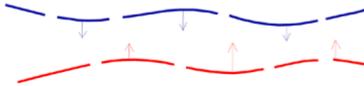
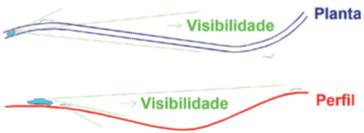


Exemplificando

Alguns exemplos do que se deve e do que não se deve fazer em projetos geométricos de rodovias (FERNANDES JUNIOR, 1999b):

Quadro 4.1 | Exemplos de compatibilidade perfil x traçado

<p>A) Tangente curta entre curvas horizontais, no topo de uma curva vertical convexa: dificulta a percepção da segunda curva.</p>	
<p>B) Efeito deslocado: o início da curva horizontal é escondido por uma curva vertical convexa, enquanto a continuação da curva é visível para o motorista.</p>	

C) Coincidência das curvas horizontais e verticais: resulta em boa aparência.	 <p>Diagrama C: Planta (topo) e Perfil (fundo) com curvas coincidentes. A planta mostra uma curva horizontal (azul) e uma curva vertical (vermelha) que se alinham perfeitamente. O perfil mostra uma curva vertical (vermelha) e uma curva horizontal (azul) que também se alinham perfeitamente. Há setas indicando a correspondência entre as curvas.</p>
D) Oposição das curvas horizontais e verticais: resulta em boa aparência.	 <p>Diagrama D: Planta (topo) e Perfil (fundo) com curvas opostas. A planta mostra uma curva horizontal (azul) e uma curva vertical (vermelha) que se opõem. O perfil mostra uma curva vertical (vermelha) e uma curva horizontal (azul) que também se opõem. Há setas indicando a correspondência entre as curvas.</p>
E) Balanceamento do traçado em planta: devem ser evitadas longas tangentes seguidas por curvas curtas.	 <p>Diagrama E: Planta (topo) com uma tangente longa (azul) seguida por curvas curtas (vermelhas). O perfil (fundo) mostra uma curva vertical (vermelha) seguida por uma curva horizontal (azul).</p>
F) Exemplo de boa compatibilização entre curvas horizontais e verticais.	 <p>Diagrama F: Planta (topo) e Perfil (fundo) com compatibilização entre curvas horizontais e verticais. A planta mostra uma curva horizontal (azul) e uma curva vertical (vermelha) que se compatibilizam. O perfil mostra uma curva vertical (vermelha) e uma curva horizontal (azul) que também se compatibilizam. Há setas indicando a compatibilização e a visibilidade (Verisibilidade) em verde.</p>

Fonte: adaptado de Fernandes Junior (1999b, p. 66-68).



Refleta

No desenvolvimento do projeto do perfil longitudinal da estrada, além da inclinação, é muito importante determinar o comprimento crítico das rampas. Recomenda-se que trechos de estrada subsequentes com comprimento de rampas muito curtas devem ser evitados, assim como rampas com grande extensão. Por quê? Quais as consequências que podem ocorrer? Você consegue imaginar o impacto dessas características geométricas na visibilidade nas pistas? Consegue se lembrar de alguma experiência que você teve dirigindo em rodovias pelo nosso país?



Dica

Aprofunde seus conhecimentos sobre perfil longitudinal de uma estrada, com a leitura do arquivo a seguir:
FEC. Estradas – Perfis longitudinais.

Quanta coisa você já aprendeu até aqui, não é mesmo?

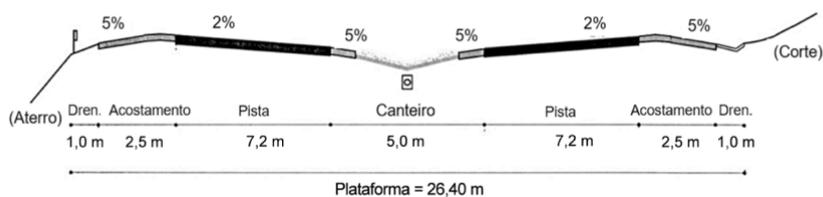
Estudou sobre o perfil transversal em projetos de rodovias, a importância das larguras da faixa de rolamento e do acostamento, as rampas e curvas verticais no perfil longitudinal, além de várias considerações gerais sobre o traçado em planta e perfil combinados.

Preparado para aplicar na prática esses conceitos? Vamos lá, você tem algumas decisões importantes para tomar sobre isso no seu projeto.

Na fase anterior do projeto que você está desenvolvendo, você definiu o traçado da estrada e as características geométricas das curvas horizontais. Agora vai precisar elaborar o projeto do perfil longitudinal da estrada. Para isso, vai definir as características geométricas, como número e largura das faixas de rolamento e do acostamento, largura do canteiro central e de drenagem, as inclinações transversais, assim como as características das curvas verticais (raios e comprimentos) e das rampas (inclinações e comprimentos).

Considerando que a rodovia de classe II, de pistas duplas, será construída em uma região de terreno ondulado e a velocidade de projeto é de 70 km/h, a largura de cada faixa de rolamento será de 3,6 m (Tabela 4.5), a largura dos acostamentos será de 2,5 m (Tabela 4.6), a largura do canteiro central adotada será de 5,0 m e a drenagem terá 1,0 m, totalizando uma plataforma de 26,0 m. As inclinações transversais das pistas e do acostamento serão 2% e 5%, respectivamente, e a faixa de domínio deve ter 50,0 m, segundo a Tabela 4.9. O perfil transversal selecionado é apresentado na Figura 4.9.

Figura 4.9 | Perfil transversal com os elementos básicos



Fonte: adaptada de Pimenta e Oliveira (2004, p. 64).

Em função das características do terreno (ondulado) e da classe da rodovia (II), as rampas máximas devem ter 5% (Tabela 4.11). Dessa forma, considerando as rampas ascendentes e descendentes de 5%, a diferença algébrica é $\delta i = i_2 - i_1 = -5\% - (+5\%) \Rightarrow \delta i = -10\%$ (curvas convexas) e $\delta i = i_2 - i_1 = 5\% - (-5\%) \Rightarrow \delta i = 10\%$ (curvas côncavas).

Considerando a distância de frenagem em piso molhado, $D_f = 109$ m (Tabela 4.2, Seção 4.1) e a diferença algébrica $|\delta i = 10\%|$, vamos determinar o comprimento mínimo das curvas verticais. Para isso, você deve calcular os comprimentos mínimos considerando os casos apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16.

Para curvas convexas, você deve empregar as seguintes equações:

$$L_{v_{\min}} = \frac{|\delta i| \times D_f^2}{4,04} = \frac{0,10 \times 109,00^2}{4,04} = 294,08 \text{ m (veículo e obstáculo sobre a curva vertical)}$$

$$L_{v_{\min}} = 2 \times Df - \frac{4,04}{|\delta i|} = 2 \times 109,00 - \frac{4,04}{0,10} = 177,60 \text{ m (veículo e obstáculo sobre as rampas)}$$

No caso de curvas côncavas, os comprimentos mínimos são obtidos da seguinte forma:

$$L_{v_{\min}} = \frac{|\delta i| \times Df^2}{1,2 + 0,035 \times Df} = \frac{0,10 \times 109,00^2}{1,2 + 0,035 \times 109,00} = 236,91 \text{ m (veículo sobre a curva vertical)}$$

$$L_{v_{\min}} = 2 \times Df - \frac{1,2 + 0,035 \times Df}{|\delta i|} = 2 \times 109,00 - \frac{1,2 + 0,035 \times 109,00}{0,10} = 167,85 \text{ m (veículo sobre a rampa)}$$

Para selecionar os comprimentos mínimos, você deve considerar os maiores valores obtidos em cada caso e que atendam à condição $L_v \geq 0,6 \times V = 0,6 \times 70 \Rightarrow L_v \geq 42,00 \text{ m}$.

Portanto, para curvas convexas, o comprimento mínimo das curvas verticais será de 294,08 m e para curvas côncavas, o comprimento mínimo será de 236,91 m.

Para determinar os raios das curvas verticais, vamos aplicar a equação $L_v = R_v \times \delta i$.

$$L_v = R_v \times \delta i \Rightarrow R_v = \frac{L_v}{\delta i} = \frac{294,08}{-0,10} = -2.940,80 \text{ m (curvas convexas)}$$

$$L_v = R_v \times \delta i \Rightarrow R_v = \frac{L_v}{\delta i} = \frac{236,91}{0,10} = 2.369,10 \text{ m (curvas côncavas)}$$

A partir desses valores, vamos adotar valores inteiros para R_v e L_v :

$$R_{v_{\text{convexas}}} = -3.000,00 \text{ m e } L_v = R_v \times \delta i = -3.000 \times -0,10 \Rightarrow L_v = 300,00 \text{ m}$$

$$R_{v_{\text{côncavas}}} = 2.500,00 \text{ m e } L_v = R_v \times \delta i = -2.500 \times -0,10 \Rightarrow L_v = 250,00 \text{ m}$$

Você já aprendeu como determinar os elementos básicos do perfil transversal da rodovia, como definir as características das curvas verticais (raios e comprimentos) e das rampas (inclinações e comprimentos), assim como calcular as estacas e cotas dos pontos das curvas verticais.

