

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE VIAS DE TRANSPORTE E TOPOGRAFIA – STT

# Cálculo de arredondamento de curvas ferroviárias

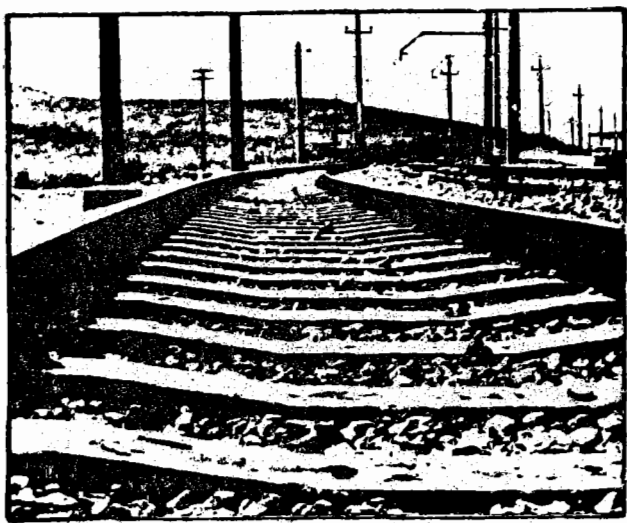
## Notas de Aula

THALES DE LORENA PEIXOTO JÚNIOR

SÃO CARLOS  
1980

15/5802

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE VIAS DE TRANSPORTE E TOPOGRAFIA - STT



CÁLCULO DE ARREDONDAMENTO DE CURVAS FERROVIÁRIAS

NOTAS DE AULA

1980



DEDALUS - Acervo - EESC

PROF. THALES DE LORENA PEIXOTO JÚNIOR

## Introdução

-Estas notas constituem a infraestrutura fundamental da parte de "Arredondamento de Curvas Ferroviárias" dos cursos de ferrovias ministrados pelo Prof.Dr.Thales de Lorena Peixoto Júnior nas EESCUSP, FEL-UNICAMP, IUML, FDTE/EPUSP.

-As críticas construtivas para melhoria destas notas, que o autor Prof.Dr.Thales de Lorena Peixoto Júnior antecipadamente agradece, poderão ser enviadas em seu nome para os seguintes endereços:-

.Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Departamento de Transportes

Avenida Dr Carlos Botelho - 1465 - São Carlos - SP

CEP - 13560

.Faculdade de Engenharia de Limeira - UNICAMP

Departamento de Transportes

Avenida Cônego Manoel Alves - 129 - Caixa Postal 249-456

Limeira - SP

CEP - 13480



S U M Á R I O

- 1- INTRODUÇÃO
- 2- HISTÓRICO
- 3- GENERALIDADES
  - 3.1- Percepção das Curvas em Péssimo Estado
  - 3.2- Periodicidade do Arredondamento
  - 3.3- Deslocamento de linha, em campo
  - 3.4- Medição dos deslocamentos
- 4- CÁLCULO DO ARREDONDAMENTO
- 5- DIAGRAMAS DE CURVA
  - 5.1- Diagrama de flechas medidas ou flechas levantadas ou flechas velhas ou flechas antigas.
- 6- ESTUDOS DAS CURVAS (CÁLCULO DE ARREDONDAMENTO)
  - 6.1- Princípio dos Deslocamentos Proporcionais
  - 6.2- Princípio dos Três Pontos
  - 6.3- Teoria Sumária de Princípio dos Deslocamentos Proporcionais.
    - 6.3.1- Teoria simplificada do Método dos Deslocamentos Proporcionais
  - 6.4- Princípio dos Três Pontos
    - 6.4.1- Teoria Simplificada
  - 6.5- Verificação do Cálculo de arredondamento.
    - 6.5.1- Regra 1 (Princípio dos Deslocamentos Proporcionais).
    - 6.5.2- Regra 2 (Princípio dos Três Pontos).
  - 6.6- Aplicações Práticas do Princípio dos Deslocamentos Proporcionais através do Método das Flechas Novas Projetadas.
    - 6.6.1- Cálculo das Flechas Novas Projetadas
      - a) Experiência
      - b) Diagrama de flechas (EXERCÍCIOS)
      - c) Correções Localizadas (EXERCÍCIO)
  - 6.7- Aplicações Práticas do Princípio dos Três Pontos.
    - 6.7.1- Processo das Marcas Móveis (fichas móveis - Euro Brandão).

