



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

# PROJETO DE TERRAPLENAGEM NOTAS DE AULA

CARLOS REYNALDO TOLEDO PIMENTA  
MARCIO PIRES DE OLIVEIRA

SÃO CARLOS  
2020

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES - STT

PROJETO DE TERRAPLENAGEM

NOTAS DE AULA

PROF. CARLOS REYNALDO TOLEDO PIMENTA

PROF. MARCIO PIRES DE OLIVEIRA

APOSTILA  
P697pt  
e.1

- SÃO CARLOS - 1991 -  
PUBLICAÇÃO 024/91

## PROJETO DE TERRAPLENAGEM

### 1. INTRODUÇÃO

O projeto de uma estrada deve ser escolhido de forma a harmonizar os elementos geométricos da planta e do perfil de forma que o resultado tridimensional seja uma estrada segura, confortável e adequada à região por ela percorrida.

O projeto terá também que considerar a necessidade de minimizar os custos de construção, procurando soluções de baixo custo que atendam às necessidades geométricas de um bom projeto.

O custo do movimento de terra é na maioria dos projetos significativo em relação ao custo total da estrada, sendo portanto um item importante a ser analisado.

Nos locais onde os materiais de corte tiverem condições de serem usados nos aterros o equilíbrio entre volumes de cortes e aterros, evitando empréstimos e/ou bota-foras leva aos menores custos de terraplenagem. Esse equilíbrio deve sempre ser tentado, desde que não crie grandes prejuízos às características geométricas do projeto.

A drenagem superficial da estrada, em muitos casos, é fator preponderante, impedindo que seja possível, encontrar-se uma solução adequada com equilíbrio entre os volumes de corte e aterro.

O movimento de terra deve ser analisado não só sob o aspecto de volumes de cortes e aterros mas também deverão ser analisados aspectos relativos aos processos de execução da terraplenagem, principalmente distâncias e condições de transportes dos materiais que serão escavados nos cortes e levados para os aterros.

### 2. CÁLCULO DE VOLUMES

Para o cálculo dos volumes de terra a serem escavados nos cortes e depositados nos aterros é necessário supor a existência de um determinado sólido cujo volume possa ser facilmente determinado.

O método usual consiste em considerar o volume como proveniente da somatória de uma série de pequenos volumes representados por sólidos de volume calculável.

Cada um dos sólidos é definido como sendo o volume de terra existente no espaço entre duas seções consecutivas dos cortes e/ou aterros.



Para calcular cada um desses volumes -admite-se que o terreno varie de forma linear entre duas seções consecutivas. Essa hipótese não introduz erros significativos quando a distância entre seções é de 20 m (uma estaca).

O processo consiste no levantamento das seções transversais em cada estaca inteira do traçado (estaca de 20 m), e excepcionalmente em pontos intermediários quando o terreno apresentar grandes variações entre duas estacas consecutivas.

O volume de terra entre as seções consecutivas será calculado como:

$$V = (A_i + A_{i+1}) L/2 \quad (1)$$

onde:  $V$  = Volume ( $m^3$ )  
 $A_i$  = área da seção ( $m^2$ )  
 $L$  = distância entre seções consecutivas (m)

Quando as seções transversais correspondem às estacas inteiras do projeto teremos:

$$L = 20 \text{ m} \quad e \quad (2)$$

$$V = 10 (A_i + A_{i+1})$$

## 2.1 SEÇÕES TRANSVERSAIS

As seções transversais de uma estrada podem ser de tipos diferentes: seções em corte, seções em aterro e seções mistas, quando existem partes em corte e partes em aterro.

As áreas das seções transversais podem ser calculadas de diversas maneiras, dependendo da precisão desejada. No cálculo das áreas das seções transversais, para uso do cálculo de volumes, não há necessidade de grande precisão, pois já existe um certo erro no cálculo dos volumes com a adoção da hipótese de que o terreno varia linearmente entre as seções.

Os métodos mais usados para o cálculo de áreas de seções são os seguintes:

a) Cálculo de figuras geométricas definidas:

Quando o terreno é plano e a seção é um trapézio (Fig. 2A).

$$A = h (b + nh) \quad (3)$$

onde:  $A$  = área da seção ( $m^2$ )  
 $b$  = largura da plataforma ( $m$ )  
 $h$  = altura de corte e/ou aterro ( $m$ )  
 $n$  = inclinação do talude ( $m/m$ )

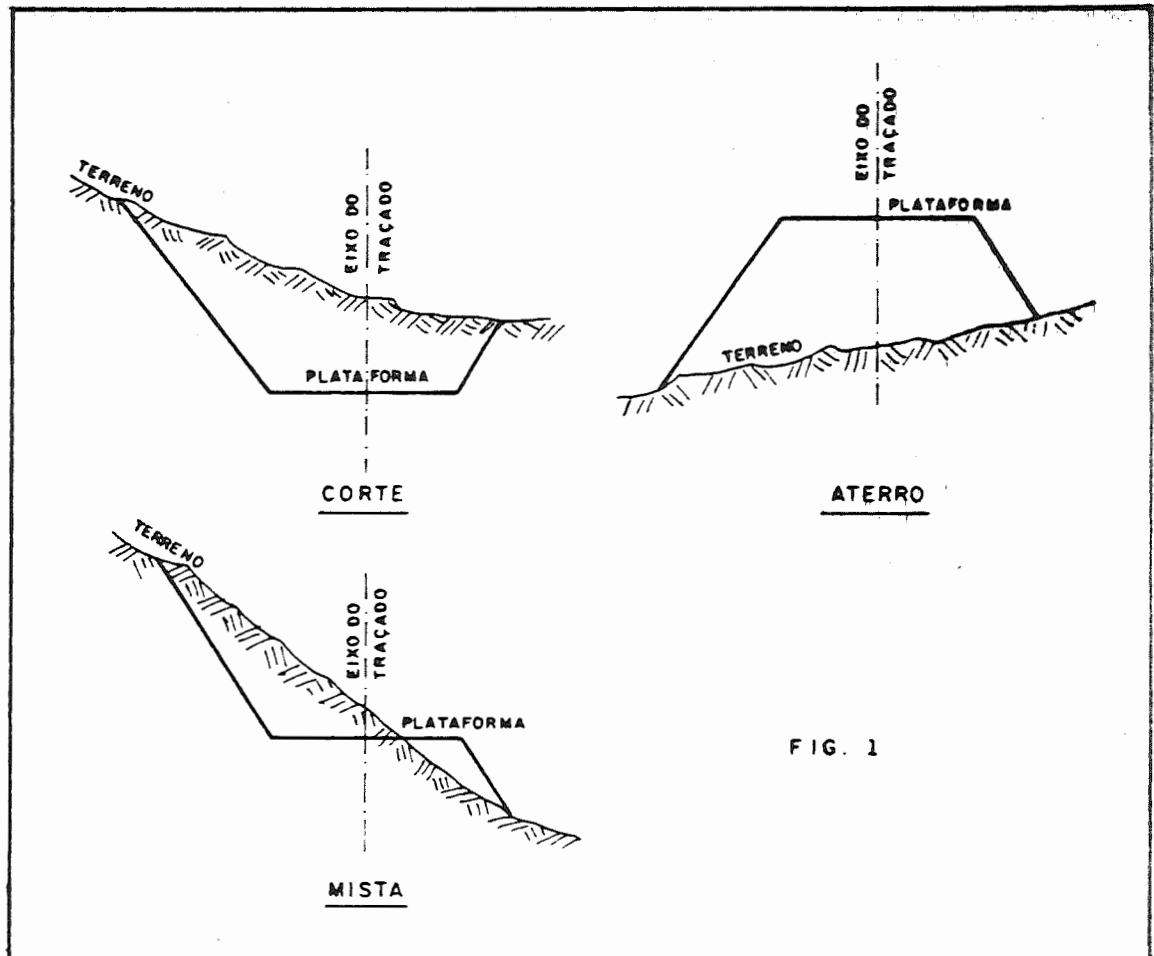


FIG. 1

Quando o terreno não é plano (fig.2B):