Dessa forma, cumpriu mais uma fase do seu processo de aprendizagem.

Que tal agora resolvermos um problema sobre curvas verticais?

Vamos lá, você já tem condições para isso!

Determinação das estacas e cotas das curvas verticais

Descrição da situação-problema

Você está desenvolvendo o projeto da rodovia que irá ligar duas comunidades no interior do estado de Minas Gerais.

Conforme recomendação, para que a planta esteja em harmonia com o perfil longitudinal, as curvas verticais foram traçadas de forma que estejam em concordância com as curvas horizontais, e as estacas e as cotas dos PIVs obtidas foram:

Estaca do $PIV_1 = [E180 + 12,00 \text{ m}]$ e *Cota* do $PIV_1 = 853,30 \text{ m}$

Estaca do $PIV_2 = [E285 + 10,00 \text{ m}]$ e *Cota* do $PIV_2 = 892,50 \text{ m}$

Após definir os elementos do perfil transversal e algumas características das curvas verticais (inclinações: $i_1 = +5\%$, $i_2 = -5\%$, $i_3 = -5\%$ e $i_4 = +5\%$; e os comprimentos das curvas: $Lv_1 = 300,00 \text{ m}$ e $Lv_2 = 250,00 \text{ m}$), você terá que determinar suas cotas e estacas, aplicando as seguintes equações:

$$\text{Estacas: } Estaca\ PCV = [Estaca\ PIV] - \frac{Lv}{2} \quad \text{Cotas: } Cota\ PCV = Cota\ PIV - i_1 \times \frac{Lv}{2}$$

$$Estaca\ PTV = [Estaca\ PIV] + \frac{Lv}{2} \quad Cota\ PTV = Cota\ PIV + i_2 \times \frac{Lv}{2}$$

Resolução da situação-problema

Vamos determinar as estacas e cotas de cada curva vertical.

Para a curva 1:

$$Estaca\ PCV_1 = Estaca\ PIV_1 - \frac{Lv_1}{2}$$

Vale lembrar que a distância entre estacas é de 20,00 m.

$$[E180 + 12,00 \text{ m}] = 180 \times 20,00 \text{ m} + 12,00 \text{ m} = 3.612,00 \text{ m}$$

$$Estaca\ PCV_1 = [E180 + 12,00 \text{ m}] - \frac{300,00 \text{ m}}{2} = 3.612,00 - 150,00 = 3.462,00 \text{ m}$$

Para determinar a Estaca do PCV_1 , você deve dividir 3.462,00 m por 20,00 m, o que resulta em 173,1. Isso significa que são 173 estacas inteiras + 2,00 m (0,1 multiplicado por 20,00 m).

Portanto,

$$\text{Estaca do PCV}_1 = [E173 + 2,00 \text{ m}]$$

$$\text{Estaca PTV}_1 = [\text{Estaca PIV}_1] + \frac{Lv_1}{2} = 3.612,00 + 150,00 \Rightarrow \text{Estaca PTV}_1 = [E188 + 2,00 \text{ m}]$$

$$\text{Cota PCV}_1 = \text{Cota PIV}_1 - i_1 \times \frac{Lv_1}{2} = 853,30 - (+0,05 \times 150,00) = 845,80 \text{ m}$$

$$\text{Cota PTV}_1 = \text{Cota PIV}_1 + i_2 \times \frac{Lv_1}{2} = 853,30 - (-0,05 \times 150,00) = 860,80 \text{ m}$$

Para curva 2, temos:

$$\frac{Lv_2}{2} = \frac{250,00 \text{ m}}{2} = 125,00 \text{ m}$$

$$\text{Estaca PCV}_2 = [\text{Estaca PIV}_2] - \frac{Lv_2}{2} = 5.710,00 - 125,00 \Rightarrow \text{Estaca PCV}_2 = [E279 + 5,00 \text{ m}]$$

$$\text{Estaca PTV}_2 = [\text{Estaca PIV}_2] + \frac{Lv_2}{2} = 5.710,00 + 125,00 \Rightarrow \text{Estaca PTV}_2 = [E291 + 15,00 \text{ m}]$$

$$\text{Cota PCV}_2 = \text{Cota PIV}_2 - i_3 \times \frac{Lv_2}{2} = 892,50 - (-0,05 \times 125,00) = 898,75 \text{ m}$$

$$\text{Cota PTV}_2 = \text{Cota PIV}_2 + i_4 \times \frac{Lv_2}{2} = 892,50 - (+0,05 \times 125,00) = 886,25 \text{ m}$$

Dessa forma, você já determinou as cotas e as estacas das curvas verticais da estrada do seu projeto:

$$\text{Estaca do PCV}_1 = [E173 + 2,00 \text{ m}] \text{ e } \text{Cota PCV}_1 = 845,80 \text{ m}$$

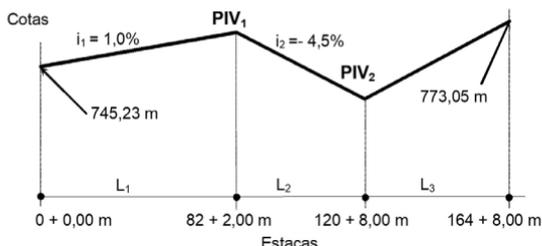
$$\text{Estaca PTV}_1 = [E188 + 2,00 \text{ m}] \text{ e } \text{Cota PTV}_1 = 860,80 \text{ m}$$

$$\text{Estaca PCV}_2 = [E279 + 5,00 \text{ m}] \text{ e } \text{Cota PCV}_2 = 898,75 \text{ m}$$

$$\text{Estaca PTV}_2 = [E291 + 15,00 \text{ m}] \text{ e } \text{Cota PTV}_2 = 886,25 \text{ m}$$

1. As curvas verticais são definidas a partir do traçado horizontal da estrada sobre o terreno natural, onde as suas rampas variam de acordo com as características do terreno, uma vez que a recomendação é que o greide seja o mais próximo possível do terreno natural. Para definir as características das curvas verticais, é necessário conhecer os seus PIVs (Pontos de Intersessão vertical). Sendo conhecidos os dados apresentados no perfil da Figura 4.18, você deve determinar as cotas do PIV_1 e do PIV_2 .

Figura 4.18 | Perfis do terreno natural



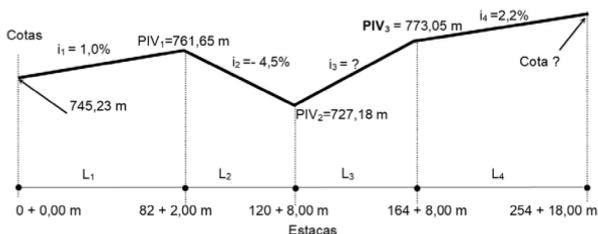
Fonte: elaborada pela autora.

Selecione a alternativa com a resposta correta.

- a) $PIV_1 = 727,18$ m e $PIV_2 = 761,65$ m
- b) $PIV_1 = 761,65$ m e $PIV_2 = 727,18$ m
- c) $PIV_1 = 721,65$ m e $PIV_2 = 777,18$ m
- d) $PIV_1 = 728,81$ m e $PIV_2 = 796,12$ m
- e) $PIV_1 = 779,70$ m e $PIV_2 = 745,23$ m

2. No projeto do perfil longitudinal da estrada que você está desenvolvendo, foi recomendado que seja adicionada uma nova curva vertical, conforme apresentado no perfil da Figura 4.19. Determine a rampa i_3 e a cota do ponto final.

Figura 4.19 | Perfis do terreno natural



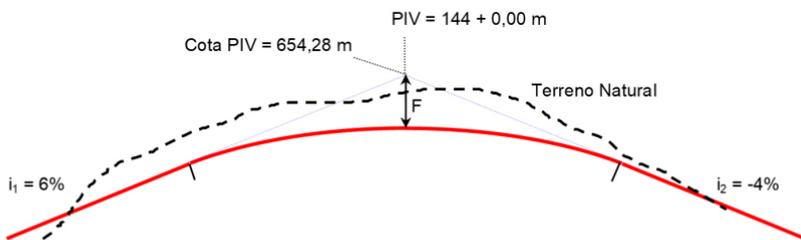
Fonte: elaborada pela autora.

Selecione a alternativa com a resposta correta.

- a) $i_3 = 5,21\%$ e cota do ponto final = 788,87 m
- b) $i_3 = 2,51\%$ e cota do ponto final = 812,87 m
- c) $i_3 = 5,21\%$ e cota do ponto final = 833,23 m
- d) $i_3 = 2,51\%$ e cota do ponto final = 733,23 m
- e) $i_3 = 5,21\%$ e cota do ponto final = 812,87 m

3. No projeto de uma rodovia de pista dupla, com $V = 100 \text{ km/h}$, as rampas foram definidas conforme esquema apresentado na Figura 4.20. Deseja-se que, na estaca 144, a altura de corte seja a menor possível, respeitando-se a condição mínima de visibilidade. Sabendo-se que a cota do terreno na estaca 144 é 653,71 m, determine a altura de corte, o raio da curva vertical e as estacas do PCV e do PTV.

