

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Vias de Transportes e Topografia - STT

PROJETO DE ESTRADAS 1

Escolha do Traçado
Elementos Básicos para Projeto Geométrico
Notas de Aula

Prof. Carlos Reynaldo Toledo Pimenta

ÍNDICE

1. ESCOLHA DO TRAÇADO DE UMA ESTRADA

1.1. Considerações Gerais

1.1.1. Principais fatores que influem na escolha do traçado

1.2. Representação gráfica do projeto-método clássico

1.2.1. Planta

1.2.2. Perfil longitudinal

1.2.3. Seções transversais

1.2.4. Representações complementares

1.3. Localização do traçado

1.3.1. Reconhecimento

1.3.2. Exploração

1.3.3. Projeto final

1.3.4. Recursos técnicos disponíveis

2. ELEMENTOS BÁSICOS PARA PROJETO GEOMÉTRICO

2.1. Introdução

2.2. Velocidades

2.2.1. Velocidades de projeto

2.2.2. Velocidade de operação

2.3. Distância de visibilidade

2.3.1. Distância de frenagem

2.3.2. Distância de visibilidade para ultrapassagem

2.3.3. Distância de segurança entre veículos

1. ESCOLHA DO TRAÇADO DE UMA ESTRADA

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O problema da escolha do traçado de uma estrada nasce, em linhas gerais, da necessidade ou conveniência da ligação entre dois locais.

Raramente a linha reta que une esses locais (caminho mais curto) poderá ser tomada como eixo da ligação, em virtude de uma série de condicionamentos, existentes na área intermediária entre os locais a serem ligados.

Esses condicionamentos interferem e assumem importância porque, dentro da conceituação da engenharia, não basta que se pense na ligação pura e simples, é necessário também que essa ligação seja feita de forma a melhor atender aos interesses da comunidade, da forma mais econômica possível. É preciso portanto, que haja um balanço entre o custo total da obra a ser executada, incluindo custos de projeto, construção, desapropriação e manutenção (pelo menos em parte) e os benefícios, diretos e indiretos advindos da execução da obra.

A definição da oportunidade de construir uma determinada estrada, em uma determinada época, deve começar por um planejamento de transportes em geral, que analisando necessidades e características regionais defina os meios de transporte a serem utilizados e distribua convenientemente essas necessidades entre os meios mais adequados à atende-las.

Assim o planejamento geral de transportes gera um planejamento viário que definirá a oportunidade da construção de uma determinada estrada.

A arte de projetar estradas é o resultado do balanceamento entre necessidades de tráfego e a experiência adquirida na construção de outras estradas. Na prática o problema resume-se na definição de um projeto harmônico com a topografia da região, respeitando as características técnicas de um bom traçado, bom perfil e com um mínimo custo.

Para a definição das características básicas (capacidade de tráfego, número de pistas e faixas de tráfego, velocidade de projeto etc) o projetista deverá primeiramente conhecer as caracterís-

ticas e volumes de tráfego previsto para a estrada a ser construída, além disso deverá também levar em consideração possíveis variações de volume ou mesmo de características que o tráfego possa sofrer durante a vida útil da estrada.

Grande número de veículos mudam suas características básicas ao longo do tempo, alterando seu comportamento nas estradas. Interesses nacionais podem interferir no projeto dos veículos ou no uso dos diversos meios de transporte, alterando os volumes e a composição do tráfego de uma estrada ao longo dos anos.

Assim, especial cuidado deve ser dado à projeção de necessidades futuras do tráfego.

1.1.1. PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUEM NA ESCOLHA DO TRAÇADO

Na eleição do local por onde passará a estrada todos os fatores que possam influir no custo da estrada deverão ser analisados e balanceados, para permitir a escolha de um local onde se possa construir uma boa estrada com um custo mínimo.

A topografia da região é o fator predominante, a escolha de traçados sobre regiões topograficamente desfavoráveis acarretam grandes movimentos de terra e conseqüentemente altos custos para a execução da infraestrutura da estrada.

Condições geológicas e geotécnicas dos locais por onde a estrada vai passar também são importantes, as obras adicionais necessárias à estabilização de cortes e aterros executados em terrenos desfavoráveis podem, em alguns casos, representar custos adicionais significativos.

A hidrologia da região é um terceiro fator importante, a escolha de um traçado ruim pode exigir um custo elevado em obras de arte e obras de drenagem desnecessárias em um traçado mais adequado.

A existência de benfeitorias no local escolhido aumenta os custos de desapropriação da faixa para construção da estrada, assim, sempre que possível, deverão ser escolhidos traçados que atravessem terrenos de baixo valor.

Por outro lado, determinados traçados podem aumentar os benefícios conseqüentes da construção da estrada, por isso, a escolha de um traçado é sempre o resultado de uma análise de benefícios e custos.

1.2. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PROJETO-MÉTODO CLÁSSICO

A representação gráfica de cada trecho da estrada é feita por um conjunto de desenhos:

- planta
- perfil longitudinal
- seções transversais

A planta é a representação, em escala conveniente, da projeção da estrada sobre um plano horizontal. (figura 1).

O perfil longitudinal é a representação, em escala conveniente, da projeção da estrada sobre uma superfície cilíndrica vertical que contém o eixo da estrada em planta. (figura 1).

Seções transversais são representações, em escala conveniente, de projeções da estrada sobre planos verticais, perpendiculares ao eixo da estrada, localizados em pontos escolhidos. (figura 1).

Assim, um determinado trecho de estrada é representado - por uma planta, um perfil longitudinal e várias seções transversais, tantas quantas forem necessárias para a perfeita definição do projeto. O projeto geométrico total da estrada representado pelo conjunto de desenhos de seus diversos trechos.

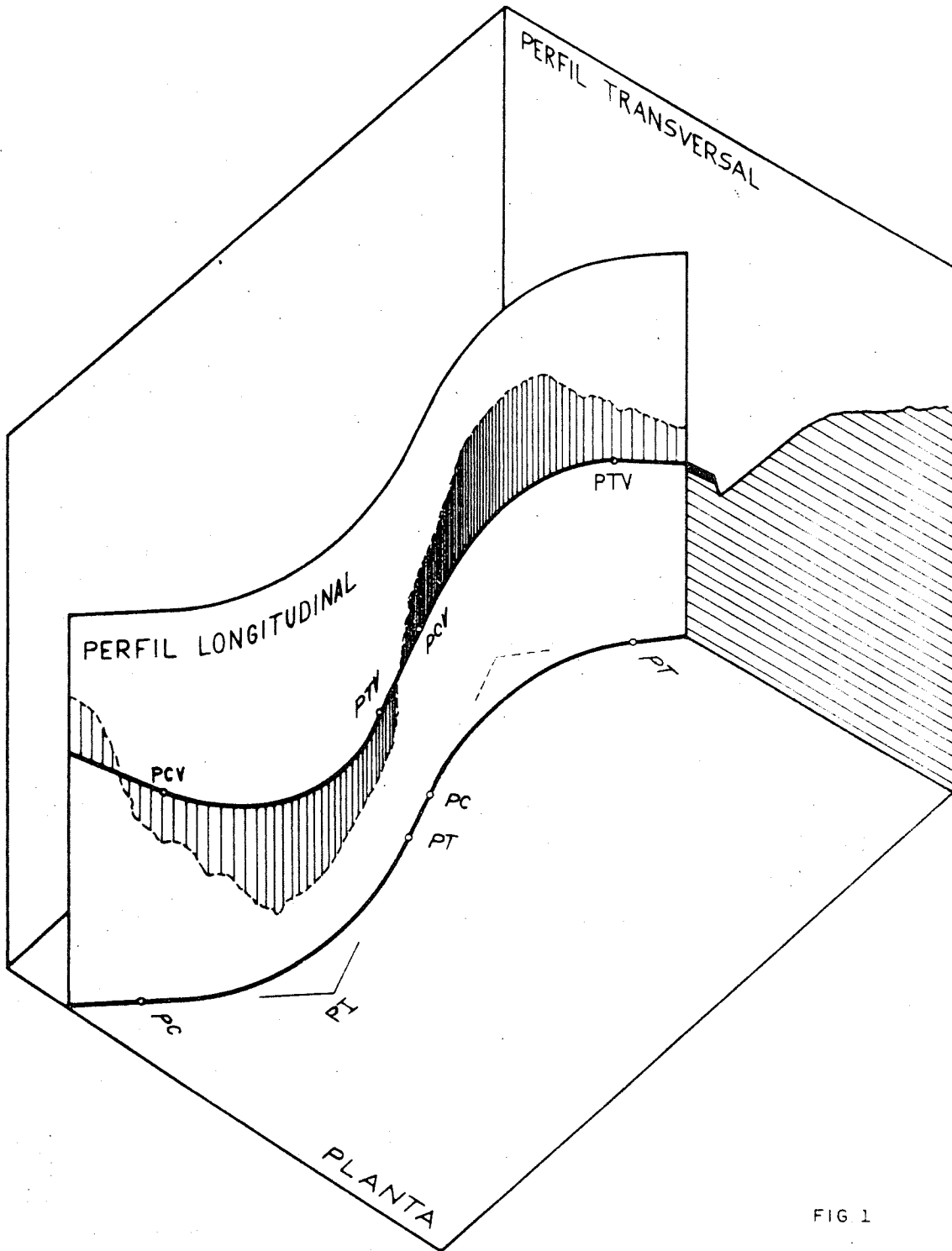
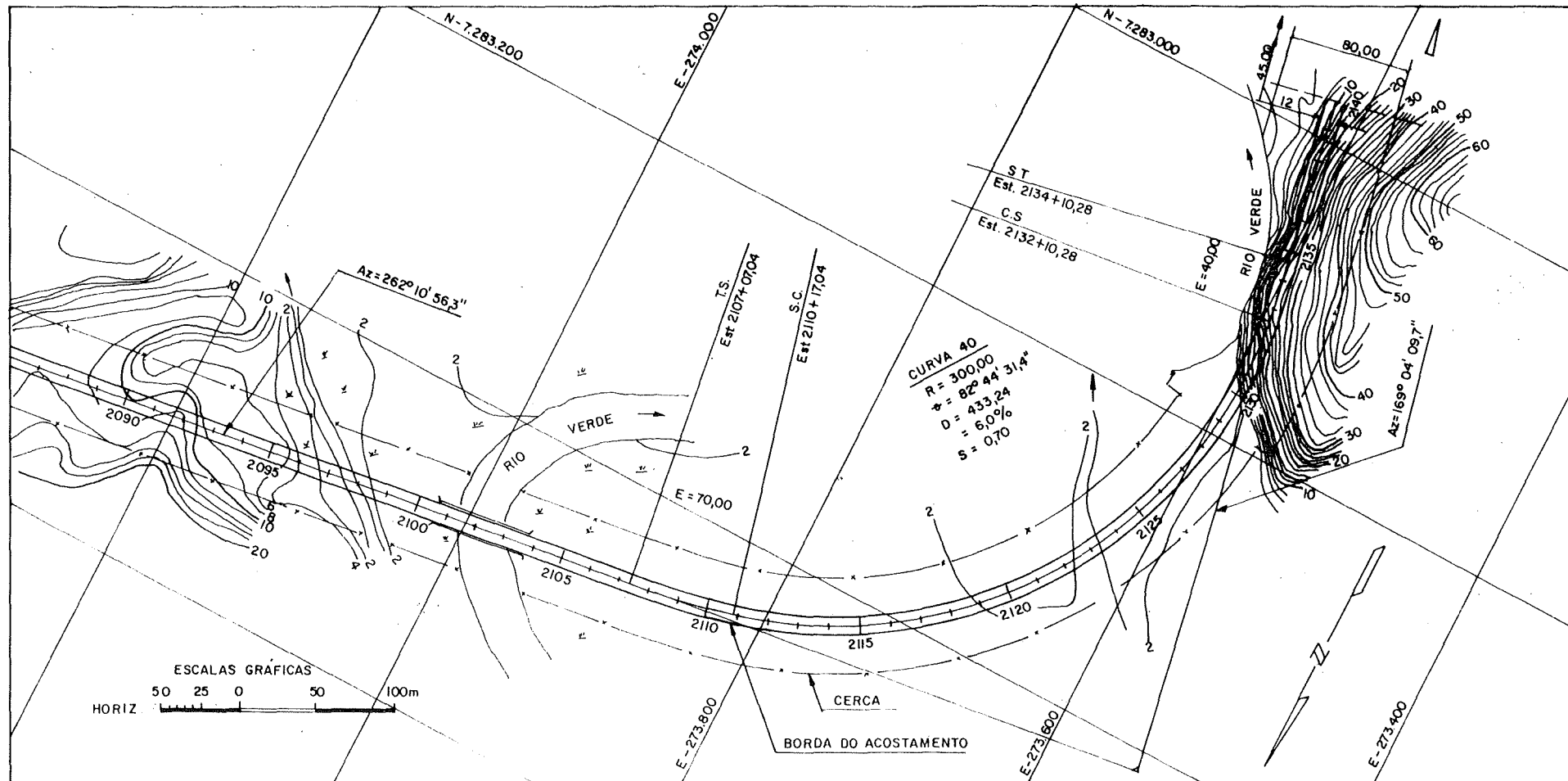