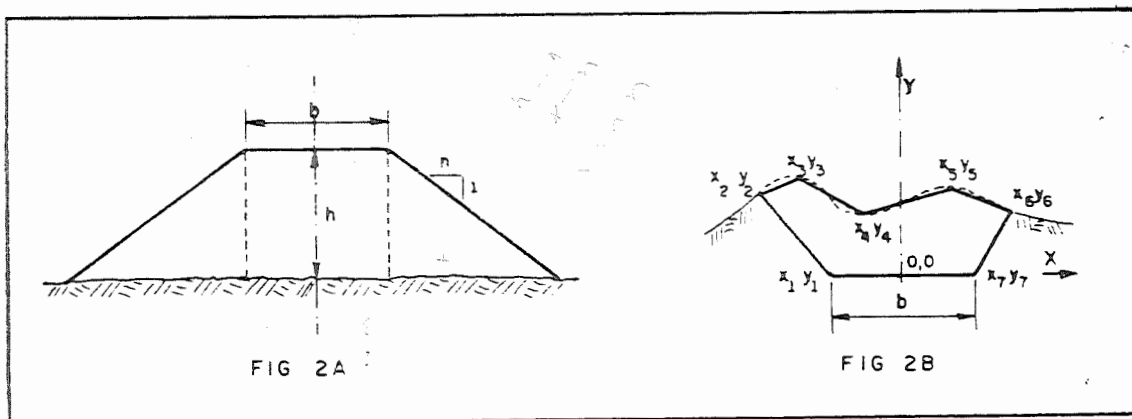
Adota-se um sistema de eixos ortogonais, com origem no eixo da plataforma. Determina-se as coordenadas  $(x_i, y_i)$  dos pontos do terreno em relação a esse sistema de eixos, a área pode ser obtida pela fórmula de Gauss:

$$A = 1/2 (y_1x_2 + y_2x_3 + y_3x_4 + \dots + y_nx_1) - (y_2x_1 + y_3x_2 + y_4x_3 + \dots + y_1x_n) \quad (4)$$

onde:  $R$  = área da seção ( $m^2$ )  
 $(x_1, y_1) = (-b/2, 0)$  coordenadas do bordo esquerdo da plataforma  
 $(x_n, y_n) = (b/2, 0)$  coordenadas do bordo direito da plataforma  
 $(x_2, y_2)$  à  $(x_{n-1}, y_{n-1})$  coordenadas do terreno

Para usar essa equação é indispensável que as coordenadas dos pontos sejam definidas na mesma ordem em que os pontos se sucedem no terreno, no sentido horário.

Um outro processo de cálculo baseia-se na divisão da área em trapézios convenientes, calcula-se a área de cada trapézio e a área da seção será a somatória das áreas dos diversos trapézios (ver cálculo de área de seção mista).



#### b) Cálculo da área das seções com o uso de planímetro

As seções devem ser desenhadas em escala adequada e sua área obtida com o uso do planímetro. O processo é trabalhoso, exige um profissional com experiência no uso do planímetro e os resultados obtidos são de baixa precisão, o processo exige 3 medidas da mesma área para determinação do erro acidental.

#### c) Cálculo de áreas com o uso da computação

Existem vários programas disponíveis que calculam as áreas das seções transversais a partir dos dados topográficos das cadernetas de campo, adotando terreno linear entre os pontos levantados.

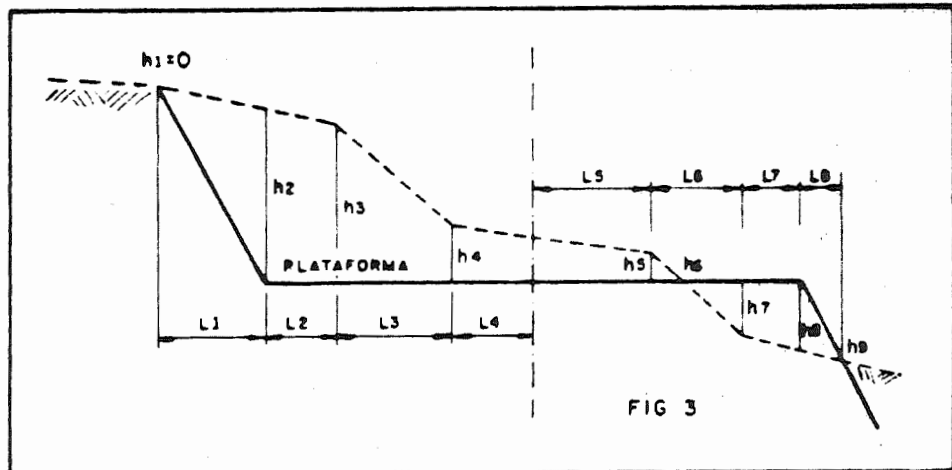
#### d) Seção mista

Quando a seção é mista, isto é, existem áreas de corte e áreas de aterro podemos usar a equação 4 para o cálculo de cada uma das áreas de corte e aterro. Neste caso é

5  
 $y_2 \cdot x_1 - y_3 \cdot x_2$

necessário a determinação prévia dos pontos onde o terreno cruza a plataforma da estrada. Essa equação foi desenvolvida para o cálculo de polígonos fechados e não pode ser usada na seção como um todo.

O processo mais prático para o cálculo das áreas das seções mista baseia-se na divisão conveniente da área em trapézios como mostra a figura 3.



Chamando-se de  $h$  a diferença de cotas entre terreno e projeto medido em cada face do trapézio, teremos:

$$h = \text{cota terreno} - \text{cota projeto}$$

A área de cada trapézio será dada por

$$A_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \times L_i$$

Obs: a equação é válida mesmo quando a figura for um triângulo, valores positivos de  $A_i$  indicam a área de corte e valores negativos de  $A_i$  área de aterro.