Figura 4.20 | Esquema das rampas da rodovia



Fonte: elaborada pela autora.

Utilize os dados da Tabela 4.2 para determinar o valor da distância de frenagem (D_f).

Tabela 4.2 | Valores de coeficiente de atrito (f) e distância de frenagem adotados para projeto

Velocidade de projeto (km/h)	50	60	70	80	90	100	110	120
Pavimento seco	0,62	0,60	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54
Pavimento molhado	0,36	0,34	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
Df_{seco} (m)	51	66	82	99	119	140	163	189
$Df_{molhado}$ (m)	62	84	109	137	165	201	235	279

Fonte: adaptada de Brasil (1999, p. 52).

Indique a alternativa com as respostas corretas.

- a) $h_{\text{corte}} = 11,93 \text{ m}$, $R_v = 10000 \text{ m}$, $\text{Estaca PCV} = 169 + 0,00 \text{ m}$ e $\text{Estaca PTV} = 119 + 10,00 \text{ m}$
- b) $h_{\text{corte}} = 1,93 \text{ m}$, $R_v = 1000 \text{ m}$, $\text{Estaca PCV} = 139 + 0,00 \text{ m}$ e $\text{Estaca PTV} = 189 + 10,00 \text{ m}$
- c) $h_{\text{corte}} = 11,93 \text{ m}$, $R_v = 10000 \text{ m}$, $\text{Estaca PCV} = 119 + 0,00 \text{ m}$ e $\text{Estaca PTV} = 169 + 0,00 \text{ m}$
- d) $h_{\text{corte}} = 19,13 \text{ m}$, $R_v = 10000 \text{ m}$, $\text{Estaca PCV} = 119 + 0,00 \text{ m}$ e $\text{Estaca PTV} = 169 + 10,00 \text{ m}$
- e) $h_{\text{corte}} = 11,93 \text{ m}$, $R_v = 5000 \text{ m}$, $\text{Estaca PCV} = 119 + 0,00 \text{ m}$ e $\text{Estaca PTV} = 169 + 0,00 \text{ m}$

Terraplenagem e interseções rodoviárias

Diálogo aberto

Olá, aluno.

Nossa, quanta coisa você aprendeu até aqui, não é mesmo?

Conheceu as principais características geométricas de vias e aprendeu conceitos importantes sobre solos, pavimentação, drenagem e, nesta unidade, já estudou sobre a importância da definição do traçado para o projeto da rodovia.

Você aprendeu que o traçado precisa ser definido de tal forma que permita que os veículos possam utilizá-la de forma segura. As condições de relevo (geológicas e geotécnicas) da região onde a estrada será construída terão grande influência na determinação do perfil da rodovia, sendo muitas vezes necessário fazer algumas movimentações de terra para conseguir um perfil mais seguro. Esse processo de nivelamento do solo para poder implantar a rodovia é chamado de terraplenagem. Ela pode contemplar aterros e escavações (cortes). Como a rodovia será construída sobre essa base de solo nivelado, é extremamente importante que o processo de terraplenagem atenda aos parâmetros previstos em projeto.

Nesta seção, vamos estudar mais sobre este tema e você terá oportunidade de aplicar esses conceitos naquele projeto de rodovia em que você já está trabalhando.

Durante a elaboração do projeto do perfil longitudinal, você se deparou com a necessidade de mudar o terreno, indicando o corte em alguns pontos e tendo que aterrar em outros. Como determinar e representar os volumes de materiais que serão movimentados em cortes ou aterros? Como indicar graficamente esse movimento de terra? Quais os parâmetros para elaborar um diagrama de massas?

Para responder a essas questões, nesta seção, vamos tratar sobre terraplenagem, que é justamente o movimento de material de um ponto para outro. Vamos aprender como calcular os volumes de corte e aterro, desenvolver um diagrama de massas, assim como determinar os serviços e equipamentos necessários para executar a obra.

Para facilitar o desenvolvimento do projeto, você elaborou a planilha com os dados apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 | Planilha com cálculo de volumes

Estaca	Área da seção (m ²)	
	Corte	Aterro
0	0	0
1	9,48	0
2	16,73	0
3	64,52	0
4	109,76	0
5	98,37	0
6	67,42	0
7	30,70	0
8	7,90	18,53
9	0	76,83
10	0	221,60
11	0	75,02
12	11,39	1,78
13	59,14	0
14	69,37	0
15	25,82	0
16	0	0

Largura da plataforma: 14,00 m, taludes 1:1 e coeficiente de redução = 1,20.

Fonte: elaborada pela autora.

Para finalizar, nesta seção, vamos ver os principais parâmetros para elaborar um projeto de interseção rodoviária e como o programa AutoCAD Civil 3D pode auxiliar no desenvolvimento de um projeto geométrico de estradas.

Ao finalizar esta seção, você terá condições de elaborar um projeto geométrico completo, definindo os elementos das curvas horizontais e verticais, as estacas dos pontos notáveis das curvas horizontais e as cotas das curvas verticais, de forma que o perfil e a planta estejam em harmonia. Além disso, será capaz de elaborar o projeto de terraplenagem, calculando os volumes de corte e aterro que serão movimentados, definindo os serviços e equipamentos necessários para a obra, assim como saberá quais os parâmetros para desenvolver um projeto de interseção rodoviária.

Tem muita coisa interessante para ver nesta seção. Vamos lá?

Terraplenagem: classificação de materiais, cálculo de volumes, diagrama de massas

Segundo Pereira *et al.* (2015), terraplenagem é “a operação destinada a conformar o terreno existente aos gabaritos definidos em projeto”. De forma geral, a terraplenagem consiste na execução dos serviços de corte (escavação de materiais) e de aterro (transportes, deposição e compactação de materiais), com a finalidade de oferecer características geométricas adequadas ao volume de veículos que irão percorrer a rodovia.

Vale lembrar que o projeto de uma estrada deve procurar harmonizar os elementos geométricos da planta e do perfil, de forma que a estrada atenda de forma adequada à região por ela percorrida, com segurança, conforto e economia, e, preferencialmente, a um baixo custo de construção.

O custo do movimento de terra, definido no projeto de terraplenagem, é significativo em relação ao custo total da rodovia. Por esse motivo, no projeto, deve-se priorizar, sempre que possível, o equilíbrio entre os volumes de corte e aterro, e evitar operações de empréstimos e/ou bota-foras.

Para entender sobre terraplenagem, algumas definições importantes, baseadas em Pereira *et al.* (2015), são apresentadas a seguir:

Corte: consiste na escavação do terreno natural para se atingir a linha do greide de projeto, de forma que possa definir, transversal e longitudinalmente, o corpo estradal (PEREIRA *et al.*, 2015).

Aterro: constitui a adição de materiais (proveniente de corte ou empréstimo) para a composição do corpo estradal, de acordo com o projeto. A execução do aterro compreende as atividades de descarga, espalhamento, correção da umidade (umedecimento ou aeração) e compactação dos materiais (PEREIRA *et al.*, 2015).

Empréstimo: consiste na escavação em local previamente definido com o objetivo de obter material destinado a complementar o volume necessário à execução de aterro, por insuficiência de volume dos cortes, ou por razões técnicas (baixa qualidade do material) ou de ordem econômica (elevada distância de transporte) (PEREIRA *et al.*, 2015).

Bota-fora: consiste no volume de material que, por excesso ou por condição geotécnica insatisfatória, é escavado dos cortes e levado e depositado em áreas externas à rodovia, pois não será utilizado na terraplenagem (PEREIRA *et al.*, 2015).

Classificação de materiais

Na elaboração do projeto da rodovia, devem ser analisados os materiais disponíveis para execução das obras de terraplenagem. O custo de terraplenagem varia diretamente com a resistência que o material pode apresentar durante a sua extração nas operações de cortes. Segundo a especificação de serviço DNIT ES 105 (DNIT, 2009c), os materiais são classificados em três categorias (PEREIRA *et al.*, 2015):

- Materiais de 1ª e 2ª categorias: solos, rochas em decomposição, seixos rolados, com a dimensão máxima de 0,15 metro, além de materiais que podem ser escavados por trator escavo-transportador de pneus, empurrados por trator de esteiras ou por escavadeira hidráulica.
- Material de 2ª categoria com escarificador: pedras soltas e rochas fraturadas (em blocos de volume inferior a $0,50 \text{ m}^3$); rochas alteradas (com exceção das incluídas na 1ª categoria e de resistência inferior à da rocha sã) e as rochas brandas, que exigem extração com emprego de escarificador.
- Material de 2ª categoria com explosivos: são os materiais de 2ª categoria que, para sua extração, faz-se necessário o desmonte prévio realizado com escarificador ou explosivo de baixa potência.
- Material de 3ª categoria: rochas sãs, incluindo matacões maciços e rochas fraturadas com volume igual ou superior a 2 m^3 , que devem ser extraídos após redução em blocos, sendo necessário o uso contínuo de explosivos.