6.7.2- Cálculo de Arredondamento por meio de máquinas.  
(Ex. Calculador Múltiplo MATISA).

7- CONSIDERAÇÕES RELATIVAS A SOBRELEVAÇÃO

- 7.1- Escolha da Super elevação nas Estradas de Ferro
- 7.2- Condições Gerais
- 7.3- Super elevação Equilibrada
- 7.4- Super elevação Prática
- 7.5- Fórmulas Empíricas Usadas por Ferrovias para o cálculo de Super elevação.
- 7.6- Taxa de Variação de Super elevação nas Curvas de Transição.
- 7.7- Limites de Super elevação

8- Considerações Finais

ANEXOS " A " :

- A.1. - Tabela com os dados calculados para diversas velocidades
- A.2. - Tabela com os dados obtidos para diversas velocidades
- A.3. - Quadro das flechas em cordas de 20m , correspondentes à sobre elevação teórica para diferentes velocidades .
- A.4. - Tabela em branco utilizada para o cálculo de arredondamento de curvas ferroviárias através do princípio dos deslocamentos proporcionais
- A.5. - Exemplos
- A.6. - Dados para estimativas preliminares
- A.7. - Aparelhos " manuais " para levantamento de flechas e sobre elevação da ex-C.P.E.F.

## 1 - INTRODUÇÃO

O arredondamento de uma curva ferroviária é a operação de relocação da linha, em posição favorável ao deslizamento suave dos trens. Evidentemente, a relocação da linha ferroviária, não se prende somente às curvas, mas também às tangentes, exigindo um constante realinhamento das mesmas, com nivelamento longitudinal e transversal.

Deve-se notar, que esse tipo de problema, é uma característica comum, exclusiva de estradas de ferro. A linha férrea, principalmente nas curvas, sofre grandes esforços transversais, os quais produzem com o tempo, deslocamentos laterais altamente prejudiciais ao traçado ideal da ferrovia. Nas estradas de rodagem, não há deslocamentos do pavimento, em relação à infraestrutura, devido à ligação rígida, existente entre as diversas camadas que integram a superestrutura e infraestrutura de uma rodovia. Em estradas de ferro, a linha se apoia no lastro, não constituindo um sistema rígido; portanto, não absorve totalmente, sem deslocamentos, esforços transversais relativamente maiores que uma faixa média de valores comuns às ferrovias. Esses deslocamentos e esforços, dependem do tipo de linha e do tipo de tráfego, mas sempre aparecem.

Quanto a retificação, pode-se dizer que o realinhamento de tangentes é de fácil execução, podendo ser realizado até sem instrumento algum, por mestre-linha experiente, que orienta a operação, com visadas a olho nú.

A complementação do realinhamento, que exige um nivelamento transversal e longitudinal é executado com aparelhos adequados (nível, régua, esquadro, nível óptico e outros).

O problema principal da relocação da linha férrea em posição adequada, prende-se às curvas, devido à grande dificuldade, senão impossibilidade, de ajustá-las visualmente, isto é, a olho nú. Segue um breve histórico do problema, para que se tenha mais consciência do mesmo.

2 - HISTÓRICO

As curvas das primeiras linhas férreas, para baixas velocidades e com muito baixo padrão técnico, eram circulares. Não existiam pois, curvas de concordância (fig. 2.1). A super-elevação se iniciava no ponto A da tangente, pouco antes do P.C., Essa super-elevação, consistia em se levantar o trilho exterior, paulatinamente, de maneira que na curva, a super-elevação era a desejada. Com essa solução teríamos quatro pontos apresentando desconforto total:- em A, P.C., P.T. e B.