As áreas totais da seção serão dadas pelas equações abaixo:

$$\text{Área de corte da seção} \quad A_c = \sum A_i \text{ (positivas)}$$

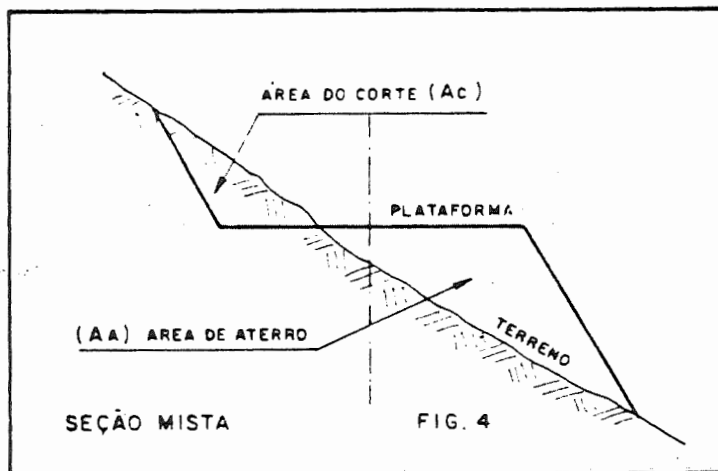
$$\text{Área de aterro da Seção} \quad A_c = \sum A_i \text{ (negativas)}$$

## 2.2 VOLUMES

Vimos que o volume geométrico dos cortes e/ou aterros deve ser obtido pela somatória dos volumes de terra existentes ao espaço entre duas seções consecutivas. Quando

essas, duas seções são de corte e/ou de aterro os volumes entre seções serão obtidas pela equação (2) quando o espaço entre seções for de 20 m, ou pela equação (1) quando o espaço entre seções for diferente de 20 m.

Quando existem seções mista (fig. 4) isso significa que existem cortes e aterros no intervalo entre seções consecutivas e nesse caso, é necessária a determinação do volume de corte e do volume de aterro separadamente.



No espaço entre seções, tanto os volumes de corte como os volumes de aterro serão calculados como segue:

$$\text{Volume de Corte } V_c = (A_{c_i} + A_{c_{i+1}}) L/2 \quad (5)$$

$$\text{Volume de Aterro } V_a = (A_{a_i} + A_{a_{i+1}}) L/2 \quad (6)$$

$$\text{ou para } L = 20 \text{ m } V_c = (A_{c_i} + A_{c_{i+1}}) \times 10 \quad (7)$$

$$V_a = (A_{a_i} + A_{a_{i+1}}) \times 10 \quad (8)$$

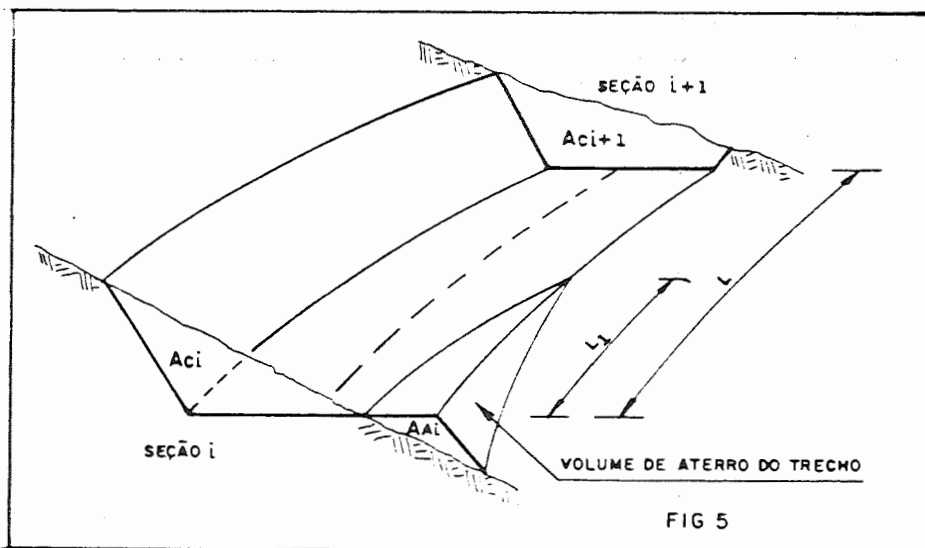
onde:

- $V_c$  = volume de corte ( $m^3$ )
- $V_a$  = volume de aterro ( $m^3$ )
- $A_{c_i}$  = área de corte da seção  $i$  ( $m^2$ )
- $A_{a_i}$  = área de aterro da seção  $i$  ( $m^2$ )
- $L$  = distância entre seções (m)

Eventualmente podemos ter o caso em que uma seção mista  $i$  seja precedida ou sucedida por seções em corte e/ou aterro nesses casos as equações (5) à (8) poderão ser usadas, sem erro apreciáveis, adotando-se para as seções só um corte  $A_a = 0$  e para as seções só em aterro  $A_c = 0$ .

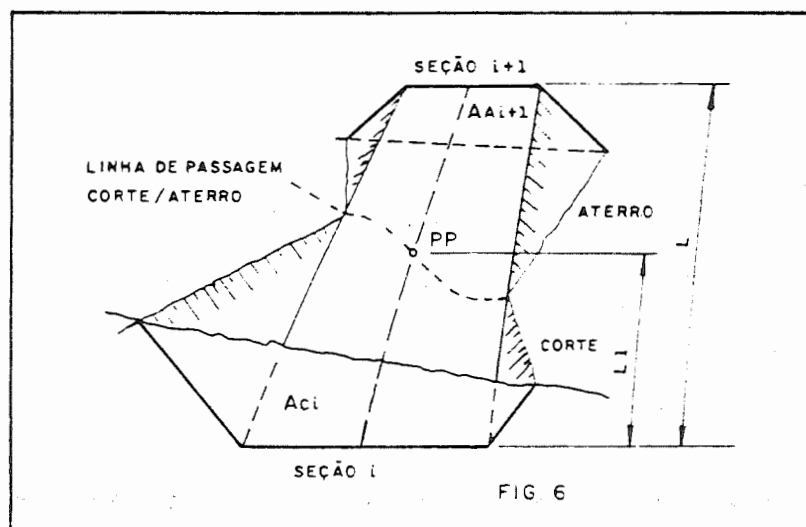
Esse procedimento introduz um erro no cálculo dos volumes por considerar que a área de corte e/ou aterro varia

linearmente, no intervalo entre seções, desde  $A_{A1}$  e/ou  $A_{C1}$  até zero, quando isso geralmente não ocorre. Um cálculo com maior precisão deveria levar em consideração a distância  $L1$  onde termina o trecho de corte e/ou aterro como mostra a fig.5.



#### PONTOS DE PASSAGEM (PP)

Definimos como pontos de passagem (PP) os pontos onde terminam os cortes e começam os aterros e os pontos onde terminam os aterros e começam os cortes. (fig. 6)



A posição ou estaca do PP pode ser estimada baseando-se na relação entre as alturas de corte e aterro das seções  $i$  e  $i+1$ , que compreendem o PP e adotando-se uma hipótese de variação linear das alturas entre as duas seções.

Como geralmente a linha de passagem corte/aterro não é perpendicular ao eixo da estrada (ver fig.6) o processo não determina com precisão a localização do PP, porém o erro de localização é geralmente pequeno, sendo irrelevante no cálculo dos volumes dos cortes e aterros. Processos mais precisos para determinação do PP exigem levantamentos de dados topográficos posteriormente ao lançamento do greide, que não justificam seus custos.