Para seleção de materiais que serão empregados nas obras de terraplenagem, é essencial avaliar as características mecânicas e físicas por meio dos ensaios em laboratório. Segundo a instrução de projeto do DER-SP (2005), o material de aterro pode ser solo, pedregulho ou solo contendo fragmento de rocha. Os materiais devem atender aos parâmetros de capacidade de suporte (CBR) e expansão: $CBR \geq 6\%$ e $expansão < 1\%$.

Cálculo de volumes

Para calcular os volumes, devemos antes definir as seções transversais, que podem ser de diferentes tipos: em corte, em aterro ou mista (Figura 4.21).

Figura 4.21 | Seções transversais



Fonte: Oda (2002, p. 50).

Além disso, deve-se admitir que o terreno varia de forma linear entre duas seções consecutivas, uma vez que, para distância entre seções de 20 metros, não incide erro significativo. O levantamento das seções transversais deve ser feito em cada estaca inteira do traçado (estaca de 20 metros).

O volume de terra entre as seções consecutivas é determinado da seguinte forma:

$$V_c = \frac{(A_{c_i} + A_{c_{i+1}})}{2} \times L \Rightarrow V_c = \text{volume de corte (m}^3\text{)}$$

$$V_a = \frac{(A_{a_i} + A_{a_{i+1}})}{2} \times L \Rightarrow V_a = \text{volume de aterro (m}^3\text{)}$$

$$A_c = \text{área de corte da seção } i \text{ (m}^2\text{)}$$

$$L = \text{distância entre seções (m)}$$

Ponto de passagem (PP) = ponto onde termina o corte e começa o aterro ou ponto onde termina o aterro e começa o corte.

Volumes de cortes e aterros: volume geométrico total de cortes e/ou aterros obtido pela somatória dos valores calculados entre as diversas seções (FERNANDES JÚNIOR, 1999 *apud* ODA, 2002).

O volume de corte é a medida geométrica do volume natural de solo a ser escavado. O material transportado e aplicado no aterro sofre um processo de emolamento no transporte e de compactação na aplicação, em função do aumento da densidade do material (para garantir estabilidade do aterro), resultando em uma redução de volume. Em função dessa redução, o volume de aterro deve ser corrigido por um fator de redução, obtendo como volume de aterro corrigido o produto entre o volume geométrico e o fator de redução, $f_r = 1,05$ a $1,30$ (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

a) **Quando o volume de corte é maior que o volume do aterro:** $V_c > V_a$

- V_a = volume compensado lateralmente (V): é o volume escavado no corte e colocado no aterro da própria seção, portanto, não está sujeito a transporte longitudinal, $V = V_a$.

- $V = V_c - V_a$ = volume de corte do trecho entre seções escavado no corte e transportado para um aterro, estando, portanto, sujeito a transporte longitudinal.

b) Quando o volume de aterro é maior que o volume do corte: $V_a > V_c$

- V_c = volume compensado lateralmente, $V = V_c$
- $V = V_a - V_c$ = volume de aterro do trecho com transporte longitudinal.
- Para qualquer um dos casos, o volume V compensado lateralmente será o menor entre os volumes, V_a ou V_c , e o volume sujeito a transporte longitudinal será a diferença entre o maior e o menor volume. Vale lembrar que deve ser considerado o volume de aterro corrigido.

Compensação de volumes: o volume V (volume compensado lateral) será escavado e transportado do corte para o aterro no próprio trecho e não será considerado na compensação longitudinal da estrada. O volume restante de materiais poderá ser transportado e aplicado no aterro quando for adequado para a execução de aterro. A operação de transporte do material do corte para o aterro é denominada “compensação longitudinal de volumes” ou simplesmente compensação de volumes (FERNANDES JÚNIOR, 1999 *apud* ODA, 2002).

Quando não ocorre compensação total de volumes, pode sobrar ou faltar material. O volume de material que não for utilizado (que sobrar) será transportado para fora da estrada, em uma operação denominada *bota-fora*. O material faltante deve ser escavado de um local conveniente, transportado e depositado no aterro em uma operação denominada *empréstimo* (FERNANDES JÚNIOR, 1999 *apud* ODA, 2002).



Assimile

Cálculo dos volumes acumulados

Convenção para medida de volumes:

- positiva para medida dos volumes de corte (+ V_c)
- negativa para os volumes de aterros (- V_a)

O volume acumulado é a soma algébrica de seus cortes e aterros, sendo que deve ser considerado o volume de aterro corrigido pelo fator de redução, $f_r = 1,05$ a $1,30$ (PIMENTA; OLIVEIRA, 2004).

A Tabela 4.13 apresenta um resumo de como devem ser calculados os volumes acumulados.

Tabela 4.13 | Cálculo de volumes acumulados

Estaca	Área		Volume						
	Corte	Aterro	Corte, Vc	Aterro, Va	Aterro corrigido, $Va_{(corrigido)}$	Com- pen- sação lateral	Transporte longitudinal		Acu- mu- lado
							Corte	Aterro	
			+	—	x (fr)		+	—	Σ
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)

Fonte: Oda (2002, p. 52).

- (1) estacas nos pontos onde foram levantadas as seções;
- (2) área de corte, medida nas seções (m²);
- (3) área de aterro, medida nas seções (m²);
- (4) $= A_{i(corte)} + A_{i+1(corte)} \times 10$;
- (5) $= A_{i(aterro)} + A_{i+1(aterro)} \times 10$;
- (6) produto da coluna (5) pelo fator de redução $= (5) \times (fr)$;
- (7) volume compensado lateralmente, que não está sujeito a transporte longitudinal = menor volume entre $Va_{(corrigido)}$ e Vc ;
- (8) e (9) volumes sujeitos ao transporte longitudinal, compensação entre corte e aterro $= (Vc - Va_{(corrigido)})$ ou $= (Va_{(corrigido)} - Vc)$;
- (10) volume acumulado, resultado da soma algébrica acumulada dos volumes obtidos nas colunas (8) e (9) $= V_i + V_{i+1}$.



Exemplificando

A partir dos dados das áreas das seções transversais apresentados na Tabela 4.14, você deve determinar os volumes acumulados de materiais, considere o $fr = 1,1$.

Tabela 4.14 | Exemplo de cálculo de volumes acumulados

Estaca	Área (m ²)		Volume (m ³)						
	Corte	Aterro	Corte (+)	Aterro (-)	Aterro corrigido (-)	Comp. lateral	Transp. longitu- dinal		Acumulado
							Corte (+)	Aterro (-)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
0	10,15	17,15	376,50	231,50	254,65	254,65	121,85		121,85
1	27,50	6,00	1064,80	60,00	66,00	66,00	998,80		1120,65
2	78,98	0,00	1420,80	0,00	0,00	0,00	1420,80		2541,45
3	63,10	0,00	997,50	32,50	35,75	35,75	961,75		3503,20
4	36,65	3,25	196,73	69,66	76,63	76,63	120,10		3623,30
4+8,60	9,10	12,95	51,87	444,89	489,37	51,87		437,50	3185,80

Fonte: adaptada de Oda (2002, p. 56).

Para determinar os volumes de corte (coluna 4) e de aterro (coluna 5), você deve considerar $V = A_{i(\text{corte})} + A_{i+1(\text{corte})} \times 10$ e $V = A_{i(\text{aterro})} + A_{i+1(\text{aterro})} \times 10$. Você pode observar que as equações não definem se o valor determinado é referente à estaca 0 ou 1. Por isso, para preencher a planilha, você pode considerar o primeiro valor na linha da estaca 0 ou na linha da estaca 1. Caso considere da estaca 0, a última estaca ficará sem valor ou com valor 0,00. Caso considere da estaca 1, a primeira estaca ficará com valor 0,00. Nesse exemplo, vamos considerar o primeiro valor na estaca 0.

Para determinar o volume de corte (coluna 4) da estaca 0, você deve somar as áreas de corte (coluna 2) da estaca 0 com a da estaca 1 e multiplicar por 10.

$$V_c = (A_{\text{corte (estaca 0)}} + A_{\text{corte (estaca 1)}}) \times 10 = (10,15 + 27,50) \times 10 = 376,50 \text{ m}^3$$

Repetir o mesmo processo para determinar o volume de aterro (coluna 5):

$$V_a = (A_{\text{aterro (estaca 0)}} + A_{\text{aterro (estaca 1)}}) \times 10 = (17,15 + 6,00) \times 10 = 231,50 \text{ m}^3$$

Em seguida, você deve determinar o volume de aterro corrigido (coluna 6), multiplicando o volume do aterro (coluna 5) pelo fator de redução, $fr = 1,1$:

$$V_{a_{\text{corrigido}}} = V_a \times fr \Rightarrow V_{a_{\text{corrigido (estaca 0)}}} = 231,50 \times 1,1 = 254,65 \text{ m}^3$$

O volume compensado lateralmente é o menor entre $V_{a_{\text{corrigido}}}$ e V_c , portanto será $V_{a_{\text{corrigido}}} = 254,65 \text{ m}^3$.