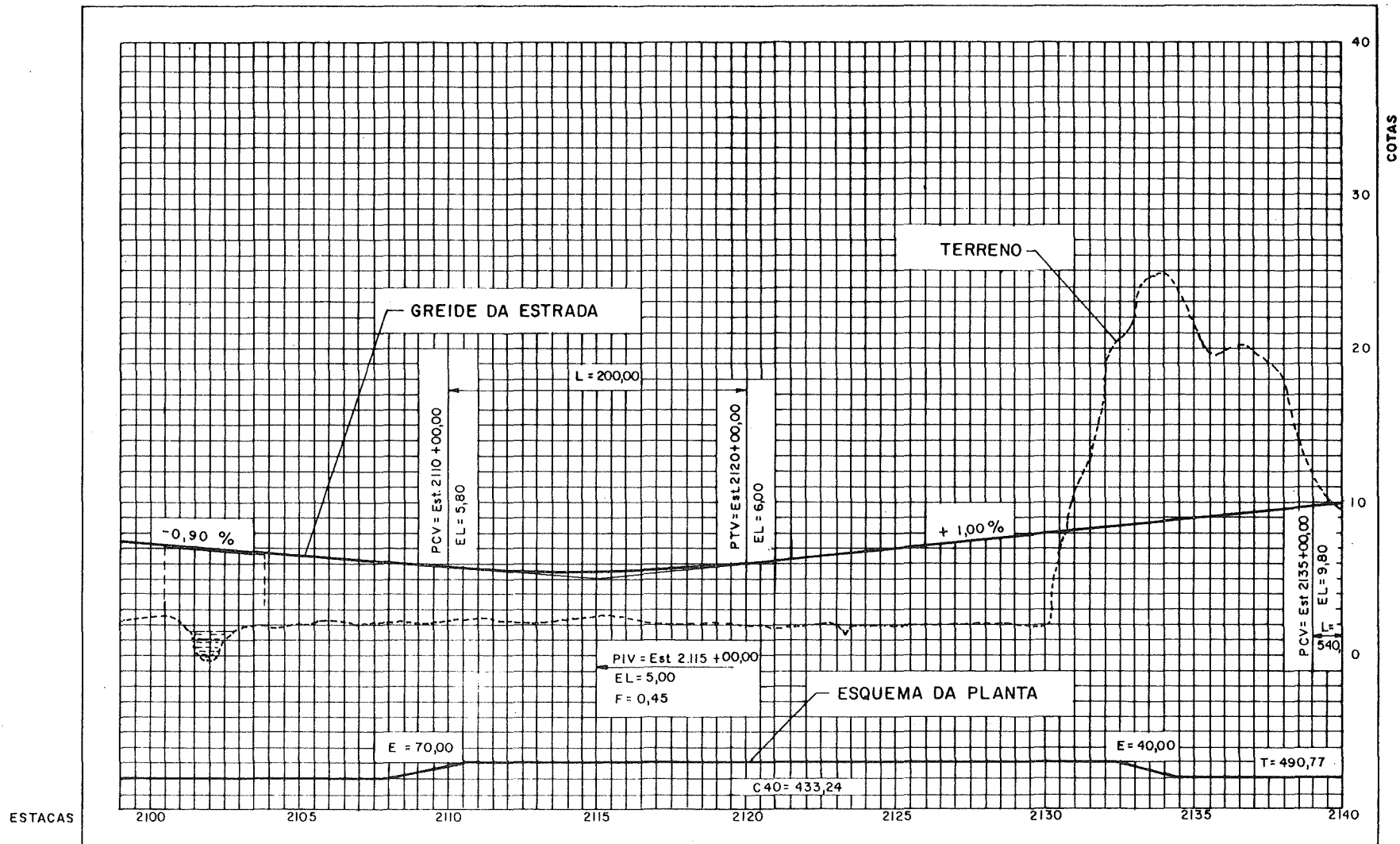
FIG 1

As figuras 2,3 e 4 são exemplos de planta, perfil longitudinal e seção transversal respectivamente.



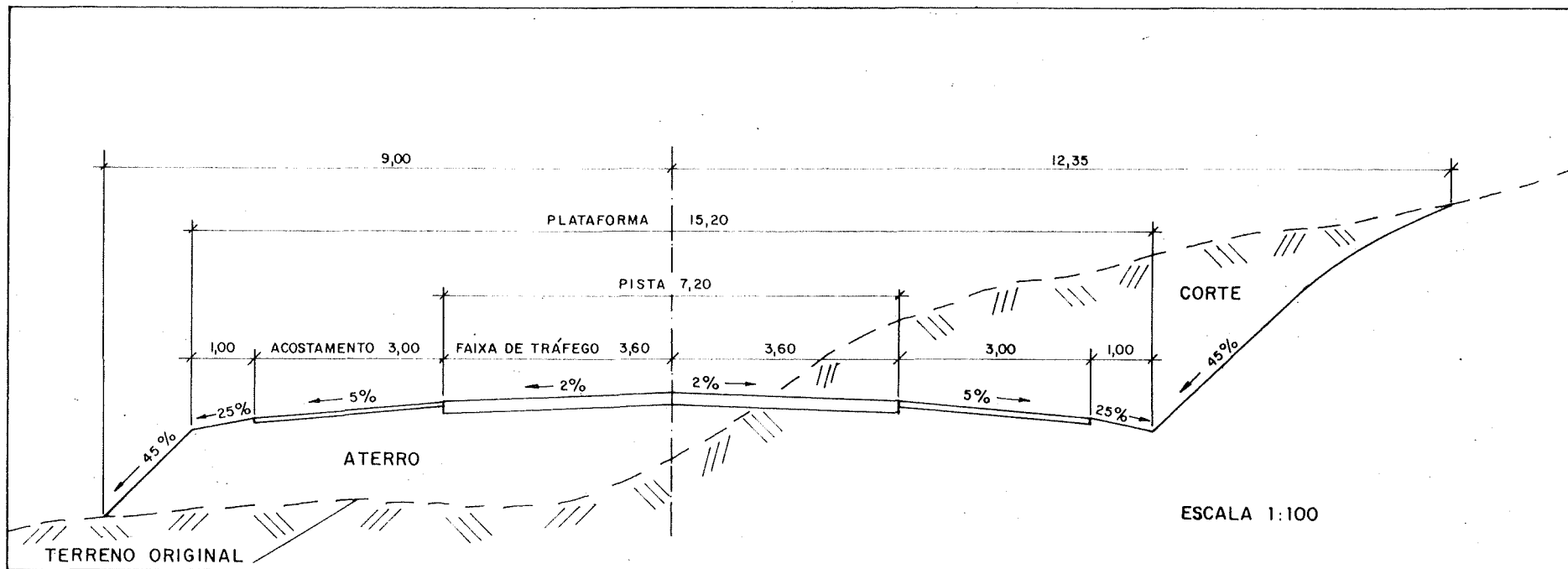
PLANTA

FIGURA 2



PERFIL LONGITUDINAL

FIGURA 3



SEÇÃO TRANSVERSAL
 ESTACA 125

FIGURA 4

1.2.1. PLANTA

A planta como vimos, é a projeção da estrada sobre um plano horizontal, cada desenho representa um trecho da estrada de extensão compatível com o tamanho da folha de desenho e a escala desejada.