## VOLUMES DOS CORTES E ATERROS

Os volumes geométricos totais dos cortes e/ou aterros podem ser obtidos pela somatória dos valores calculados entre as suas diversas seções.

Quando existem seções mistas e os volumes entre seções são calculados com o uso das equações 5 à 8 temos dois casos a considerar:

- a) quando o volume de corte é maior que o de aterro  $V_c > V_a$ .

$V_a$  é definido como volume compensado lateralmente esse volume será escavado no corte e depositado no aterro da própria seção, portanto não estando sujeito a transporte no sentido longitudinal da estrada.

$V_c - V_a$  será o volume de corte do trecho, entre seções, que será escavado no corte e transportado para um aterro conveniente, estando portanto sujeito a transporte longitudinal.

Nesse caso o trecho poderá ser considerado como um trecho normal de corte com volume  $V = V_c - V_a$  sujeito à transporte longitudinal. O volume  $\bar{V} = V_a$ , compensado lateralmente deverá ser computado separadamente por não estar sujeito à transporte longitudinal.

- b) quando o volume de aterro é maior que o volume de corte  $V_a > V_c$

Analogamente ao caso "a" teremos:

$V_c$  volume compensado lateralmente  $\bar{V} = V_c$

$V = V_A - V_c$  volume de aterro do trecho com transporte longitudinal.

Em resumo: para os dois casos a e b o volume  $V$  compensado lateralmente será sempre o menor dos volumes  $V_A$  ou  $V_c$  e o volume sujeito à transporte longitudinal será sempre a diferença entre o maior e o menor volume.

### 3. COMPENSAÇÃO DE VOLUMES

O volumes  $V$  (volume compensado lateral) será transportados dos cortes para os aterros no próprio trecho e não será considerado na compensação longitudinal da estrada.

Os demais volumes serão escavados nos cortes, transportados e aplicados nos aterros, quando os materiais de corte servirem para a execução dos aterros. Quando isso não ocorrer os materiais de corte serão escavados e transportados para local conveniente, fora da estrada, em uma operação definida como bota-fora.

A operação de transporte dos materiais dos cortes para os aterros será denominada "compensação longitudinal de volumes" ou simplesmente compensação de volumes.

Se não houver uma compensação total de volumes, isto é, se os volumes totais de corte forem diferentes dos volumes totais de aterro sobrar terra quando  $V_c \text{ total} > V_A \text{ total}$  ou faltará terra quando  $V_A \text{ total} > V_c \text{ total}$ .

No primeiro caso o excesso de terra escavada deverá ser retirado para fora da estrada, transportado e depositados em local conveniente, numa operação de bota-fora.

No segundo caso o material faltante para os aterros deverá ser escavado, em local conveniente, transportado e depositado nos aterros em uma operação denominada empréstimo.

Podem ocorrer casos em que, mesmo sendo os volumes de corte iguais aos de aterro, as distância de transportes dos cortes para os aterros seja muito grande, ou as condições de transporte sejam desfavoráveis, consequentemente criando um transporte de alto custo.

Nesses casos pode ser mais econômico fazer um bota-fora nos cortes e empréstimo para a execução dos aterros.

A análise desses casos deve basear-se nos custos de escavações e transporte de materiais escavados, ficando a decisão de transportar ou não o material associada a solução de menor custo.

Custo de compensação dos volumes = custo de escavação + custo do transporte

Custo de não compensação = custo escavação + custo do transporte para bota-fora + custo de escavação do material de empréstimo + custo de transporte do empréstimo.

#### 4. CALCULOS DOS VOLUMES ACUMULADOS

Inicialmente vamos estabelecer uma convenção para a medida dos volumes, definindo como positiva a medida dos volumes de corte: + VC e negativa a medida dos volumes de aterro: - VA.

Os volumes de cortes são calculados pela medida geométrica do volume natural de solo a ser escavado. Esse material transportado e aplicado nos aterros sofrerá um processo de compactação, necessário para garantir a estabilidade dos aterros, que fará com que os materiais aplicados nos aterros tenham, geralmente, uma densidade maior que a densidade natural. Isso significa que quando o material de corte é aplicado no aterro ele sofre uma redução de volume, devida à compactação. Essa diminuição de volume é denominada redução:

$$R = \left( \frac{V_N - V_R}{V_R} \right) \times 100 \quad V_N - V_R = \frac{R \cdot V_R}{100} \quad (9)$$

onde:  $R$  = redução (%)  $V_N = V_R + \frac{R}{100} \cdot V_R \therefore V_N = V_R \left( 1 + \frac{R}{100} \right)$   
 $V_N$  = volume natural no corte (antes da escavação)  
 $V_R$  = volume reduzido no aterro (depois da compactação)

O valor de  $R$  depende do tipo de solo, densidade natural e adensamento nos cortes e grau de compactação dos aterros. Da equação (9) temos:

$$V_N = \frac{1}{1-R} V_R \quad (10)$$

A relação  $1/1-R$  é denominada fator de redução  $fr$  ou coeficiente de redução, logo

$$V_N = fr \cdot V_R \quad (11)$$

Assim para que os volumes geométricos dos aterros possam ser compensados pelos volumes geométricos de corte, teremos que corrigir os volumes de aterro com o fator de redução de forma a garantir que um certo volume de corte seja suficiente para executar um determinado aterro.

A tabela 1 fornece valores estimativos do fator de redução para solos comuns.

Esse fator pode não ser constante ao longo da estrada.

TABELA 1

MATERIAL	$f_r$
Areia	1.05
Solo comum	1.1 à 1.2
Solo argiloso	1.1 à 1.2

Define-se como volume corrigido dos aterros o produto entre o volume geométrico do aterro (calculado a partir das seções transversais) e o fator de redução.

Para efeito de compensação entre cortes e aterros o volume corrigido dos aterros corresponde a mesma quantidade de terra que o volume geométrico dos cortes.

Denomina-se volume acumulado de uma estrada a soma algébrica de seus cortes e aterros.

Um processo prático para obtenção dos volumes acumulados consiste no preenchimento de uma tabela como a TAB.2 que pode ser preenchida manualmente ou com o uso de programas de terraplenagem apropriados.

#### Esclarecimento sobre a tabela 2

- A primeira coluna: ESTACAS será preenchida com as estacas dos pontos onde foram levantadas seções transversais: normalmente nas estacas inteiras do traçado, estacas fracionárias quando o terreno é muito irregular, estacas dos PP quando estes foram previamente estimados. Quando não são levantadas seções transversais nos PP pode-se considerar que nesses pontos as áreas de corte e aterro sejam zero sem a introdução de erros apreciáveis.