Para determinar os volumes sujeitos ao transporte longitudinal, você deve calcular a compensação entre corte e aterro $= (V_c - V_{a_{\text{corrigido}}})$ ou $= (V_{a_{\text{corrigido}}} - V_c)$:

$$V_c - V_{a_{\text{corrigido}}} = 376,50 - 254,65 = 121,85 \text{ m}^3.$$

Para determinar o volume acumulado, você deve fazer a soma acumulada dos volumes obtidos nas colunas (8) e (9) $= V_i + V_{i+1}$. Por exemplo, o volume acumulado da estaca 0 = volume de corte da estaca 0 (coluna 8). O volume acumulado da estaca 1 é volume acumulado da estaca 0 (coluna 10) mais o volume de corte (coluna 8) da estaca 1 $= 121,85 + 998,80 = 1120,65 \text{ m}^3$.



Refleta

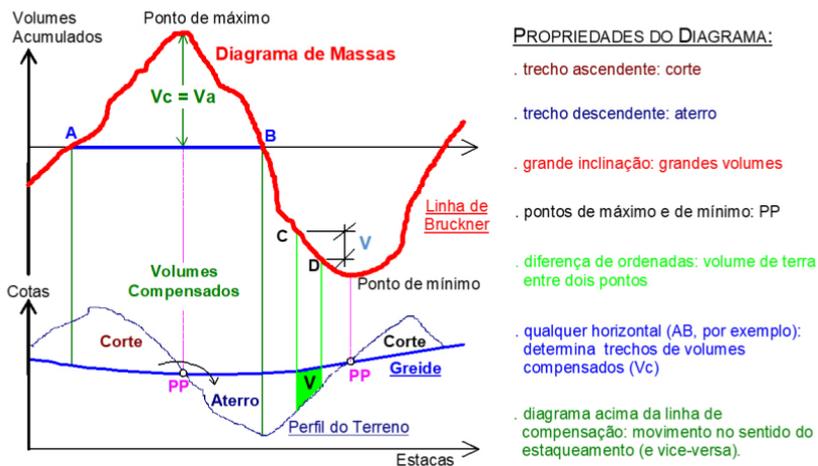
Geralmente, o material aplicado nos aterros sofre um processo de compactação (para garantir estabilidade dos aterros), que resulta em uma diminuição de volume. Em função desse processo, o volume de aterro deve ser corrigido por um fator de redução, sendo denominado volume corrigido de aterro ($V_{a_{\text{corrigido}}} = V_a \times fr$). O que pode acontecer se não for feita a correção do volume de aterro?

Diagrama de massas – Método de Bruckner

O diagrama de massas (Figura 4.22), mais conhecido como diagrama de Bruckner, é a representação gráfica dos volumes acumulados, sendo utilizado

para realizar o estudo de compensação corte-aterro, assim como para fazer a programação de bota-foras e empréstimos e dos equipamentos necessários para executar a obra (FERNANDES JÚNIOR, 1999 apud ODA, 2002). Para elaboração do diagrama de massas, considera-se que cortes e aterros serão executados na direção longitudinal da estrada e que as distâncias de transporte são lineares. No entanto, na realidade, os cortes são executados de cima para baixo e os aterros de baixo para cima, além disso, os caminhos de serviço nem sempre são retos, sendo, muitas vezes, sinuosos. Apesar disso, o diagrama de Bruckner ainda é considerado um processo preciso e confiável.

Figura 4.22 | Diagrama de massas



Fonte: Fernandes Júnior (1999 apud ODA, 2002, p. 53).

Momento de transporte é o produto do volume transportado multiplicado pela distância de transporte (Figura 4.23). Geralmente é medido nas unidades $m^3 \times dam$ ou $m^3 \times km$. A distância média de transporte, dm , deve ser igual à distância entre os centros de massa dos trechos de corte e aterro compensados (FERNANDES JÚNIOR, 1999 apud ODA, 2002).

$$MT = V \times dm$$

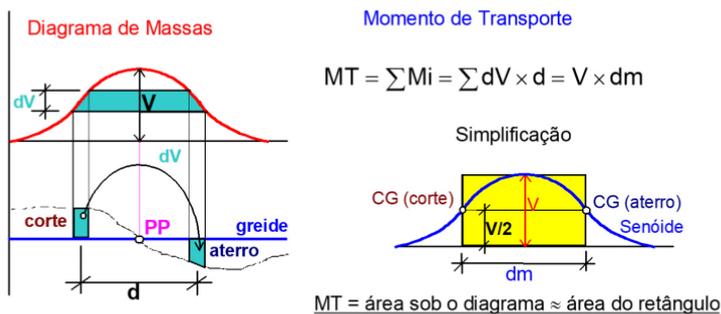
onde:

MT = momento de transporte do trecho ($m^3 \times dam$ ou $m^3 \times km$)

V = volume natural de solo (m^3)

dm = distância média de transporte (dam ou km)

Figura 4.23 | Momento de transporte



Fonte: Fernandes Júnior (1999 *apud* ODA, 2002, p. 54).

Linha de compensação: é toda linha horizontal traçada sobre o diagrama de massas que corta pelo menos uma onda, sendo que todas as ondas devem ser cortadas ou tangenciadas por apenas uma linha de compensação. Para seleção da linha de compensação, deve ser considerada a máxima distância econômica de transporte, isso é, a distância a partir da qual é mais econômico fazer empréstimo e bota-fora, do que transportar o material do corte para o aterro. A diferença de ordenadas entre duas linhas de compensação corresponde a um volume de bota-fora (linha de compensação ascendente) ou de empréstimo (linha de compensação descendente) (Figura 4.24).

Figura 4.24 | Linha de compensação



Fonte: Fernandes Júnior (1999 *apud* ODA, 2002, p. 55).

Terraplenagem: serviços e composição de equipamentos

Os principais serviços realizados em obras de terraplenagem já foram citados e são: cortes, aterros, empréstimos e bota-foras. No entanto, antes de executar a terraplenagem, é necessário realizar os serviços preliminares (DNIT, 2009a), que consistem no desmatamento (corte e a remoção de toda a vegetação existente no local), destocamento e limpeza da área (escavação e a remoção total dos tocos e da camada de solo orgânico) onde será construída a rodovia. Além disso, pode ser necessário realizar a remoção de postes, cercas, estruturas de madeira e a demolição de estruturas de alvenaria.

Após a realização dos serviços preliminares, é necessário abrir caminhos de serviço para o equipamento que transportará o material do corte para o aterro (DNIT, 2009b). Os caminhos de serviço também podem ser executados em locais de acesso às ocorrências de materiais que serão utilizados nas obras de pavimentação e drenagem, como pedreiras (pedra britada), jazidas (solos em geral) e areais (areia).

Os principais equipamentos empregados para realizar esses serviços são apresentados em seguida (PEREIRA *et al.*, 2015).

Unidades tratoras: os tratores (de rodas ou de esteiras) são os equipamentos básicos utilizados em serviços de terraplenagem, e exercem as funções de tracionar ou empurrar outras máquinas. O trator de pneus (rodas) apresenta vantagens em função de sua maior velocidade (até 70 km/h), o que favorece seu emprego em maiores distâncias. Já o trator de esteiras desempenha melhor suas atividades em terreno com forte declividade ou com baixa capacidade de suporte, em função da sua melhor aderência, apesar da baixa velocidade (a máxima é da ordem de 10 km/h).

Unidades escavo-empurradoras: unidades equipadas com lâmina frontal empregadas nos serviços de escavar e empurrar o material. A lâmina convencional apresenta seção transversal curva, contendo em sua parte inferior uma peça cortante (“faca”). Conforme o tipo da lâmina, são classificados em dois tipos:

- Bulldozer: equipamento em que a lâmina é posicionada perpendicular ao eixo longitudinal do trator. Como os movimentos são apenas ascendentes ou descendentes, só é possível realizar a escavação e o transporte para a frente.
- Angledozer ou trator com lâmina angulável: realiza o deslocamento da lâmina no entorno de seu eixo vertical, além dos mesmos movimentos do bulldozer. Isso possibilita que o material escavado seja depositado lateralmente, formando uma “leira”. Em seção mista, esse tipo de equipamento facilita a execução de compensação lateral.

As principais tarefas realizadas pelos tratores de lâminas são: desmatamento, destocamento e limpeza de terreno; construção de caminhos de serviço; execução de compensação lateral; escavação e transporte de material a distância inferior a 50 metros; e em aterro, realiza o espalhamento do material depositado por unidade transportadora.

Unidades escavo-transportadoras: executam as atividades de escavação, carga, transporte e descarga de materiais soltos, entre distâncias médias e longas. Existem dois tipos básico: o *scraper* rebocado e o *motoscraper*. O *scraper* rebocado consiste em um equipamento tracionado por uma unidade

tratora, constituído por uma caçamba sobre dois eixos equipados com pneus. No *motoscraper*, a caçamba é apoiada diretamente na unidade tratora, que pode ser um trator rebocador, composto por um único eixo de pneus. Para realizar a escavação, a caçamba é abaixada e o avental é levantado, fazendo com que a lâmina de corte entre em contato com o terreno. Com o deslocamento do *scraper*, o material cortado é empurrado para o interior da caçamba. Após o carregamento da caçamba, esta é levantada e o “avental” se fecha, podendo-se realizar o transporte até o local de destino. Para a descarga, a caçamba é abaixada, tomando-se o cuidado para que não toque o terreno, e, ao mesmo tempo, a placa de ejeção é acionada, empurrando o material para frente para auxiliar a sua saída (PEREIRA *et al.*, 2015).