Normalmente são usadas as escalas 1:100000 e 1:5000 para a planta de ante-projetos, 1:2000 nos projetos executivos, 1:1000 no projeto de interseções, cruzamentos ou outros locais onde seja necessário um maior nível de detalhamento.

A planta (ver exemplo figura 2) consiste no desenho de:

- Eixo da estrada estaqueado com suas características geométricas e elementos necessários à perfeita localização do traçado escolhido.
- Linhas indicativas dos bordos da plataforma da estrada e da faixa de domínio.
- Representação da topografia do local através de curvas de nível e indicações de acidentes topográficos importantes.
- Representação da hidrologia através da localização de rios, córregos, lagos, etc.
- Indicação e localização de elementos diversos que possam de alguma forma influir no custo da estrada, como: tipo de vegetação, áreas cultivadas, acidentes geológicos ou geotécnicos notáveis, obras de arte previstas etc.
- Indicação e localização de benfeitorias, divisas de propriedade e outros elementos que possam auxiliar na determinação dos custos de desapropriação da faixa.

1.2.2. PERFIL LONGITUDINAL

Como vimos, o perfil longitudinal é a projeção da estrada sobre uma superfície cilíndrica vertical passando pelo eixo em planta.

Para uma melhor visualização do projeto o perfil é um desenho deformado onde a escala vertical é maior que a escala horizontal adotada.

É aconselhável o uso de uma escala horizontal igual a escala adotada para a planta do trecho e uma escala vertical dez

vezes maior que a escala horizontal adotada, assim, os acidentes verticais são destacados resultado uma melhor visão do projeto.

O perfil longitudinal (ver exemplo figura 3) consiste no desenho de:

- Perfil do terreno original sobre o eixo da estrada;
- Perfil da estrada (greide) com suas características geométricas e localização em relação à planta;
- Perfil geológico e características dos materiais que possam influir no estudo da estabilidade da estrada e no projeto de cortes e aterros;
- Indicação do estaqueamento e desenho esquemático da planta, para localização dos acidentes do perfil em relação aos da planta;
- Indicação das obras de arte previstas para o trecho.
- Cotas de obras existentes que interferem com o projeto.

1.2.3. SEÇÕES TRANSVERSAIS

São projeções da estrada sobre planos verticais perpendiculares ao eixo.

Devem ser desenhadas várias seções tipo, em pontos escolhidos, que permitam a perfeita definição de todas as características transversais do projeto.

As seções transversais (exemplo: ver figura 4) devem conter:

- Dimensões e inclinações transversais das faixas de tráfego, pistas, acostamentos, separadores centrais e demais elementos que compõe a plataforma da estrada;
- Taludes de cortes e ou aterros;
- Áreas de cortes e ou aterros;
- Indicação de eventuais obras de arte, obras de proteção de taludes e dispositivos de segurança;
- Indicação e localização de dispositivos de drenagem;

- Outras informações necessárias à definição do projeto.
- posição de início de taludes e faixa de domínio.

1.2.4. REPRESENTAÇÕES COMPLEMENTARES

A representação do projeto geométrico através do conjunto de desenhos: planta, perfil e seções é normalmente suficiente para a definição da estrada a ser executada, entretanto, esse tipo de representação não permite ao projetista uma boa visualização do seu projeto.

Em uma estrada, elementos da planta misturam-se com elementos do perfil e das seções gerando curvas tridimensionais - que deverão ter qualidades mínimas quanto ao conforto e segurança e serem agradáveis a quem as percorre.

Uma boa planta e um bom perfil são necessários mas não suficientes, pois o importante é que a estrada gerada por eles seja boa.

Na maioria dos projetos, projetistas experientados, olhando plantas e perfis de trechos, conseguem com razoável sucesso visualizar o comportamento tridimensional da estrada, entretanto em casos especiais como: interseções e cruzamentos onde várias estradas interligam-se através de ramos complexos, ou em locais de topografia acidentada quando curvas horizontais e verticais misturam-se em sucessão complexa de curvas tridimensionais, a falta de uma visão global pode criar projetos deficientes.

Assim em locais especiais é aconselhável o uso de representações complementares que criem uma visão global da estrada. Qualquer processo que mostre a estrada em três dimensões é trabalhoso e caro, só sendo justificável em casos muito especiais.

Mostramos a seguir, exemplos de soluções adotadas em alguns casos especiais.

As figuras 5 e 6 mostram modelos reduzidos de um complexo cruzamento. O uso desses modelos é particularmente útil para a análise de situações onde vários ramos de estradas interligadas, entrelaçam-se em vários níveis tornando difícil a visualização do conjunto através dos perfis individuais de cada um dos ramos do cruzamento.

A figura 7 mostra a perspectiva de um trecho de estrada projetada, onde o ponto de observação é colocado na posição de vista do motorista.

A perspectiva desenhada por um ploter é o resultado de um programa que recebe os elementos do projeto (dados topográficos da região, elementos geométricos da planta e do perfil, medidas transversais da estrada e inclinação dos taludes) e produz perspectivas em pontos escolhidos.

O processo desenvolvido pelo SETRA (Service d'Etude Technique de Routes et Autoroutes) da França, permite que sejam desenhadas perspectivas sucessivas de estrada gerando uma sequência de desenhos que filmados um a um, como em um desenho animado, geram um filme que simula uma viagem pela futura autoestrada.