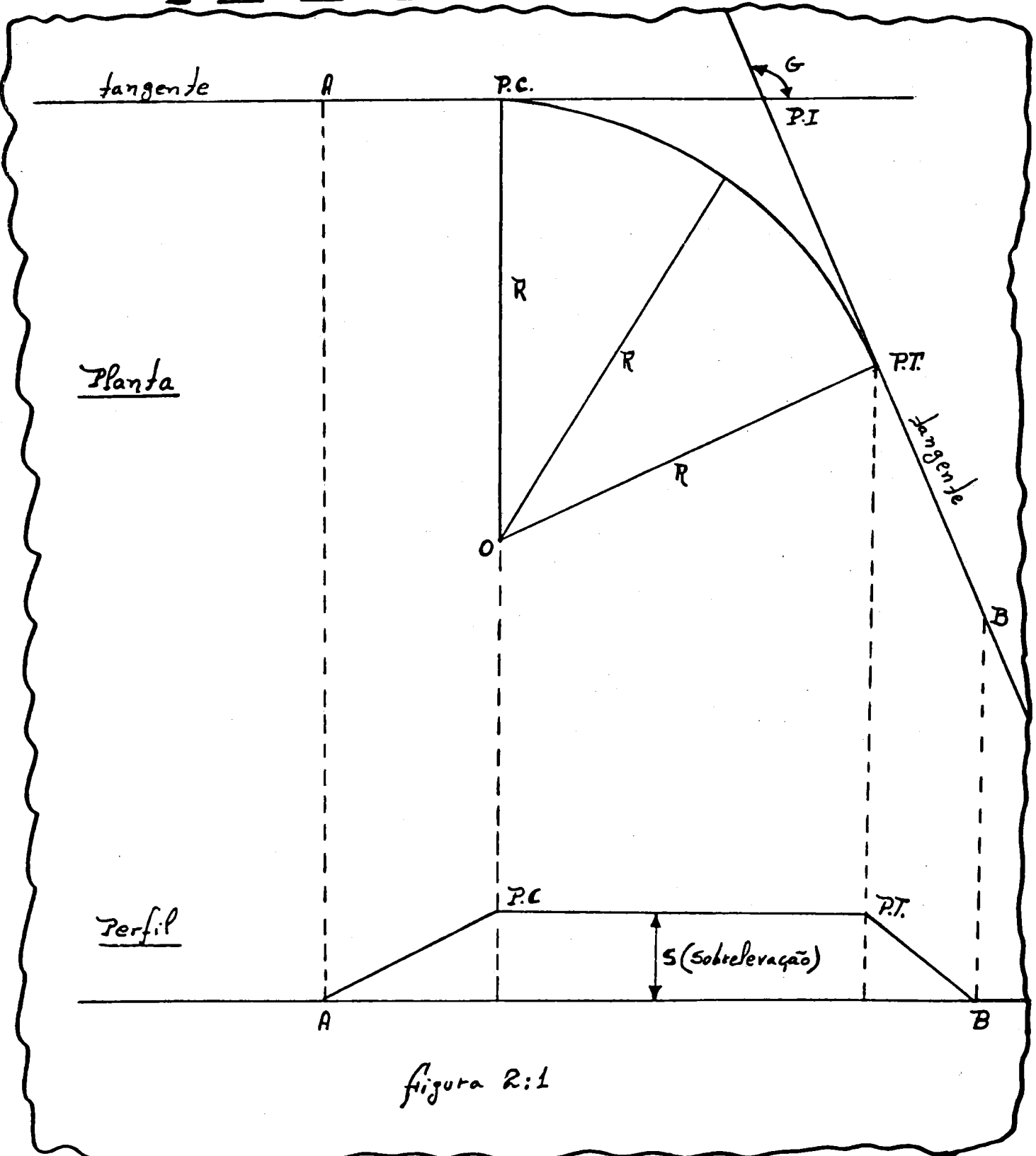


figura 2:1

Também nas ligações  $\overline{A,PC}$  e  $\overline{PT,B}$  existem condições contínuas de sensação de desconforto devido à inclinação -- transversal do trem ter sido efetuada em tangente. Os solavancos em A e B (desconforto vertical) seriam devido a diferença de nível introduzida gradualmente entre os trilhos (Perfil) e os solavancos em P.E. e P.T. (desconforto horizontal) seriam devido ao início da curva (Planta). A e B seriam pontos de desconforto, que se notariam -- num plano vertical. P.C. e P.T. seriam pontos de desconforto, que se notariam num plano horizontal.

Para se evitar esses pontos críticos, havia necessidade de se executar o "amaciamento" da curva, velha especialidade dos experientes mestres de linha. Esse "amaciamento", nada mais era se não, a introdução imperfeita de uma concordância entre a tangente e a parte circular.

Hoje em dia, praticamente todas as linhas possuem concordância em suas curvas, e são assentadas de acordo com projetos -- que levam em consideração todos os requisitos de conforto e segurança, para uma determinada velocidade de projeto. Nas condições atuais o conforto dos passageiros exige condições de curvatura e superelevação, muito mais rigorosas, do que aquelas que visam apenas a segurança. Portanto, além da curva de concordância, é necessário que se dê uma superelevação adequada, para não submeter o passageiro, a -- uma força horizontal muito grande.