Unidades escavo-carregadora: são equipamentos utilizados na operação de escavação e carga do material escavado para outro equipamento. As principais unidades escavo-carregadoras são as escavadeiras e as carregadeiras.

Carregadeira: mais conhecida como pá-carregadeira, é composta por uma caçamba frontal acionada por braços de comando hidráulico, montada sobre tratores de esteiras ou de pneus. A operação de uma carregadeira consiste no enchimento da caçamba, recuo do equipamento, avanço sobre a unidade transportadora, descarga do material da caçamba e retorno à posição original.

Escavadeira ou pá-mecânica: consiste em um equipamento apoiado sobre esteiras, que trabalha estacionado, sendo que a carga e descarga do material são realizadas pela movimentação da sua superestrutura. A escavadeira executa sua operação por meio de sistemas de lança e caçamba, acionados por cabo de aço ou cilindro hidráulico. Cada sistema é recomendado para tipos específicos de escavação: pá-frontal ou *shovel*; escavadeira com caçamba de arrasto (*drag-line*); escavadeira com caçamba de mandíbulas (*clam-shell*), e retroescavadeira (*back-shovel*) (PEREIRA *et al.*, 2015).

Unidade aplainadora (motoniveladora): esse equipamento é usado apenas para os serviços de acabamento final da área terraplenada. A motoniveladora é composta por uma unidade tratora, que contém uma lâmina posicionada entre os seus eixos dianteiro e traseiro (sendo que a lâmina pode ser de vários tipos e tamanhos) e pode ter também escarificadores (dianteiro e traseiro). São usadas principalmente para: remover a vegetação e a camada vegetal; construir valas; espalhar materiais empilhados; misturar dois ou mais materiais na pista; fazer o acabamento da plataforma de terraplenagem e de camada granular de pavimento (PEREIRA *et al.*, 2015).

Unidades transportadoras: são equipamentos empregados em serviços de terraplenagem quando o uso de *motoscrapers* é considerado antieconômico, em função da distância de transporte ser muito grande. Realizam apenas os serviços

de transporte e descarga e os tipos mais usados são: caminhão basculante; vagões; *dumpers*; e os caminhões “fora-de-estrada” (PEREIRA *et al.*, 2015).

Unidades compactadoras: são equipamentos empregados na compactação dos materiais depositados nos aterros, com o objetivo de reduzir os índices de vazios, aumentando sua estabilidade. Os principais tipos de equipamentos usados em serviços de terraplenagem são: rolo de pneus; rolo pé-de-carneiro e rolo vibratório.

Além desses, segundo Pereira *et al.* (2015), os outros equipamentos que podem ser utilizados são:

- Grade de discos e pulvimisturador: equipamentos usados para homogeneizar ou reduzir o teor de umidade dos solos, antes da compactação.
- Caminhão irrigador: equipamento usado para espalhar água sobre uma camada de solo, aumentando o seu teor de umidade.
- Compressor de ar e perfuratriz: equipamentos empregados na perfuração de minas compostas por materiais rochosos por meio do uso de explosivos e, posteriormente, realizar o desmonte de materiais de 3ª categoria.

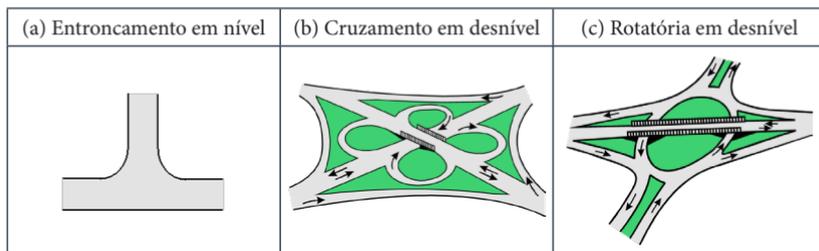
Interseções rodoviárias

Os locais onde ocorrem o cruzamento ou entroncamento de duas ou mais vias são denominados de interseções rodoviárias. O tipo de interseção tem grande importância no projeto de uma estrada porque pode interferir na segurança, capacidade de tráfego, velocidade de operação, além de representar custo significativo em relação ao custo total da rodovia (PIMENTA; OLIVEIRA, 1996 apud ODA, 2002).

As interseções são divididas em dois grupos: em nível, quando as estradas se interceptam na mesma cota, em um ponto comum, e em desnível, quando vias e/ou ramos da interseção cruzam em cotas diferentes. Além desses grupos, as interseções são classificadas em três subgrupos:

- **Entroncamento**: local em que uma via começa ou termina em outra via (Figura 4.25a).
- **Cruzamento**: local em que uma via for cortada por outra via (Figura 4.25b).
- **Rotatória**: local em que duas ou mais vias encontram-se, sendo necessário o uso de uma praça central de distribuição do tráfego (Figura 4.25c).

Figura 4.25 | Interseções



Fonte: Fernandes Júnior (1999 *apud* ODA, 2002, p. 2-3).

Os parâmetros que influenciam na seleção do tipo de interseção são: capacidade de escoamento de tráfego, segurança e conforto das vias e da interseção e custos das obras.

Interferências na corrente de tráfego: os veículos que transitam por uma interseção podem juntar-se formando nova corrente de tráfego, separar-se em duas ou mais correntes ou cruzar-se entre si. Os pontos de união, separação ou cruzamento são definidos como (PIMENTA; OLIVEIRA, 1996 *apud* ODA, 2002):

- ponto de convergência: local da interseção onde duas ou mais correntes de tráfego juntam-se para formar uma nova corrente;
- ponto de divergência: local da interseção onde uma determinada corrente de tráfego separa-se formando novas correntes;
- trecho de entrelaçamento: quando a trajetória dos veículos de duas ou mais correntes independentes se combinam (convergência), formando uma corrente única (trecho de entrelaçamento) e logo se separam (divergência);
- ponto de conflito: todo local da interseção onde correntes de tráfego cruzam-se entre si.

Uma interseção deve ser projetada de forma a evitar pontos de conflito. No entanto, alguns pontos de conflito podem ser aceitos, desde que não comprometam o livre escoamento do tráfego e, principalmente, a segurança dos veículos. Para evitar que ocorra congestionamento, faz-se necessária a introdução de uma faixa adicional de aceleração ou desaceleração, de comprimento e largura variável, em função da velocidade de projeto.

Velocidade: como a determinação das características geométricas mínimas das interseções está diretamente associada à velocidade, a escolha da velocidade nos ramos terá grande influência na qualidade e no custo da interseção. Por isso, recomenda-se que a velocidade de projeto dos ramos

(V_r) das interseções fique entre 60% e 70% da velocidade de projeto (V) das vias, ou seja, $V_r = k \times V$, onde $k =$ coeficiente = 0,6 a 0,7. Em interseções, sem trechos de entrelaçamento ou pontos de conflito, em que a previsão é de alto volume de tráfego, recomenda-se utilizar o valor $k = 0,75$.

Para projetos de interseções com dispositivos de canalização de tráfego, é importante a definição de veículos padrões que representam o tipo de tráfego esperado.

As condições mínimas de visibilidade das vias também devem ser atendidas nas interseções. Além disso, tanto a planta quanto o perfil dos ramos devem ter características geométricas (raios de curvas) que proporcionem uma visibilidade da pista maior ou igual à distância de frenagem estabelecida para a velocidade de projeto do ramo. A recomendação é que os pontos de convergência e divergência de correntes de tráfego devem ser visíveis a uma distância mínima de cem metros.

Vale ressaltar que o projeto de uma interseção requer uma análise cuidadosa, mesmo considerando que os critérios de seleção dos elementos geométricos de uma interseção sejam praticamente os mesmos adotados para as estradas, pois a operação de uma rodovia é diretamente afetada pelo projeto de suas interseções.

Utilização do programa AutoCAD Civil 3D para execução de um projeto geométrico

Atualmente, o desenvolvimento de projetos geométricos de rodovias pode ser realizado empregando programas computacionais específicos, como é o caso do AutoCAD Civil 3D, que fornece ferramentas para o desenvolvimento de diversos projetos de infraestrutura.

O AutoCAD Civil 3D é uma ferramenta com tecnologia moderna e avançada para ser empregada no desenvolvimento de projetos de estradas, barragens, entre outras aplicações, onde o usuário pode gerar o modelo digital do terreno natural a partir do levantamento topográfico. Por exemplo, a partir do modelo digital do terreno natural, o usuário pode construir os alinhamentos, os perfis e todos os detalhes necessários ao desenvolvimento do projeto de uma estrada (PEREIRA *et al.*, 2017).