- Nas segunda e terceira colunas são colocadas as áreas de corte e aterro respectivamente medidas nas seções correspondentes em  $m^2$

- Na quarta coluna são colocados os volumes de corte calculados por uma das equações : 1, 2, 5 ou 7, conforme o caso, em  $m^3$

- Analogamente na quinta coluna são colocados os volumes de aterro calculados com o uso das equações 1,2,6 ou 8, em  $m^3$

- A sexta coluna: Aterro corrigido é obtida pelo produto da 4ª coluna anterior pelo fator de redução escolhido:  
 $V'_A = V_A \times fr$

- Na sétima coluna são colocados os volumes compensados lateralmente (que não estão sujeitos a transporte longitudinal):

$$V'_A \text{ quando } V_C > V'_A \quad \text{ou} \quad V_C \text{ quando } V'_A > V_C$$

Na oitava e nona colunas são colocados os volumes de corte e aterro respectivamente que estarão sujeitos ao transporte longitudinal e que portanto irão fazer a compensação entre cortes e aterros.

$$V_{TC} = V_C - V'_A \text{ qdo } V_C > V'_A \text{ e } V_{TA} = V'_A - V_C \text{ qdo } V'_A > V_C$$

A última coluna fornecerá o volume acumulado da estrada, será obtida pela soma algébrica acumulada dos volumes das duas colunas anteriores.

## 5. DIAGRAMA DE MASSAS

Diagrama de massas ou <sup>1</sup> método de Bruckner é o melhor recurso existente para o <sup>1</sup> estudo da compensação de terra entre cortes e <sup>2</sup> aterros, <sup>2</sup> programação de bota-foras e/ou empréstimos e <sup>3</sup> programação do equipamento necessário para a execução da terraplenagem.

Os dados obtidos do diagrama de massas são de grande importância para a programação dos serviços mas devem ser considerados unicamente como indicativos do trabalho a ser realizado, e os valores que podem ser obtidos do diagrama como aproximações da realidade, mesmo quando foram considerados no diagrama todas as condições específicas da obra.

O diagrama é baseado em hipóteses que nem sempre correspondem à realidade mas são suficientes para o objetivo a que se destinam.

Por exemplo: o diagrama é obtido partindo-se do princípio de que os cortes e aterros serão executados na direção longitudinal da estrada, enquanto que na realidade os cortes são executados de cima para baixo e os aterros de baixo para cima; as distâncias de transporte são consideradas lineares enquanto na realidade as estradas de

serviço por onde o material é transportado são muitas vezes bastante sinuosas. Com todos esses problemas o diagrama de massas ainda é um processo bastante preciso e confiável.

TABELA 2

## TABELAS DE VOLUMES ACUMULADOS

(1)	ÁREA (m <sup>2</sup> )		VOLUME (m <sup>3</sup> )						(10)	
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)		
estaca	corde	aterro	corde	aterro	aterro corrig.	compens. transv.	su. transp. long.	corde	aterro	acumulado
			(+)	(-)	(-)		(+)	(-)		
0	10,15	17,15								
1	27,50	6,00	376,50	231,50	254,65	254,65	121,85			121,85
2	78,98	-	1064,80	60,00	66,00	66,00	998,80			1120,65
3	63,10	-	1420,80	-	-	-	1420,80			2541,45
4	35,65	3,25	987,50	32,50	37,75	37,75	949,75			3491,20
4+8.60	9,10	12,95	447,50	162,00	178,20	178,20	269,30			3760,50
5	-	65,10	91,00	780,50	858,55	91,00		767,55		2992,95
6	-	65,50		1306,00	1436,60	-		1436,60		1556,35
7	-	104,44		1699,40	1869,34	-		1869,34		-312,99
8	-	48,02		1524,60	1677,06	-		1677,06		-1990,05
9	6,25	25,65	62,50	736,70	810,37	62,50		747,87		-2737,92
9+5.43	2,62	2,80	88,70	284,50	312,95	88,70		224,25		-2962,17

$$\text{TOTAL } \bar{V} = 778,80 \text{ m}^2$$

O diagrama de massas é a representação gráfica em escala conveniente dos volumes acumulados.

Normalmente a escala horizontal do diagrama é a mesma escala do perfil longitudinal, de forma que o desenho

permita uma correspondência biunívoca fácil entre perfil e diagrama e a escala vertical é escolhida em função dos volumes máximos de corte e aterro, de forma a gerar um desenho sem descontinuidades suficientemente ampliado para permitir a avaliação de volumes e distâncias com precisão satisfatória.

A figura 7 mostra o perfil longitudinal de um trecho de estrada e o diagrama correspondente.

## PROPRIEDADES DO DIAGRAMA

- a) todo trecho ascendente do diagrama corresponde a um trecho de corte
- b) todo trecho descendente do diagrama corresponde a um trecho de aterro
- c) a inclinação das linhas do diagrama está relacionada com a magnitude dos volumes, rampas de grande inclinação indicam grandes volumes
- d) Os pontos extremos do diagrama correspondem aos pontos de passagem (PP) - Pontos de máximo correspondem à passagem de corte para aterro - pontos de mínimo correspondem à passagem de aterro para corte.
- e) A diferença de ordenadas entre dois pontos do diagrama (EXP. pontos CD fig. 7) mede o volume de terra entre esses pontos.  $V_C > V_A \text{ ou } V_A > V_C$   $\Delta V$
- f) Qualquer horizontal traçada sobre o diagrama (EXP AB da fig.7) determina trecho de volumes compensados, isto é, volume de corte = volume de aterro corrigido, a medida desse volume é dada pela diferença de ordenadas entre o ponto máximo ou mínimo do trecho compensado e a linha horizontal de compensação.
- g) A posição da onda do diagrama em relação a linha de compensação indica a direção do movimento de terra, ondas positivas, isto é, linha do diagrama acima da linha de compensação, indica transporte de terra no sentido do estaqueamento da estrada e ondas negativas, isto é, linha do diagrama abaixo da linha de compensação, indica transporte no sentido contrário ao estaqueamento da estrada.

## 6. MOMENTO DE TRANSPORTE

As distâncias a que os materiais dos cortes serão transportados para a formação dos aterros é um dos fatores que mais influem no custo do movimento de terra.

Quando é executado um transporte de solo de um corte para um aterro as distâncias de transporte vão se alterando a cada viagem, e seria obviamente muito trabalhoso medir as distâncias e condições de cada viagem de terra, assim é necessário usar algum método que permita a determinação de distâncias e condições médias que possam estimar o trabalho necessário para o transporte entre trechos compensados de corte e aterro.

O método mais empregado para estimativa das distâncias médias de transporte entre trechos compensados é o método do diagrama de massas.

Define-se como momento de transporte o produto dos volumes transportados multiplicados pela distância de transporte. Usualmente o momento de transporte é medido nas unidades  $m^3 \text{ dam}$  ou  $m^3 \text{ km}$ .