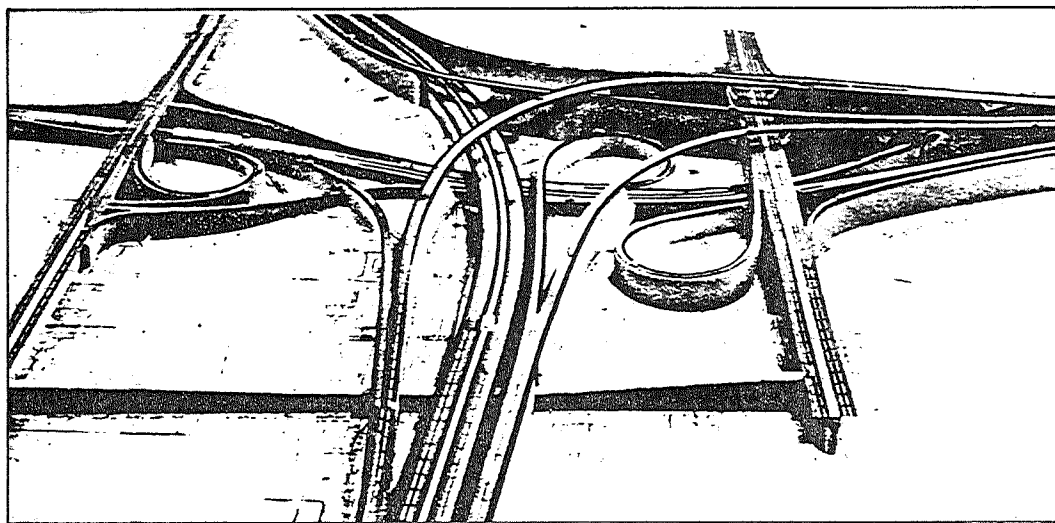


FIGURA 5

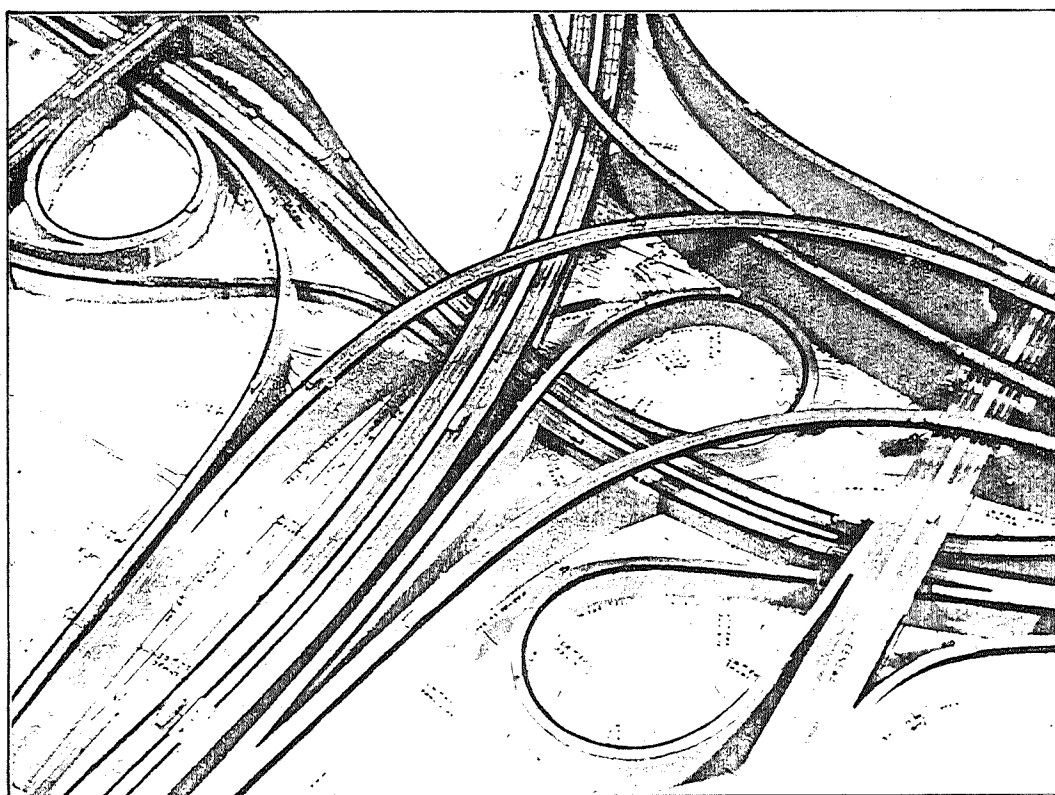


FIGURA 6

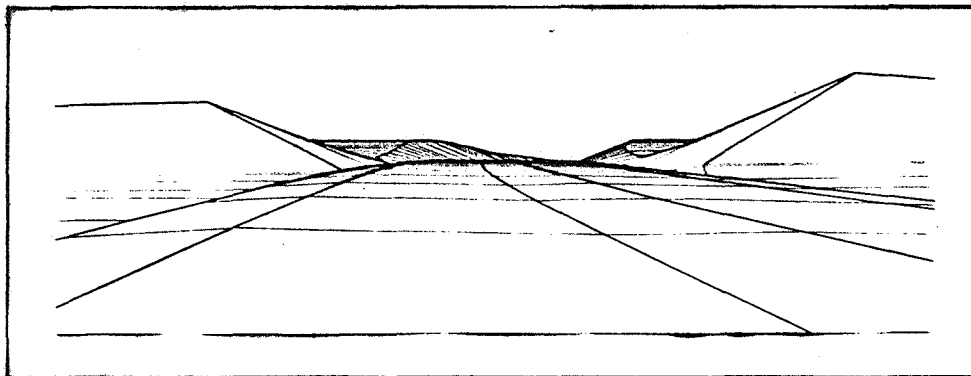


FIGURA 7

1.3. LOCALIZAÇÃO DO TRAÇADO

O método clássico para escolha do traçado de uma estrada consiste das seguintes fases: Reconhecimento

Exploração

Projeto

Os serviços a serem executados em cada uma dessas fases va
riam de projeto para projeto e dependem dos dados e recursos dispo
níveis.

1.3.1. RECONHECIMENTO

É a fase inicial da escolha do traçado, tem por objetivo o levantamento e a análise de dados da região necessários à definição dos possíveis locais por onde a estrada possa passar.

Engloba todos os estudos preliminares como reconhecimento geográfico e topográfico, reconhecimento geológico, econômico e social da região.

Nessa fase são definidos os principais obstáculos - topográficos, hidrológicos, geológicos ou geotécnicos e escolhidos possíveis locais para o lançamento de ante-projetos.

Algumas regiões do Brasil como o estado de São Paulo estão cobertos por levantamentos aerofotogramétricos de precisão

existindo restituições aerofotogramétricas em escala 1:10000 que fornecem os dados topográficos, econômicos e sociais da região necessários ao lançamento dos anti-projetos.

Nessas regiões, já cobertas por levantamentos de precisão, as informações geológicas, geotécnicas e hidrológicas - preliminares podem também ser obtidas através de técnicas modernas de interpretação das fotografias aéreas disponíveis.

Em regiões onde não existem plantas topográficas de precisão ou fotografias aéreas disponíveis, há necessidade da execução de um levantamento aerofotogramétrico que permita a obtenção - de restituições topográficas escala 1:10000 ou 1:5000 acompanhado das respectivas fotografias aéreas geralmente escala 1:25000.

O reconhecimento da região pode ainda ser feito com o uso de linhas de ensaio levantadas por métodos topográficos de baixa precisão em locais escolhidos, "in loco", para a passagem da estrada. Essa linha é usada para a obtenção do primeiro mapeamento da faixa de terreno por onde deverá passar a estradas. Os mapas assim obtidos, embora sejam de baixa precisão, servirão para o lançamento do ante-projeto da estrada.

A fase de reconhecimento engloba também o levantamento de todas as demais informações que possam ter interesse no estudo da estrada.

É importante o conhecimento de aspectos sociais e econômicos da região, suas produções agrícolas e industriais e especialmente suas necessidades de transporte. Sempre que possível o traçado deverá ser localizado de forma a melhor atender às necessidades de transporte da região.

É necessário o levantamento de informações sobre a existência de projetos de concessionárias de serviços públicos ou mesmo particulares que possam no futuro interferir com a estrada, muitas vezes pequenas alterações em um projeto podem evitar interferências futuras com outros projetos.

1.3.2. EXPLORAÇÃO

É a fase que engloba o estudo detalhado de uma ou mais faixas de terreno escolhidas para a passagem da estrada. Essas faixas definidas na fase de reconhecimento são levantadas por processos aerofotogramétricos ou topográficos de maior precisão de forma a obter-se restituições aerofotogramétricas escala 1:2000 ou 1:1000 e fotografias escala 1:8000.

O resultado dos trabalhos de interpretação das fotografias aéreas fornece informações gerais sobre as condições hidrológicas, geológicas e geotécnicas das faixas escolhidas.

Com esse conjunto de informações é iniciado o lançamento dos ante-projetos da estrada sobre as plantas topográficas - das faixas escolhidas.

O lançamento do ante-projeto segue normalmente a seguinte sequência:

- escolha dos pontos de interseção das tangentes (PI) em planta;
- definição das coordenadas dos PI;
- marcação das tangentes entre os diversos PI, cálculo do comprimento das tangentes;
- escolha dos raios mais convenientes para as curvas circulares, de forma a acomodar a estrada à topografia da faixa, evitando os obstáculos conhecidos;
- cálculo das coordenadas dos pontos de curva (PC) e pontos de tangência (PT);
- cálculo do estaqueamento do traçado, estacas de 20 m, ou 50 m;
- levantamento do perfil do terreno sobre o traçado escolhido;
- escolha dos pontos de interseção das rampas (PIV) em perfil;
- determinação de cotas e estacadas dos PIV escolhidos;
- cálculo das rampas resultantes: inclinação e extensão;
- escolha das curvas verticais, cálculo de cotas e estacas dos (PCV) e (PTV);

O detalhamento do projeto geométrico normalmente só é feito na fase seguinte.

Paralelamente a execução do ante-projeto geométrico são também iniciados estudos da infraestrutura e superestrutura da estrada objetivando principalmente o levantamento de problemas que poderão mostrar a conveniência de alteração do ante-projeto geométrico escolhido.

É normalmente executado um ante-projeto sobre cada uma das faixas de terreno selecionadas para o estudo da estrada.

A definição dos ante-projetos e as informações obtidas da interpretação de fotografias aéreas fornecem os dados necessários para o planejamento dos levantamentos geológicos e geotécnicos de campo, sondagens e ensaios, que também serão executados nessa fase.

Com os dados obtidos nessa fase é possível uma primeira avaliação de custos e benefícios de cada uma das soluções propostas e assim escolher entre os diversos ante-projetos o mais adequado.

1.3.3. PROJETO FINAL

É a fase de detalhamento e eventual alteração do ante-projeto escolhido.

Com base nas informações obtidas, na fase de exploração, e análise das soluções possíveis para os diversos problemas encontrados, o ante-projeto escolhido sofrerá as alterações que forem necessárias até atingir uma forma final.

Nesse ponto é feito o detalhamento do ante-projeto através da escolha e o cálculo de todos os elementos necessários a perfeita definição do projeto em planta, perfil longitudinal e seções transversais. O conjunto desses desenhos finais, acompanhada das tabelas necessárias à locação do projeto no campo formam o projeto geométrico final.

Paralelamente à execução do projeto geométrico são executados projeto da infraestrutura, superestrutura da estrada, obras de arte, paisagismo, sinalização e serviços.

O projeto final da estrada é o conjunto de todos esses projetos complementado por memórias de cálculo, justificativa de soluções e processos adotados, quantificação de serviços, especificações de materiais, métodos de execução e orçamento.

1.3.4. RECURSOS TÉCNICOS DISPONÍVEIS

USO DA AEROFOTOGRAMETRIA

Em todas as fases do projeto os levantamentos topográficos necessários poderão ser feitos com o uso da topografia

terrestre ou da aerofotogrametria, o método mais adequado é o resultado de uma análise de custos e vantagens de cada um dos processos.