Você pode baixar a versão free do software no site da AUTODESK.



Dica

Para saber mais sobre o AutoCAD Civil 3D, você pode ver os diversos vídeos do professor Beto Camelini sobre o uso do Civil 3D no desenvolvimento do projeto geométrico de rodovias. Destacamos alguns:

- BETO CAMELINI. Aula 006 – Introdução geral ao projeto de rodovias usando AutoCAD Civil 3D.
- _____. Aula 008 – AutoCAD Civil 3D Rodovias passo 2 – Criar alinhamento horizontal.
- _____. Aula 010 – AutoCAD Civil 3D Rodovias passo 4 – Criar o perfil projetado.

Agora você já sabe como desenvolver um projeto geométrico completo. Nesta seção, você aprendeu como fazer o projeto de terraplenagem, quais os parâmetros que devem ser considerados na seleção do tipo de interseção rodoviária e quais os equipamentos que podem ser utilizados nas obras de terraplenagem, além de ter aprendido como usar o Civil 3D no desenvolvimento de projetos. Portanto, já tem conhecimento para desenvolver projeto geométrico de uma rodovia, com todos os componentes (planta, perfil, seções transversais, terraplenagem).

Preparado para aplicar esses conceitos na solução de um problema prático?

Vamos lá, você já tem conhecimentos suficientes para isso.

Sem medo de errar

Para finalizar o projeto da estrada que você está elaborando, falta desenvolver o projeto de terraplenagem e definir os equipamentos necessários para executar a obra. Para definir quais os equipamentos, você terá de calcular os volumes de materiais que serão movimentados e montar um diagrama de massas.

Agora você já tem conhecimento para determinar esses volumes de materiais que serão transportados nos serviços de cortes e aterros, assim como de bota-fora e empréstimos. Para isso, você teve de traçar as seções transversais de cada estaca de sua estrada e já determinou as áreas correspondentes, conforme foi apresentado na Tabela 4.12.

Para determinar os volumes de corte, aterro, aterro corrigido, compensação lateral, transporte longitudinal, assim como o volume acumulado em cada estaca e o volume para elaborar o diagrama de massas, você elaborou a planilha apresentada na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 | Planilha com cálculo de volumes

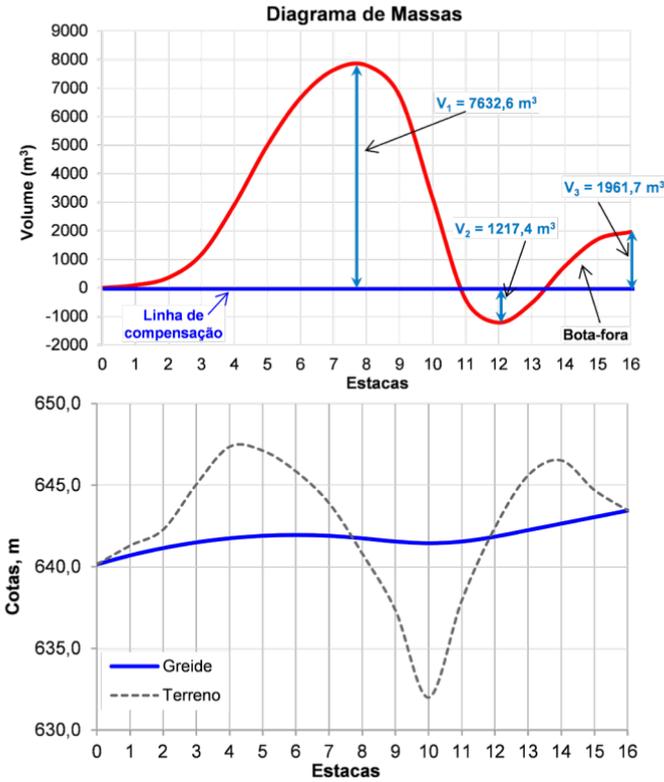
Estaca	Área da Seção (m ²)		Volume (m ³)				Volume Acumulado (m ³)		Diagrama de Massas
	Corte	Aterro	Corte	Aterro	Aterro corrigido	Compens. lateral	Corte	Aterro	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	9,48	0	94,8	0	0	0	94,8	0	94,8
2	16,73	0	262,1	0	0	0	356,9	0	356,9
3	64,52	0	812,5	0	0	0	1169,4	0	1169,4
4	109,76	0	1742,2	0	0	0	2912,2	0	2912,2
5	98,37	0	2081,3	0	0	0	4993,5	0	4993,5
6	67,42	0	1657,9	0	0	0	6651,4	0	6651,4
7	30,70	0	981,2	0	0	0	7632,6	0	7632,6
8	7,90	18,53	386,0	185,3	222,4	222,4	8018,6	222,4	7796,2
9	0	76,83	79,0	953,5	1144,3	79,0	8097,6	1366,7	6730,9
10	0	221,60	0	2984,3	3581,2	0	8097,6	4947,5	3149,7
11	0	75,02	0	2966,2	3559,4	0	8097,6	8507,3	-409,7
12	11,39	1,78	113,9	768,0	921,6	113,9	8211,5	9428,9	-1217,4
13	59,14	0	705,3	17,8	21,4	21,4	8916,8	9450,3	-533,5
14	69,37	0	1285,1	0	0	0	10201,9	9450,3	751,6
15	25,82	0	951,9	0	0	0	11153,8	9450,3	1703,2
16	0	0	258,2	0	0	0	11412,0	9450,3	1961,7

Largura da plataforma: 14,00 m, taludes 1:1 e coeficiente de redução = 1,20.

Fonte: elaborada pela autora.

Além dos cálculos, você elaborou o gráfico do diagrama de massas, mostrando os volumes compensados e de bota-fora, assim como o perfil do terreno e o greide da estrada, conforme apresentado na Figura 4.26. Para isso, você traçou a linha de compensação de corte e aterro, iniciando na estaca 0 até a estaca 16. Você pode verificar que o volume de material compensado na onda 1 é $V_1 = 7632,6 \text{ m}^3$ e na onda 2 é $V_2 = 1217,4 \text{ m}^3$ e que o volume de material que será um bota-fora é $V_3 = 1961,7 \text{ m}^3$.

Figura 4.26 | Diagrama de massas, perfil do terreno e greide da estrada



Fonte: elaborada pela autora.

Você já aprendeu como calcular os volumes de materiais de corte e aterro, assim como elaborar um diagrama de massas pelo método de Bruckner, e também já sabe selecionar os equipamentos necessários para realizar os serviços de terraplenagem. Além disso, você já tem noção dos parâmetros que deve considerar no projeto de uma interseção rodoviária e como o software Civil 3D pode auxiliar no desenvolvimento de projetos de rodovias.

Dessa forma, cumpriu mais uma fase do seu processo de aprendizagem.

Que tal agora resolvermos um problema sobre terraplenagem?

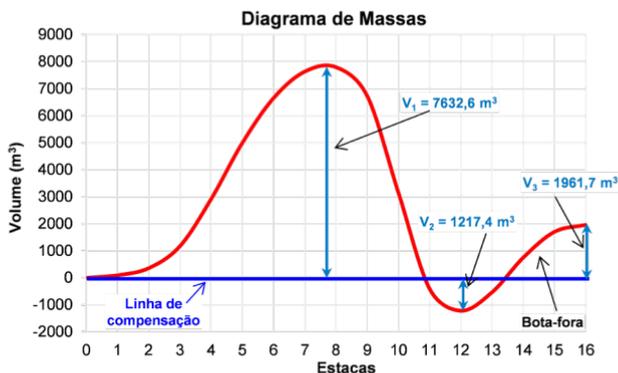
Vamos lá, você já tem condições para isso.

Determinação dos momentos de transportes e seleção dos equipamentos

Descrição da situação-problema

O projeto de terraplenagem deve conter, além da planilha de volumes de corte e aterro, o diagrama de massas mostrando onde serão realizadas as compensações laterais, os empréstimos e os bota-foras e as suas respectivas distâncias de transporte. Além disso, é importante apresentar os momentos de transportes e quais os equipamentos necessários para executar esses serviços. Considerando o diagrama de massas apresentado na Figura 4.27, responda às seguintes questões: o que deve ser considerado para determinar os momentos de transportes? Quais equipamentos devem ser utilizados para executar esses serviços?

Figura 4.27 | Diagrama de massas

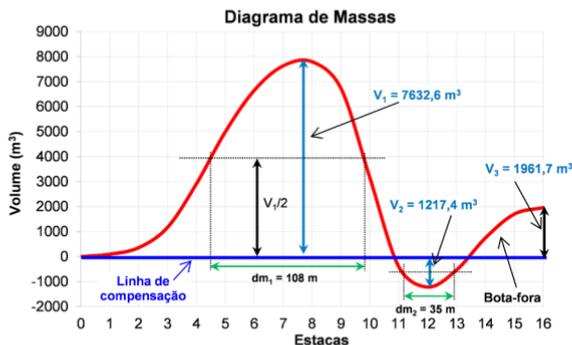


Fonte: elaborada pela autora.