Assim o momento de transporte de um trecho de corte e aterro compensado será:

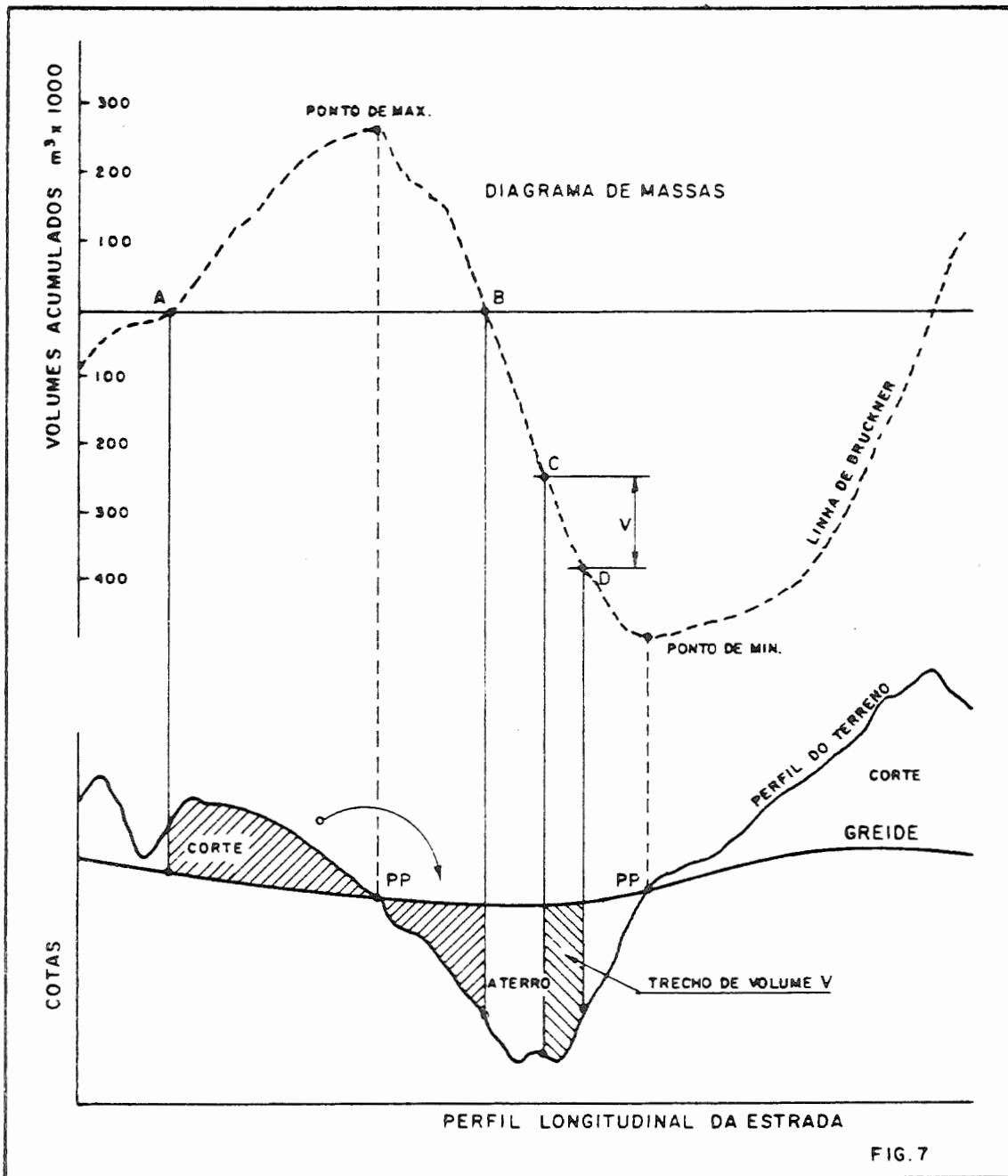
$$M = V \times d_m$$

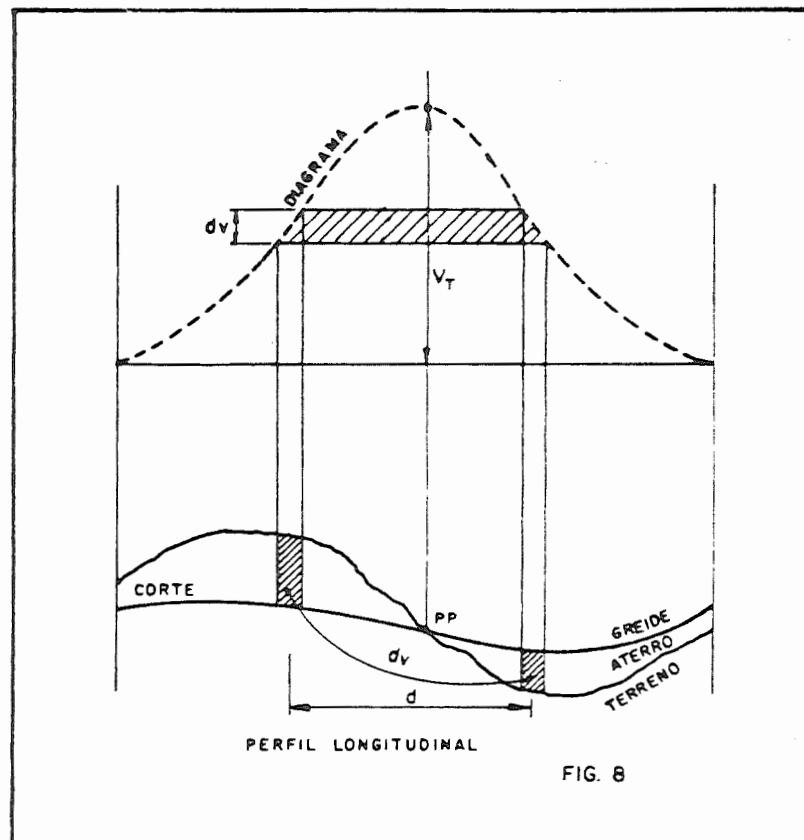
onde:  $M$  = momento de transporte do trecho ( $m^3 \text{ dam}$  ou  $m^3 \text{ km}$ )  
 $V$  = volume natural de solo ( $m^3$ )  
 $d_m$  = distância média de transporte (dam ou km)

A distância média de transporte  $d_m$  deverá ser igual a distância entre os centros de massa dos trechos de corte e aterro compensados.

Vamos imaginar um trecho de corte e aterro de uma estrada, compensados, isto é, volume geométrico do corte igual ao volume corrigido do aterro (fig. 8).

Todo o material do trecho em corte será transportado para o trecho em aterro.





Consideremos um elemento do corte de volume  $dv$  que será transportado para o aterro a uma distância  $d$ . O momento de transporte desse elemento será:

$$M_i = dv \times d$$

O valor  $M_i$  corresponde a medida da área hachurada no diagrama de massas (fig.8).

Assim verificamos que o momento total  $M_T$  para a execução de todo o movimento de terra da figura será :

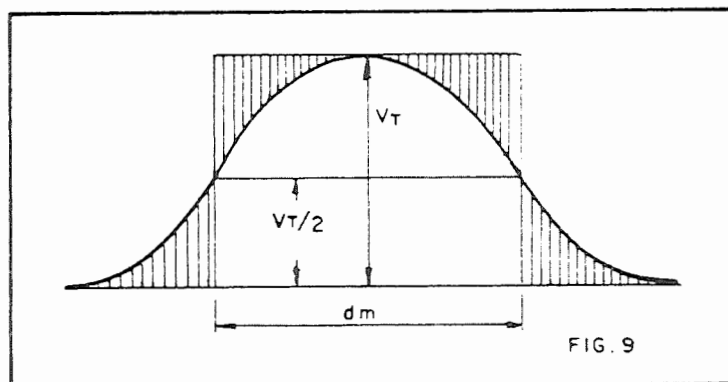
$$M_T = \sum M_i = V_T \times d_m$$

onde:  $V_T$  = volume do trecho  
 $d_m$  = distância média de transporte do trecho

Sendo  $M_T = \sum M_i$ , vemos que  $M_T$  corresponde à medida da área total do diagrama.