Vantagens do uso da aerofotogrametria:

- Todo o estado de São Paulo e parte do Brasil já estão cobertos por levantamentos aerofotogramétricos e restituições com nível de precisão suficiente para os trabalhos na fase de reconhecimento;
- Na maioria dos casos as restituições aerofotogramétricas são mais baratas e mais rápidas que os levantamentos topográficos terrestres;
- As plantas aerofotogramétricas cobrem áreas muito maiores do que as faixas de terreno obtidas com levantamentos terrestres, permitindo ao projetista uma análise geral da região. Os levantamentos terrestres são feitos sobre faixas previamente selecionadas, sendo economicamente inviável um levantamento de toda a região. Assim o uso da aerofotogrametria permite o estudo de soluções sobre toda a área não ficando o projetista restrito às faixas pré-selecionadas. A figura 8 mostra um exemplo de restituição aerofotogramétrica na escala 1:10000 com curvas de nível de
- A escolha do traçado pode ser feita sem interferências locais, podendo ser mantida a reserva necessária durante a fase de projeto;
- A análise e interpretação das fotografias aéreas fornecem dados adicionais importantes à escolha do traçado.

USO DE GABARITOS

Gabaritos de curvas horizontais são conjuntos de curvas plásticas circulares para diversos raios, feitos na escala 1:1000 mas que facilmente podem ser usados em plantas com outras escalas. Esses gabaritos facilitam muito a escolha dos raios mais adequados às curvas horizontais permitindo ao projetista o teste rápido de vários raios diferentes para uma determinada curva, sem o uso de grandes e desconfortáveis compassos que seriam necessários para o desenho das curvas.

Existem também gabaritos para o desenho de curvas verticais parabólicas em escala deformada (escala vertical 10 vezes maior que a horizontal) que permitem o teste rápido de várias curvas sem a necessidade de cálculos trabalhosos.

USO DE COMPUTADORES

O uso da computação no projeto de estradas torna-se cada vez mais difundido.

Existem nas diversas bibliotecas de centros de processamento de dados um grande número de programas específicos para cálculo dos diversos elementos que compõe o projeto de uma estrada.

Assim dispomos hoje de programas para cálculo dos elementos básicos de curvas horizontais, curvas de transição, escolha e variação da superelevação, curvas verticais, estaqueamento de estradas, movimento de terra etc.

Na maioria são programas bem gerais, desenvolvidos para a aplicação nos casos normais de projeto, e de fácil acesso aos interessados.

Existem também um grande número de programas mais complexos e sofisticados que permitem cálculos globais de um projeto. Esses programas, geralmente desenvolvidos para a solução de problemas específicos, tem seu campo de aplicação limitado à determinadas condições e precisam ser adaptados para o uso em projetos diferentes daqueles para os quais foram desenvolvidos. O acesso a programas desse tipo nem sempre é fácil, a maioria deles é considerada como "know-how" de seus programadores.

Um programa global normal calcula os diversos elementos geométricos necessários à definição do projeto partindo de limitações mínimas definidas pelo projetista, posição dos PI em planta, posição dos PIV em perfil e raios ou comprimentos das curvas escolhidas. A escolha da posição e raios das curvas envolve um número muito grande de variáveis e decisões que ainda dependem do projetista; mesmo os programas mais sofisticados não conseguem escolher esses elementos.

Muitos institutos de pesquisa ligados ao projeto de estradas desenvolvem programas complexos visando a otimização dos projetos, como exemplo podemos citar o programa Venus desenvolvido pelo "Transport and Road Research Laboratory" que executa todo

o projeto do perfil longitudinal de uma estrada minimizando o movimento de terra. A IBM desenvolveu o sistema de programa COGO (Civil Engineering Coordinate Geometry) que permite o cálculo de todos os elementos básicos do projeto geométrico de uma estrada. O sistema COGO é um conjunto de comandos básicos que adequadamente combinados fornecem valores e coordenadas de uma planta ou um perfil de estrada previamente definido.

2. ELEMENTOS BÁSICOS PARA PROJETO GEOMÉTRICO

2.1. INTRODUÇÃO

Projeto geométrico é a parte do projeto de estradas que estuda as diversas características geométricas do traçado em função das leis do movimento, características de operação dos veículos, - comportamento dos motoristas e características do tráfego; objetivando a definição de uma estrada segura, confortável e eficiente.

Características geométricas inadequadas são causas de acidentes de tráfego, baixa eficiência e obsolescência precoce da estrada, fato que não deve ocorrer antes que os benefícios advindos da estrada justifiquem o investimento feito na sua construção.

A escolha de boas características geométricas não acarreta acréscimos no custo de construção, tão grandes quanto possa parecer; porém, se um dos três elementos: curvas, largura da plataforma ou rampas tiver que ser melhorado depois de um pequeno período de uso da estrada, perde-se todos os demais serviços executados na sua construção, e normalmente o custo dessa melhoria será muito alto em relação ao custo de construção.

Os diversos elementos do projeto geométrico devem ser escolhidos de forma que a estrada possa atender aos objetivos para os quais foi projetada, comportando um volume e dando condições de escoamento de tráfego que justifiquem o investimento feito.

2.2. VELOCIDADES

A velocidade com a qual um determinado veículo percorre a estrada depende das características do veículo, vontade do motorista e qualidade da estrada. Assim uma determinada estrada é percorrida tanto por veículos leves em velocidades altas quanto por veículos pesados em velocidades baixas, entretanto a média das velocidades dos diversos veículos é um valor proporcional a qualidade das características técnicas do traçado, variando ao longo do tempo em função do maior ou menor volume de tráfego da estrada.

A velocidade com a qual um veículo percorre uma estrada depende: capacidade e vontade do motorista, condições e características do veículo, estado da superfície de rolamento da estrada, condições climáticas do momento, volume e condições de escoamento de

tráfego do momento, características geométricas do traçado, restrições relativas a velocidades máximas e mínimas da estrada, policiamento e sistema de controle de velocidade dos veículos.

Velocidades médias altas só são possíveis em estrada onde a qualidade das características geométricas permitem aos motoristas trafegarem com velocidades altas, com segurança.

2.2.1. VELOCIDADE DE PROJETO

A A.A.S.H.O. (3) define a velocidade de projeto (V_p) como a máxima velocidade que um veículo pode manter, em um trecho de estrada, em condições normais, com segurança.

A escolha do valor a ser adotado para a velocidade de projeto é fator decisivo na definição do padrão da estrada, todas as características geométricas mínimas terão que ser definidas de forma que a estrada em todos os seus pontos ofereça segurança ao motorista que a trafegue na velocidade de projeto; por outro lado o custo de construção estará diretamente ligado aos valores mínimos adotados no projeto e à topografia da região atravessada. Em outras palavras a escolha de um valor maior para a velocidade de projeto trará como consequência uma estrada de melhor padrão e conseqüentemente de maior custo, especialmente em locais de topografia acidentada.

Assim, a escolha do valor a ser adotado para a velocidade de projeto deverá ser o resultado de uma análise cuidadosa entre a possibilidade de obter-se uma estrada de melhor padrão ou de uma estrada de menor custo, levando-se sempre em consideração a variação dos custos de construção em função da topografia local.

Deve-se sempre procurar uma velocidade de projeto única para toda a estrada, só é justificável o uso de velocidades diferentes para os diversos trechos, quando houver grandes variações nas condições topográficas da região atravessada ou grandes alterações nas características do tráfego esperado.

A tabela 1 mostra valores da velocidade de projeto recomendados pelo DER-SP.

TABELA 1

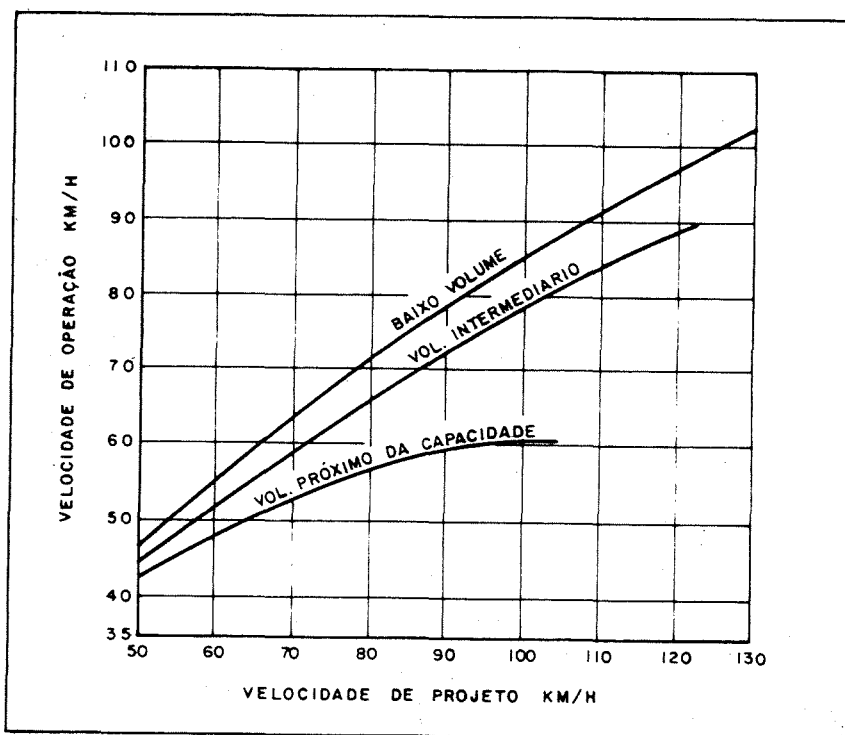
CLASSIFICAÇÃO DA RODOVIA	TIPO DE TERRENO	VELOCIDADE DE PROJETO (KM/H)	
		DESEJÁVEL	MÍNIMA
Classe E VDM = 4401 a 50000	Plano	120	100
	Ondulado	100	80
	Montanhoso	80	60
Classe I VDM = 1501 a 4400	Plano	100	100
	Ondulado	80	80
	Montanhoso	60	60
Classe II VDM = 501 a 1500	Plano	80	80
	Ondulado	60	60
	Montanhoso	40	40
Classe III VDM até 500	Plano	60	60
	Ondulado	40	40
	Montanhoso	30	30

2.2.2. VELOCIDADE DE OPERAÇÃO

Chama-se velocidade de operação (V_o) a média de velocidades para todo o tráfego ou parte dele, obtida pela soma das distâncias percorridas dividida pelo tempo de percurso.