Resolução da situação-problema

Com os dados calculados na planilha apresentada na Tabela 4.14, você elaborou o diagrama de massas, conforme mostrado na Figura 4.27. No entanto, para calcular os momentos de transportes (MT), você deve determinar as distâncias médias de transportes (dm). A distância média de transporte é determinada traçando uma reta perpendicular à altura correspondente à metade do volume ($V/2$) de cada onda, conforme apresentado na Figura 4.28.

Figura 4.28 | Diagrama de massas



Fonte: elaborada pela autora.

Dessa forma, as distâncias médias obtidas no diagrama de massas são: $dm_1 = 108,0 \text{ m}$ e $dm_2 = 35,0 \text{ m}$. A distância do bota-fora é $d_{bf} = 300,0 \text{ m}$.

Considerando os volumes compensados ($V_1 = 7632,6 \text{ m}^3$, $V_2 = 1217,4 \text{ m}^3$ e $V_3 = 1961,7 \text{ m}^3$), podemos calcular o momento de transporte, MT, de cada onda e do bota-fora:

$$MT_1 = V_1 \times dm_1 = 7632,6 \times 0,108 = 824,32 \text{ m}^3 \times \text{km}$$

$$MT_2 = V_2 \times dm_2 = 1217,4 \times 0,035 = 42,61 \text{ m}^3 \times \text{km}$$

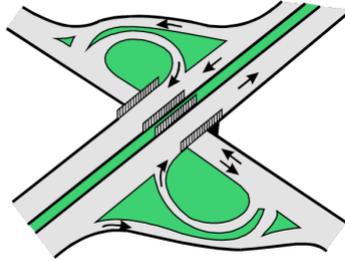
$$MT_3 = V_3 \times d_{bf} = 1961,7 \times 0,300 = 588,51 \text{ m}^3 \times \text{km}$$

A partir do diagrama de massas, é possível verificar que as distâncias médias de transportes são curtas e com isso podemos selecionar equipamentos mais simples para execução dos serviços de terraplenagem:

- trator de esteiras (1) – caso seja necessário empurrar outras máquinas;
- trator de lâmina do tipo bulldozer (1) – para serviços de desmatamento, destocamento e limpeza de terreno; construção de caminhos de serviço; execução de compensações laterais; escavação e transporte de pequenos volumes a distâncias inferiores a 50 metros; espalhamento, no aterro, do material depositado por unidades transportadoras;
- motoniveladora (1) – para espalhamento dos materiais;
- caminhões basculantes (3) – para transporte de materiais;
- rolo pé-de-carneiro (1) e rolo vibratório (1) – para compactar o material do aterro;
- caminhão irrigador (1) – para correção de umidade.

1. As interseções rodoviárias são áreas onde ocorrem o cruzamento ou entroncamento de duas ou mais vias. Podem ser em nível ou desnível e são classificadas em três subgrupos: cruzamentos, entroncamentos ou rotatórias. Qual é o tipo de interseção rodoviária da Figura 4.29?

Figura 4.29 | Interseção rodoviária



Fonte: adaptada de Pimenta e Oliveira (1996).

Selecione a alternativa com a resposta correta:

- a) Rotatória em nível.
- b) Cruzamento em desnível.
- c) Entroncamento em desnível.
- d) Rotatória em desnível.
- e) Cruzamento em nível.

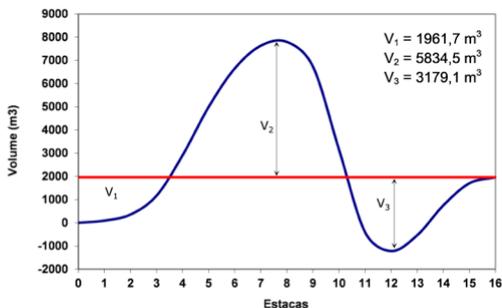
2. O projeto de terraplenagem deve ser elaborado de forma que apresente o menor custo de movimento de terra possível, pois esse custo pode ser significativo em relação ao custo total da estrada. Para obter o menor custo, sempre que possível, recomenda-se que se deve evitar empréstimos e/ou bota-foras. O que deve ser feito para evitar esses tipos de serviços?

Selecione a alternativa com a resposta correta:

- a) Deve ser feito o equilíbrio entre volumes de cortes e aterros.
- b) O volume de cortes deve ser superior ao volume de aterros.
- c) O volume de aterros deve ser superior ao volume de cortes.
- d) O volume de cortes deve ser igual a zero e o volume de aterros deve ser o máximo possível.
- e) O volume de aterros deve ser igual a zero e o volume de cortes deve ser o máximo possível.

3. O custo total da construção da rodovia é influenciado diretamente pelo movimento de terra, em cortes e aterros, realizado na execução da terraplenagem. Considerando os dados apresentados na Figura 4.30, determine os volumes de bota-fora ou empréstimo e o volume total de compensação entre cortes e aterros.

Figura 4.30 | Diagrama de massas



Fonte: elaborada pela autora.

Selecione a alternativa com a resposta que apresenta os valores corretos:

- a) $V_{bf} = 5140,8 \text{ m}^3$; $V_{compensado} = 5834,5 \text{ m}^3$
- b) $V_{bf} = 1961,7 \text{ m}^3$; $V_{compensado} = 9013,6 \text{ m}^3$
- c) $V_{bf} = 5834,5 \text{ m}^3$; $V_{compensado} = 5140,8 \text{ m}^3$
- d) $V_{emp} = 3179,1 \text{ m}^3$; $V_{compensado} = 5834,5 \text{ m}^3$
- e) $V_{emp} = 1961,7 \text{ m}^3$; $V_{compensado} = 9013,6 \text{ m}^3$

Referências

ADADA, L. B. **Tópicos de projeto geométrico rodoviário**. Programa de integração e capacitação DER/2008. Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná.

AUTODESK. Civil 3D. Disponível em: <https://goo.gl/dkwTFp>. Acesso em: 8 jan. 2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. Publicação IPR 706, 1. ed., 195 p., 1999. Disponível em: <https://goo.gl/72JXGA>. Acesso em: 4 jan. 2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Terraplenagem - Serviços Preliminares. Especificação de Serviços. DNIT ES 104/2009a. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Disponível em: <https://goo.gl/XNyUhz>. Acesso em: 8 jan. 2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Terraplenagem - Caminhos de serviços. Especificação de Serviços. DNIT ES 105/2009b. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit105_2009_es.pdf. Acesso em: 8 jan. 2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Terraplenagem - Cortes. Especificação de Serviços. DNIT ES 106/2009c. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Disponível em: <https://goo.gl/iuL6j4>. Acesso em: 4 jan. 2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Terraplenagem - Aterros. Especificação de Serviços. DNIT ES 108/2009d. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Disponível em: <https://goo.gl/LrFk6w>. Acesso em: 8 jan. 2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Manual de implantação básica de rodovia. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR. Publicação IPR 742, 3. ed., 325p., 2010. Disponível em: <https://goo.gl/4pcEe7>. Acesso em: 5 jan. 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES - CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018** - Relatório gerencial. Disponível em: <https://goo.gl/6aDNnB>. Acesso em: 8 jan. 2019.

FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Alinhamento horizontal e vertical**. EESC/USP, São Carlos, 1999b. Notas de Aulas.

FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Perfil longitudinal**. EESC/USP, São Carlos, 1999a. Notas de Aulas.

FERNANDES JÚNIOR, J. L. **Projeto geométrico de vias**. EESC/USP. São Carlos, 1999. Notas de Aulas.

ODA, S. **Projeto geométrico de vias**. Disciplina DEC 712 - Estradas. Universidade Estadual de Maringá - UEM, 2002. Notas de Aulas. Disponível em: <https://goo.gl/2YCshi>, Acesso em: 11 fev. 2019.

PEREIRA, D. M. *et al.* **Projeto geométrico de rodovias**. Disciplina TT-048 - Infraestrutura Viária. Departamento de Transportes. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Apostila.

PEREIRA, D. M. *et al.* **Introdução à terraplenagem**. Disciplina TT-401 - Infraestrutura Viária. Departamento de Transportes. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Apostila.

PIMENTA, C. R. T.; OLIVEIRA, M. P. **Introdução ao projeto geométrico de interseções rodoviárias**. EESC/USP, 1996. Notas de Aulas.

PIMENTA, C. R. T.; OLIVEIRA, M. P. **Projeto geométrico de rodovias**. São Carlos: Editora Rima, 2004.

SÃO PAULO. Departamento de Estradas de Rodagem - DER/SP. Projeto de Terraplenagem. IP-DE-Q00/001. Junho/2005. Disponível em: ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/IP-DE-Q00-001_A.pdf. Acesso em: 5 jan. 2019.

SILVA JUNIOR, S. B.; FERREIRA, M. A. G. Rodovias em áreas urbanizadas e seus impactos na percepção dos pedestres. **Revista Sociedade e Natureza**, Uberlândia, n. 1, p. 221-237, jun. 2008. Disponível em: <https://goo.gl/poK2eg>. Acesso em: 12 fev. 2019.

ISBN 978-85-522-1386-4



9 788552 213864 >