Logo podemos calcular  $M_T$  com o uso de programas de computação ou medindo a área do diagrama como uso de integração gráfica, planimetro ou qualquer outro processo conveniente.

O método de Bruckner propõe um processo simplificado para medida dessa área tomando como hipótese o fato de que as ondas do diagrama podem geralmente ser aproximadas a senoides.



Sendo a onda do diagrama uma senoide, as áreas hachuradas da figura 9 são iguais e a área da onda do diagrama pode ser medida como a área de um retângulo de lados  $v_t$  e  $d_m$ .

$$M_T = V_T \times d_m$$

O processo fornece meios simplificados para o cálculo de  $d_m$ : basta tomar meia altura da onda ( $V_T/2$ ) e traçar a horizontal, nessa altura, marcando os pontos onde a horizontal corta o diagrama. A distância  $d_m$  será a distância entre esses pontos medida na escala horizontal do desenho.

✂ Como a linha do diagrama mede volumes acumulados o volume de um corte ou um aterro, ou mesmo o volume de um trecho de corte ou aterro é medido pela diferença de ordenadas do diagrama (propriedade e do diagrama de massas). Logo o ponto da linha do diagrama que corresponde ao volume  $V/2$  corresponde ao centro de massa do trecho considerado.

## 7. LINHA DE COMPENSAÇÃO

Linha de compensação é toda linha horizontal, traçada sobre o diagrama de massas que corte pelo menos uma onda. Todas as ondas do diagrama deverão ser cortadas, ou pelo menos tangenciadas, por uma e só uma linha de compensação.

Para a escolha das linhas de compensação mais adequadas em um serviço de terraplenagem é necessário primeiramente determinar a máxima distância econômica de transporte, isto é, uma distância a partir de qual é mais econômico fazer empréstimos e bota-fora, do que transportar o solo dos cortes para os aterros.

A distância econômica de transporte, para cada obra, será função dos custos de escavação e transporte.

CUSTO DE COMPENSAÇÃO: (transporte do solo dos cortes para os aterros) =

$$C_1 = C_e \times V + C_t \times V \times d_m$$

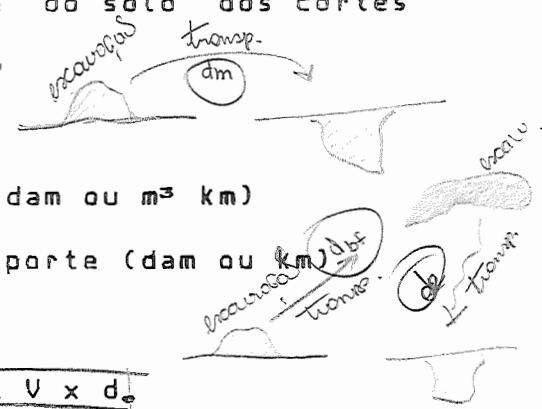
onde:

$C_e$  = custo de escavação ( $m^3$ )

$C_t$  = custo de transporte ( $m^3$  dam ou  $m^3$  km)

$V$  = volume de escavação ( $m^3$ )

$d_m$  = distância média de transporte (dam ou km)



CUSTO DE BOTA-FORA E EMPRÉSTIMO

$$C_2 = 2C_e \times V + C_t \times V \times d_{b.f.} + C_e \times V \times d_e$$

onde:

$d_{b.f.}$  = distância do bota-fora (dam ou km)

$d_e$  = distância de empréstimo (dam ou km)

Distância econômica de transporte é uma distância  $d_{o.e.}$  para a qual  $C_1 = C_2$ .

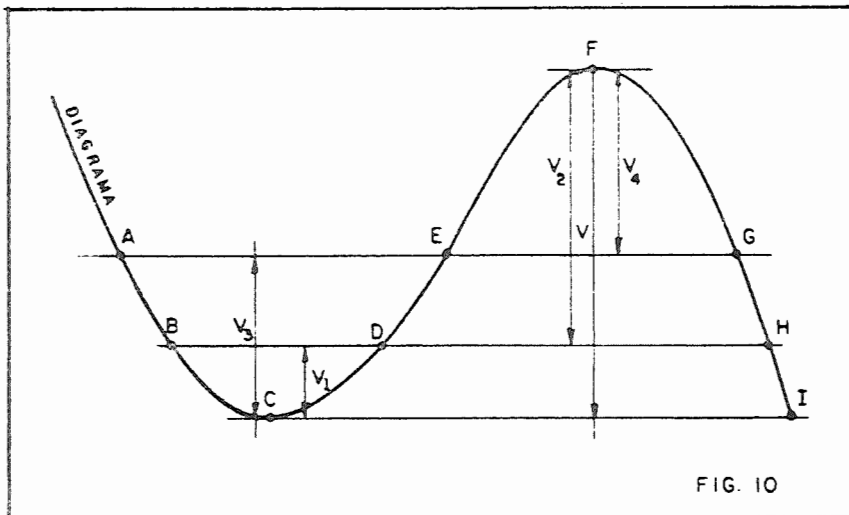
Conhecido  $d_e$  e  $d_{b.f.}$  temos:  $d_m = d_{o.e.}$

$$d_{o.e.} = \frac{C_e}{C_t} + d_e + d_{b.f.} = \frac{C_e}{C_t} + d_e + d_{b.f.}$$

Para determinação de linhas econômicas de compensação vamos primeiramente analisar o caso de um diagrama de massas composto por apenas duas ondas (fig. 10).

Vimos que a área compreendida entre a linha de compensação e a onda do diagrama corresponde à medida do momento de transporte. Para termos uma solução econômica devemos minimizar os momentos de transporte, isto é, reduzir ao mínimo as áreas entre a linha de compensação e a onda do diagrama.

No caso de diagrama como o da figura 10 a solução mais econômica é dada pela linha de compensação que corta o diagrama formando segmentos iguais (desde que esses segmentos levem as distâncias médias de transporte menores que a distância econômica de transporte). No diagrama da figura 10 a linha de compensação mais econômica é a linha A E G com  $A_E = E_G$ .



Se a linha de compensação adotada fosse CI o volume compensado seria  $V$  e o momento de transporte seria a área da figura entre os pontos C, F, I.

Se a linha adotada fosse BDH com  $BD < DH$  o volume compensado também seria  $V$ :  $V_1 + V_2 = V$  e o momento de transporte seria a soma das áreas: B, C, D e D, F, H, menor que a área C, F, I, pois a área B, C, D é menor que a área C, D, H, I.