Melhores características geométricas e maior segurança encorajam os motoristas a andar em maiores velocidades tornando a velocidade de operação uma função da velocidade de projeto.

A figura 9 mostra a relação entre velocidade de operação e de projeto para volumes de tráfego diferentes.



RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE PROJETO E VELOCIDADE DE OPERAÇÃO

FIGURA 9

2.3. DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE

A estrada tem que oferecer, ao motorista que a percorre, condições de visibilidade suficientes para que este possa desviar ou parar diante de qualquer obstáculo que possa surgir no seu percurso.

A segurança de uma estrada está diretamente relacionada às condições de visibilidade que ela oferece, portanto, independentemente de valores mínimos o projetista deve sempre procurar soluções que permitam ao motorista, a visão à distância de qualquer eventual obstáculo.

Cuidados especiais devem ser tomados nos acessos à estrada de forma que todos os veículos que vão entrar nas correntes de tráfego de estrada possam ser vistos à distância suficiente.

Valores mínimos que necessariamente devem ser respeitados:

distância de frenagem (D_f) e distância de ultrapassagem (D_u).

2.3.1. DISTÂNCIA DE FRENAGEM (DF)

É a distância mínima para que um veículo que percorre a estrada, na velocidade de projeto, possa parar, com segurança, antes de atingir um obstáculo em sua trajetória.

O projeto da estrada deve oferecer condições de visibilidade de forma que sempre que um veículo avistar um obstáculo a sua frente ele possa parar antes de atingí-lo.

Tempo de percepção é o lapso de tempo entre o instante em que um motorista percebe um obstáculo a sua frente e o instante em que decide iniciar uma frenagem.

Muitos testes foram executados com o objetivo de determinar o tempo de percepção dos motoristas, esses testes mostraram que para a maioria dos motoristas o tempo de reação é de aproximadamente 0,7 segundos com apenas 5% dos motoristas necessitando de um tempo superior a 1 segundo. Observou-se também que o tempo de percepção depende de vários fatores como: distância até o objeto, habilidade ótica do motorista, forma e cor do obstáculo, condições de visibilidade e especialmente atenção do motorista.

Tempo de reação é o intervalo de tempo entre o instante em que o motorista decide frear e o instante em que efetivamente inicia a frenagem. Testes de laboratório mostram que esse tempo é da ordem de 0,5 segundos, havendo alguns motoristas que tem uma reação quase que instantânea e outros com tempos de 1 segundo ou mais.

A escolha de um valor para ser adotado no projeto deve levar em consideração a necessidade de adotar-se um valor seguro e a observação de que o tempo de reação dos motoristas depende muito do seu nível de atenção, porisso aconselha-se os seguintes valores: tempo de percepção 1,5s, tempo de reação 1s, resultando um tempo de percepção e reação $t_r = 2,5s$

Cálculo da distância de frenagem (DF)

Método da A.A.S.H.O.

A distância de frenagem será a soma de duas parcelas. A primeira (D_1) relativa a distância percorrida pelo veículo durante o tempo de percepção e reação. A segunda (D_2) relativa a distância percorrida durante a frenagem.

$$D_1 = V \cdot t_r \quad (1)$$

Nas unidades usuais e adotando-se $t_r = 2,5s$

$$D_1 = 0,7V \quad (2)$$

onde D_1 = distância percorrida durante o tempo t_r em (m)

V = velocidade de projeto em (km/h)

Experiências realizadas mostram que a distância percorrida pelo veículo durante a frenagem (D_2) não pode ser determinada como o espaço percorrido em um movimento uniformemente desacelerado porque a desaceleração do veículo não é uniforme.

A ação do freio do veículo não é constante, diminuindo após certo tempo de frenagem e além disso a pressão de frenagem exercida pelo motorista começa de forma suave e tende a aumentar à medida que o obstáculo aproxima-se

O valor de D_2 , para um trecho em nível, pode ser obtido pela equação:

$$D_2 = 0,0039 \frac{V^2}{f} \quad (3)$$

onde D_2 = distância percorrida durante a frenagem em (m)

V = velocidade de projeto em (km/h)

f = coeficiente de atrito entre pneu e pavimento

Medidas feitas do coeficiente de atrito (f) mostram que (f) não é o mesmo para todas as velocidades, ele diminui à medida que a velocidade aumenta.

A A.A.S.H.O. (3), aconselha, para uso em projeto, os valores da Tabela 2.

TABELA 2

VALORES DO COEFICIENTE DE ATRITO (f)		
ADOTADOS PARA PROJETO		
VELOCIDADE (km/h)	COEFICIENTE DE ATRITO (f)	
	PAVIMENTO SECO	PAVIMENTO MOLHADO
50	0.62	0.36
60	0.60	0.34
70	0.59	0.32
80	0.58	0.31
90	0.57	0.31
100	0.56	0.30
110	0.55	0.30
120	0.54	0.29
130	0.53	0.28

Efeito das rampas sobre a distância de frenagem:

Nos trechos em rampa a componente do peso do veículo, na direção da rampa, ajuda o veículo a parar nas subidas e dificulta nas descidas.

Chamando-se de i a inclinação da rampa e adotando-se a convenção:

rampa de subida + i

rampa de descida - i

Teremos:

$$D_2 = 0,0039 \frac{v^2}{f+i} \quad (4)$$

Em resumo, nos trechos em rampa, a distância de frenagem é calculada pela seguinte equação:

$$DF = 0,7V + 0,0039 \frac{v^2}{f+i} \quad (5)$$

onde DF = distância de frenagem em (m)

V = velocidade de projeto em (km/h)

f = coeficiente de atrito longitudinal pneu x pavimento

i = inclinação da rampa em (m/m) com respectivo sinal

adotado $t_r = 2,5s$

A equação 5 pode também ser utilizada em trechos em curva vertical, quando o valor de i muda de ponto para ponto e conseqüentemente muda também o efeito do greide sobre a frenagem. Nestes casos deve-se adotar para i o valor médio entre a rampa inicial e a rampa final do trecho considerado.

MÉTODO FRANCÊS - COQUAND (1)

No projeto das estradas francesas o método adotado para o cálculo da distância de frenagem (DF) leva a valores menores que os propostos pela A.A.S.H.O. (1) principalmente para velocidades de projeto baixas.

É adotado para tempo de percepção e reação o valor $t_r = 0,7s$, para f o valor constante $f = 0,4$ e para D_2 a equação:

$$D_2 = \frac{v^2}{2g(f+i)} \quad (6)$$

Em consequência teremos:

$$D_F = \frac{V}{5} + \frac{V^2}{100(1+2,5i)} \quad (7)$$

onde: D_F = distância de frenagem em (m)
 V = velocidade de projeto em (km/h)
 i = inclinação da rampa em (m/m) com respectivo sinal
 adotados: $f = 0,4$ e $t_r = 0,75s$

A tabela 3 mostra um quadro comparativo de valores de D_F obtidos pelo uso das equações 5 e 7 respectivamente, para trechos em nível ($i=0$)

TABELA 3

VELOCIDADE DE PROJETO (km/h)	DISTÂNCIA DE FRENAGEM D_F (m)	
	A.A.S.H.O.	COQUAND ()
50	50	35
60	65	48
70	81	63
80	98	80
90	118	99
100	138	120
110	162	143

CONSIDERAÇÕES SOBRE A NORMA

As normas para projeto das estradas de rodagem () estabelecem que a distância de frenagem deve ser calculada como a distância mínima necessária para que dois veículos que percorram a mesma faixa de tráfego em sentidos opostos, possam evitar o choque, recorrendo aos freios.

A norma recomenda o uso da equação:

$$D_F = 2(0,5V + 0,01V^2) \quad (8)$$

onde: D_F = dupla distância de frenagem em (m)
 V = velocidade de projeto em (km/h)

Comparando-se as equações 7 e 8 vemos que a norma recomenda o uso de valores mais que duas vezes superiores aos usados no projeto das estradas francesas.

2.3.2 DISTÂNCIA DE VISIBILIDADE PARA ULTRAPASSAGEM

Na estradas com pistas com dois sentidos de tráfego, é necessário que existam um grande número de trechos com visibilidade suficiente para que os veículos mais rápidos possam ultrapassar os mais lentos.

Para que a ultrapassagem possa ser feita com segurança, o motorista precisar ver, a uma distância suficiente, um vazio no tráfego de sentido oposto, que lher permita a execução completa da manobra de ultrapassagem.

Para uso no projeto, define-se como distância de visibilidade de ultrapassagem (D_U), o valor do comprimento de estrada necessário para que um veículo possa executar a manobra de ultrapassagem de um outro veículo com segurança.

Há condições em que um veículo ultrapassa dois ou mais veículos em uma única manobra, esses casos não devem ser considerados no critério para a fixação de valores mínimos para (D_U), pois levariam a valores excessivamente altos e temos que lembrar que na estrada certamente existirão trechos com condições de visibilidade muito maiores que os mínimos valores fixados para (D_U).