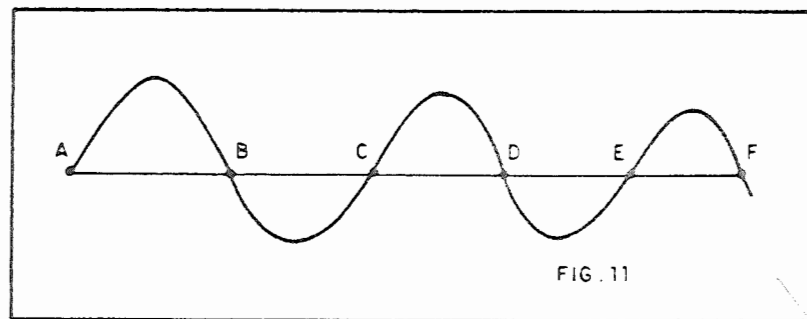
Usando o mesmo raciocínio vemos que a medida que a linha B, D, H for subindo o aumento da área da primeira onda é menor que a redução da área da segunda onda, até atingir a linha A, E, G.

A partir desse ponto acontece o contrário, logo a linha A, E, G leva a solução de momento de transporte mínimo.

Generalizando, sempre que uma linha de compensação corta várias ondas consecutivas a posição mais econômica é a que acarreta somatória dos segmentos da linha com onda positiva igual a somatória dos segmentos da linha com onda negativa.

No exemplo da figura 11 teríamos para a linha de compensação mais econômica:

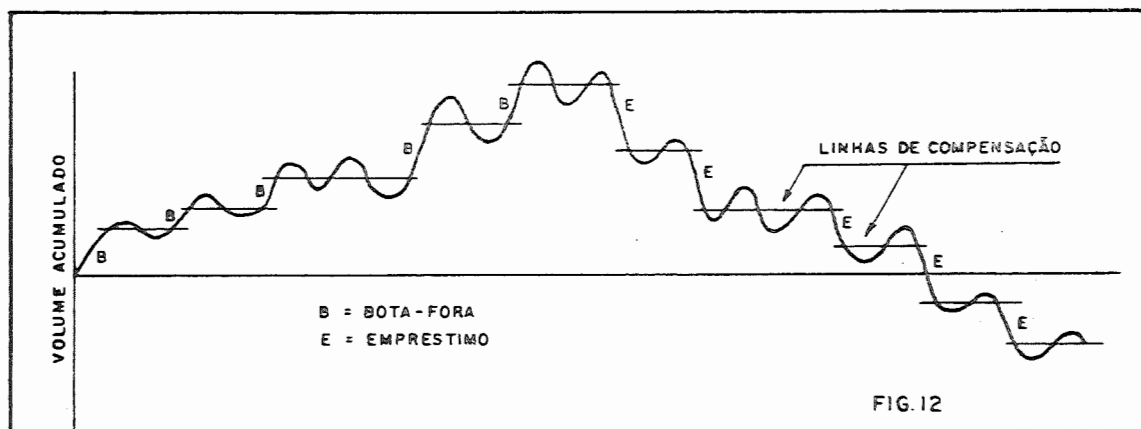
$$AB + CD + EF = BC + DE$$



Um caso frequente no diagrama de massas é quando o diagrama apresenta uma sequência de ondas subindo ou descendo. Nesse caso também as linhas de compensação devem ir subindo ou descendo, procurando a compensação mais econômica por trechos. Uma solução desse tipo da origem a muitos bota-foras e/ou empréstimos. (fig.12)

Quando existem varias linhas de compensação, em ordenadas diferentes (figura 12) a diferença de ordenadas entre duas linhas corresponde a um volume de bota-fora ou empréstimo conforme a linha de compensação situe-se acima ou abaixo da linha anterior.

Baixando-se perpendiculares pelos pontos finais de uma linha e iniciais da linha seguinte teremos a localização do bota-fora ou empréstimo, no perfil.

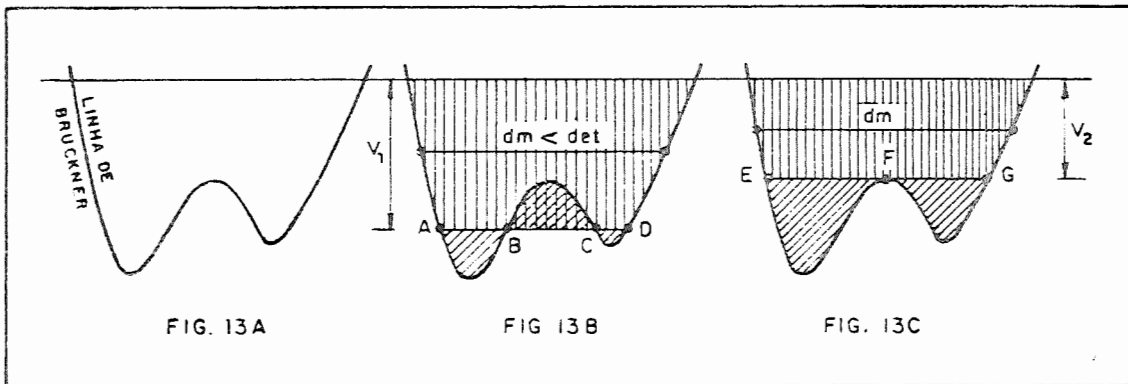


Outro caso particular a ser considerado, que também ocorre com frequência é o caso em que uma onda maior contém ondas menores (figura 13A), as ondas menores serão previamente compensadas, de forma econômica, e posteriormente será feita a compensação na onda maior. Nesses casos temos duas situações a considerar:

a) quando os materiais de corte da onda maior, não compensados nas ondas menores, for transportado para o aterro da onda maior (distância de transporte menor que  $d_{e,t}$ , distância econômica). Se adotarmos para as ondas menores a linha de compensação mais econômica, como definido no item 7, isto é, a linha de compensação para a qual  $AB + CD = BC$  o momento de transporte das ondas menores será igual a área com hachuramento inclinado da figura 13A e o momento de transporte para o saldo de material da onda maior:  $M_m = V_1 \times d_m$  será igual à área com hachuramento vertical da figura 13A.

Se adotarmos a linha de compensação E, F, G, para as ondas menores, (linha tangente a crista da onda), figura 13B o momento de transporte das ondas menores será igual a área de hachuramento indicado na figura 13B e o momento de transporte do volume  $V_2$  da onda maior será igual a área com hachuramento vertical da figura 13B.

Basta observar as figuras 13A e 13B para constatar que a solução da figura 13B (linha de compensação E, F, G) é mais econômica.



b) quando o material da onda do corte maior, não compensado nas ondas menores, não for transportado para o aterro, isto é  $d_m > d_{e,t}$ , e a solução mais econômica for um empréstimo e um bota-fora de volumes  $V_1$ , a solução mais econômica para a compensação das ondas menores será a linha de compensação A, B, C, D conforme demonstrado no item 7

Quando a distância de transporte NÃO for a econômica e o empréstimo e/ou bota fora for a solução, neste caso será mais econômico a linha de compensação ser a linha ABCD.

## BIBLIOGRAFIA

1. CARCIENTE, JACOB (1980) - Carretas Estudos y Proyecto. Ediciones Vega S.R.L.
2. SILVEIRA, ARAKEN (1979) - Terraplenagem Notas de Aula EESC-USP