A definição de um valor mínimo para (D_U) tem como objetivo estabelecer uma condição mínima de visibilidade a ser respeitada em alguns trechos da estrada. Grandes trechos, (maiores que 2000 m) sem visibilidade mínima para ultrapassagem reduzem a capacidade de tráfego da estrada e afetam a segurança do tráfego.

CRITÉRIO DE CÁLCULO DA A.A.S.H.O.

Para a determinação de um valor adequado de (D_U) para uso em projeto é necessário adotar certas hipóteses sobre o comportamento dos motoristas e veículos nas manobras de ultrapassagem.

A A.A.S.H.O. (3) baseada em uma larga experiência - internacional propôs as seguintes hipóteses: (ver figura 10).

1. O veículo (2) a ser ultrapassado trafega a uma velocidade V_2 constante.
2. O veículo (1) que vai ultrapassar reduz sua velocidade para V_2 e acompanha o veículo a ser ultrapassado até visualizar um espaço suficiente para executar a ultrapassagem.
3. Quando aparece um espaço suficiente o motorista gasta um certo tempo de reação e inicia a aceleração de seu veículo para a ultrapassagem.
4. O veículo (1) que ultrapassa executa a manobra - pela faixa de tráfego de sentido oposto; ele acelera seu veículo durante o tempo de ocupação da faixa da esquerda obtendo uma velocidade média 16 km/h mais alta que a velocidade V_2 do veículo ultrapassado.
5. Quando o veículo (1) termina a manobra, voltando à sua faixa de tráfego haverá um espaço de segurança (d_3) entre ele e o veículo (3) que vem em sentido contrário.

Baseando-se nessas hipóteses a A.A.S.H.O. calcula a distância de visibilidade de ultrapassagem (D_U) com a seguinte equação:

$$D_U = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 \quad (9)$$

$$d_1 = 0.278 t_1 \left(V - m + \frac{a t_1}{2} \right) \quad (10)$$

$$d_2 = 0.278 V t_2 \quad (11)$$

$$d_3 = \text{valor tabelado}$$

$$d_4 = \frac{2d_2}{3} \quad (12)$$

onde: d_1 = distância percorrida durante o tempo de reação e aceleração inicial em (m)

d_2 = distância percorrida pelo veículo (1) durante o tempo - em que este ocupa a faixa de tráfego oposta em (m)

d_3 = distância de segurança em (m)

d_4 = distância percorrida pelo veículo (3), que trafega no sentido oposto, e aparece no instante em que o veículo (1) acha que não tem mais condições para desistir da manobra em (m)

t_1 = tempo da manobra inicial em (s) - Tabela 3

t_2 = tempo em que o veículo (1) ocupa a faixa oposta em (s) - Tabela 3

V = velocidade média de ultrapassagem (km/h) - Tabela 3

m = diferença entre a velocidade média do veículo (1) que ultrapassa e a velocidade constante do veículo (2) que é ultrapassado $m = 16$ km/h.

a = aceleração média em km/h.s - Tabela 3

TABELA 3

VALORES ADOTADOS PARA PROJETO: D_U (m)				
V - Velocidade média de ultrapassagem (km/h)	56	70	84	99
manobra inicial:				
a - aceleração média (km/h.s)	0.88	0.89	0.92	0.94
t_1 - tempo de manobra inicial (s)	3.6	4.0	4.3	4.5
d_1 - (equação 10) (m)	42	62	84	107
ocupação da faixa oposta:				
t_2 - tempo ocupação da faixa oposta (s)	9.3	10.0	10.7	11.3
d_2 - (equação 11) (m)	145	195	250	311
d_3 - espaço de segurança (m)	30	55	75	90
d_4 - (equação 12) (m)	97	130	167	208
$D_U = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$ (m)	314	442	576	716

Os valores da Tabela 3 permitem a construção do gráfico da figura 10 que fornece também valores de D_U em função da velocidade de projeto.

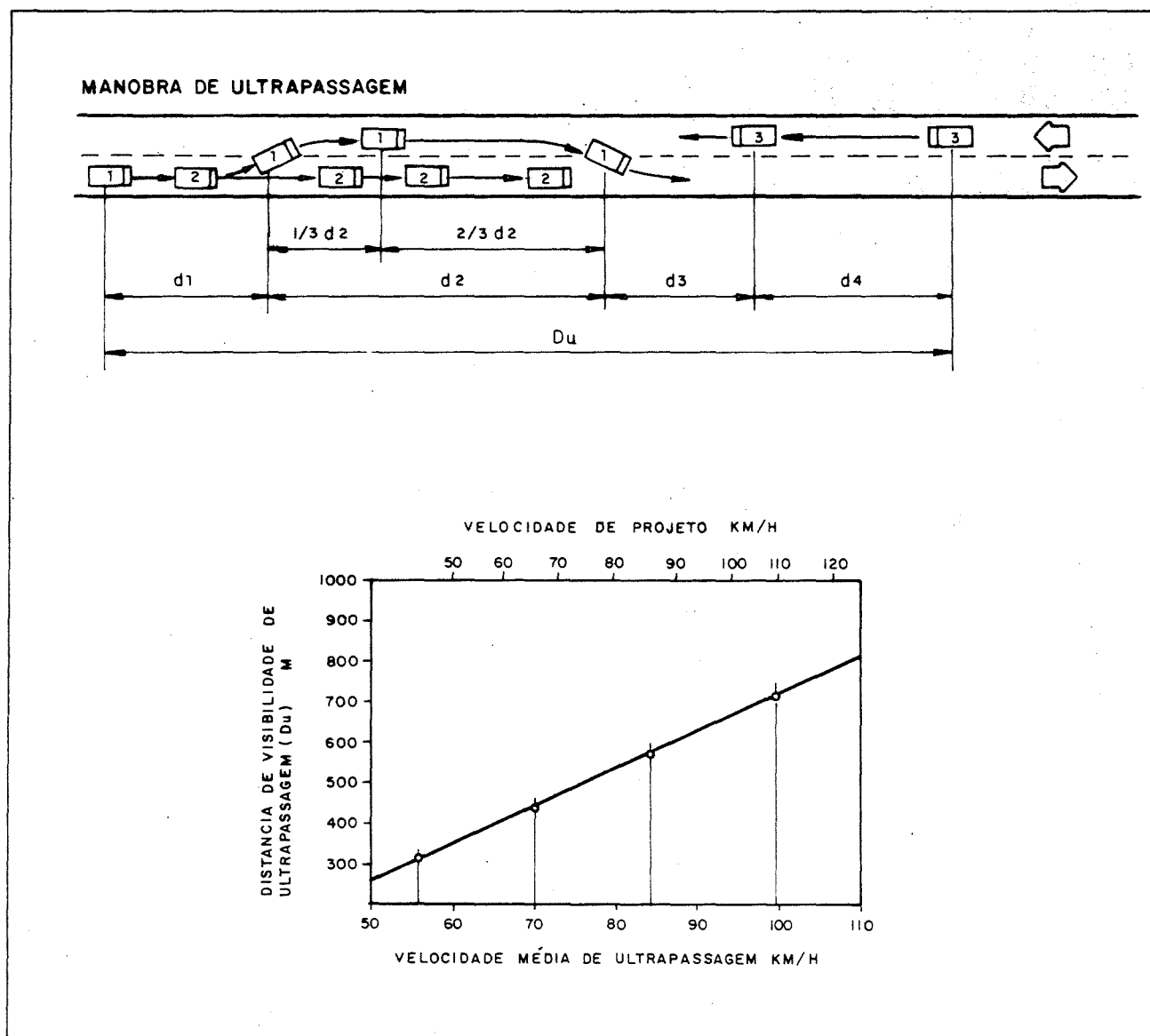


FIGURA 10

CRITÉRIO DE CÁLCULO DE COQUAND (1)

Pode-se determinar o valor aproximado da distância de visibilidade necessária à ultrapassagem (D_U) da seguinte maneira:

O veículo 2 trafega com uma velocidade constante v_2 menor que a velocidade de projeto da estrada percorrendo um espaço $v_2 t$ durante a manobra, enquanto o veículo 1, que ultrapassa a uma velocidade constante $v_1 > v_2$ percorre o espaço: $E = v_2 t + d_1 + d_2$ (ver figura (1)).

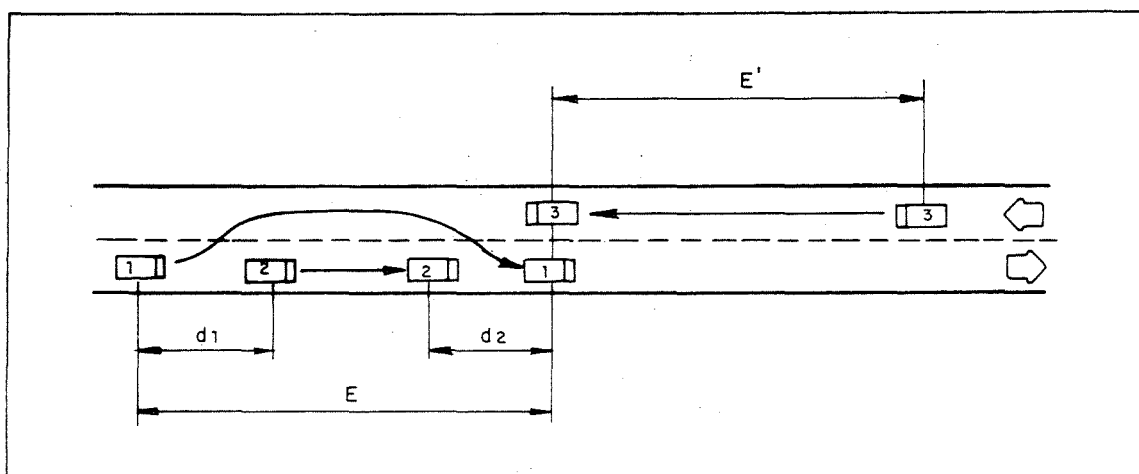


FIGURA 11

Nessas condições teremos:

$$E = v_1 t = v_2 t + d_1 + d_2 \quad (13)$$

$$t = \frac{d_1 + d_2}{v_1 - v_2} \quad (14)$$

$$E = \frac{v_1 (d_1 + d_2)}{v_1 - v_2} \quad (15)$$

O comportamento de um motorista que se prepara para ultrapassar um veículo (ou que acaba de ultrapassá-lo) é diferente do comportamento do motorista que segue durante muito tempo uma extensa fila de veículos. No primeiro caso o motorista está mais atento e se aproxima mais do veículo da frente antes de ultrapassá-lo, por isso para o caso da ultrapassagem podemos adotar para d_1 e d_2 valores menores que os definidos pela equação 25 do item 2.3.3.

Neste caso podemos adotar para o cálculo de d_1 e d_2 a equação:

$$d = 8 + 0,2V \quad (16)$$

onde d = distância entre veículos em (m)

V = velocidade de percurso dos veículos em (km/h)

Para que a manobra seja possível é necessário que

no instante de início da manobra a faixa de tráfego de sentido oposto esteja livre numa distância de no mínimo $E + E'$ onde E' é a distância percorrida pelo veículo 3 que vem em sentido contrário com uma velocidade v_3 .

Na condição mais desfavorável teremos:

$$V_1 = V_3 = V_p \text{ (velocidade de projeto)}$$

$V_2 = V_1 - m$, sendo m a diferença de velocidades entre o veículo que ultrapassa e o veículo ultrapassado.

Nessas condições teremos:

$$D_U = E + E' \quad (17)$$

onde D_U = distância de visibilidade para ultrapassagem

$$t = (d_1 + d_2)/m \quad (18)$$

onde t = tempo de duração da manobra

$$E = E' = V_p t = V_p (d_1 + d_2)/m \quad (19)$$

onde V_p = velocidade de projeto

$$d_1 = 8 + 0,2V_p \quad (20)$$

$$d_2 = 8 + 0,2 (V_p - m) \quad (21)$$

onde d_1 e d_2 = distância de segurança em veículos em (m)

V_p = velocidade de projeto em (km/h)

m = diferença de velocidades em (km/h)

A Tabela 4 mostra valores da distância de visibilidade de ultrapassagem D_U calculada pelo método acima.

TABELA 4

VELOCIDADE DE PROJETO (km/h)	DIFERENÇA DE VELOCIDADE m (km/h)		
	10	15	20
60	456	296	216
80	736	480	352
100	1080	707	520

A Tabela 5 apresenta uma comparação de valores D_U obtidos pelos dois métodos expostos para $m = 15$ km/h (diferença de velocidades entre os veículos)

TABELA 5

VALORES DE D_U (m) ADOTADOS PARA PROJETO		
VELOCIDADE DE PROJETO (km/h)	A.A.S.H.O.	COQUAND
60	410	296
80	540	480
100	680	707

2.3.3. DISTÂNCIA DE SEGURANÇA ENTRE DOIS VEÍCULOS

Quando dois veículos percorrem a mesma faixa de tráfego no mesmo sentido (figura 12) deverá existir entre eles uma distância mínima, de forma que se o veículo da frente freiar haja espaço suficiente para que o veículo de trás possa também frear e parar sem perigo de colisão com o veículo da frente.

Teoricamente os dois veículos circulando à mesma velocidade deveriam para a uma mesma distância D_F (distância mínima de frenagem), não havendo necessidade de espaço entre eles.

Porém, o motorista do veículo A (figura 11) não inicia a frenagem simultaneamente com a frenagem do veículo B, ele leva um certo tempo de percepção e reação (t_r) para perceber a luz de freio do veículo B e iniciar a frenagem, percorrendo nesse tempo um espaço d_1 .

$$d_1 = V_p t_r \quad (22)$$

onde: d_1 = espaço percorrido pelo veículo A durante o tempo t_r

t_r = tempo de percepção e reação

V_p = velocidade de projeto (condição mais desfavorável)

O valor do tempo de percepção e reação (t_r) para esse caso é da ordem de 0,75s, pois quando um motorista trafega próximo a velocidade de projeto, mantendo uma pequena distância do veículo da frente, ele está atento e reage rapidamente.

Quando o motorista do veículo A vê a luz de freio do veículo B, não conhece a intensidade da frenagem de B e geralmente inicia uma frenagem lenta criando uma desaceleração menor que a do veículo B quando este freia bruscamente. Por outro lado o comportamento do sistema de freios dos dois veículos não é igual, e pode ocorrer que o veículo B necessite de uma menor distância de frenagem do que o veículo A, mesmo que os dois veículos iniciem a frenagem com a mesma velocidade inicial.

Para compensar esses fatos é necessário a existência de um espaço adicional d_2

$$d_2 = K V_p^2 \quad (23)$$

onde: d_2 = espaço adicional de segurança

K = constante

V_p = velocidade de projeto (condição mais desfavorável)

Além disso como os veículos não são pontuais é necessário que quando os veículos parem exista entre os centros dos dois veículos uma distância d_3 igual ao comprimento dos veículos.

Assim a distância de segurança entre 2 veículos (D_S) pode ser determinada pela soma das parcelas $d_1 + d_2 + d_3$.

$$D_S = d_3 + V_p tr + K V_p^2 \quad (24)$$

Experiências recentes indicam como razoável o uso dos seguintes coeficientes: $d_3 = 8m$, $tr = 0,75s$, $K = 0,003$. Aplicando esses valores à equação 24 teremos:

$$D_S = 8 + 0,2V_p + 0,003 V_p^2 \quad (25)$$

onde: D_S = distância de segurança entre 2 veículos (m)

V_p = velocidade de projeto (km/h)

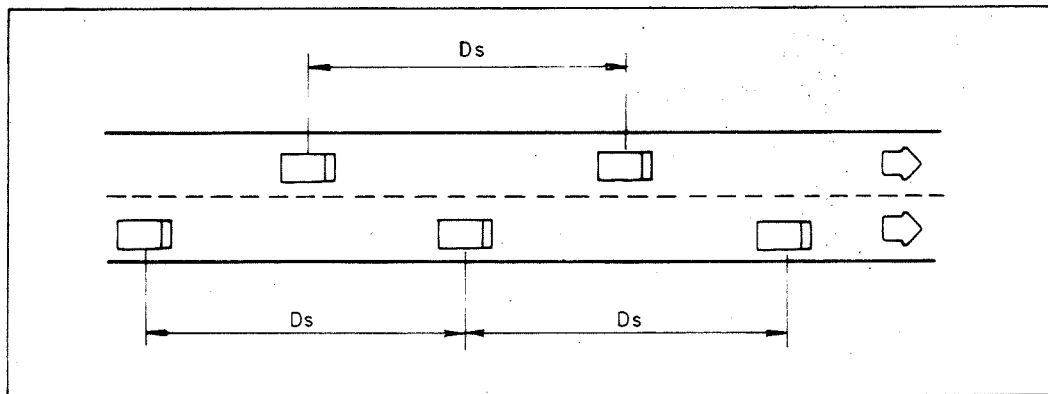


FIGURA 12

Como consequência da equação 25 podemos determinar o número teórico máximo de veículos por hora, que podem percorrer uma faixa de tráfego de uma estrada.

Considerando-se os veículos espaçados a uma distância D_S e percorrendo a estrada a uma velocidade constante V , o número de veículos que passam por uma seção da estrada em um hora será:

$$N = \frac{1000V}{D_S} = \frac{1000V}{8+0,2V+0,003V^2} \quad (26)$$

onde: V = velocidade constante de percurso (km/h)

D_S = distância entre veículos (m)

O valor máximo de N ocorrerá para uma velocidade V tal que

$$\frac{dN}{dV} = 0 \quad \text{ou seja} \quad V \approx 50 \text{ km/h}$$

da equação (25) temos: $D_S = 26 \text{ m}$

da equação (26) temos: $N = 1968$ veículos por hora

Esses resultados são valores coerentes com dados obtidos em medidas diretas de capacidade máxima por faixa.

BIBLIOGRAFIA

Livros:

1. COQUAND, Roger - Routes-Circulation-Tracé-Construction
Editions Eyrolles - 1956.
2. OGLESBY, Clarkson H. e Laurence I. Heves - Highway Engineering
John Willey e Sons, Inc. - 1963.

Manuais:

3. A.A.S.H.O. - American Association of State Highway Officials
A Policy Geometric Design of Rural Highway.
Association General Offices - 1965.
4. I.B.M. - COGO - Civil Engineering Coordinate Geometry - Application
Program - H20-0301-1.

Artigo:

5. BERRY, Frank R. - Development and Use of Models in the Design
of Highway. Highway Research Record nº 172, pag. 21 a 38
1967.
6. LEISCH, Jack E. - New Techniques in alinement design and sta-
keout. Journal of the Highway Division vol. 92, pag. 23 a
47 - março 1966.
7. NEUZIL, Dennis - Aesthetic Preferences and Percieved Safety in
Highway Design Treatments: A Pilot Survey. Transportation
Research Record nº 518, pag. 11 a 28 - 1974.