Em relação a esta, já por experiência de diversos países, chega-se a conclusão de que se pode submeter o passageiro, sem desconforto, à uma aceleração horizontal, (além daquela correspon-- dente à componente horizontal da reação normal devido à superelevação), de  $0,65 \text{ m/s}^2$ , aproximadamente. Com isto fica perfeitamente definida a superelevação a ser adotada em cada ponto da curva.

Pode-se pois, em curvas de estradas de ferro, enunciar dois problemas distintos:

- a) Estudo da curva em planta, para se estabelecer, de acordo com a velocidade máxima admitida, quais as curvas mínimas exigidas para transição, e qual o raio mínimo que se pode admitir.



b) Estudada e resolvida a questão anterior, verifica-se qual a sobrelevação a ser adotada para os diversos pontos na curva.

Esses problemas básicos anteriores, são estudados quando na fase de execução do projeto, propriamente dito, e posteriormente, durante a conservação da linha férrea, devido aos deslocamentos constantes que ocorrem na linha.

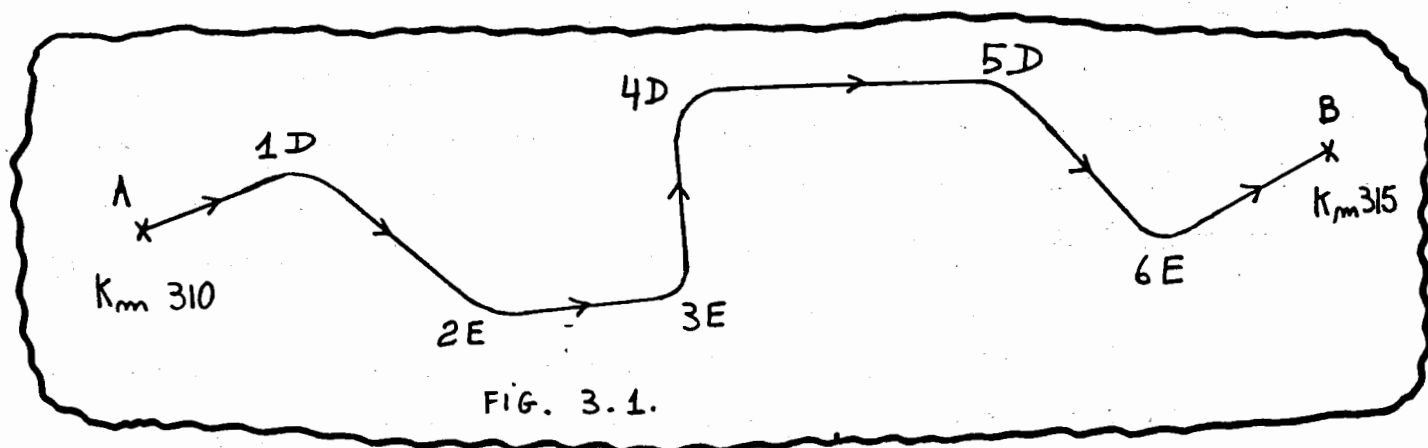
Os itens a seguir (3; 4; 5; 6) tratarão do estudo da curva em planta e os posteriores da sobrelevação.

### 3- G E N E R A L I D A D E S

#### 3.1- PERCEPÇÃO DAS CURVAS EM PÉSSIMO ESTADO

Em uma estrada de ferro, deve sempre haver um controle rigoroso na conservação de sua linha. Esse controle pode ser realizado, utilizando-se aparelhos construídos para detetar todos os defeitos de um trecho. Exemplo disso é o auto-controle da MATISA que indica praticamente, todos os defeitos básicos da linha, pelo registro dos mesmos em gráficos. Com a interpretação desse gráfico, pode-se determinar as correções necessárias no trecho e sua localização na linha corrida. Nesse caso, as curvas em más condições são levantadas e medidas de correção poderão ser tomadas.

Na falta do auto-controle, costuma-se indicar as curvas em más condições, viajando-se no último vagão de uma composição por ser esta a parte mais sensível aos defeitos de uma curva (§). -



Nesses casos a localização da curva na linha corrida é feita utilizando-se da numeração dos postes da ferrovia ou pela contagem da curva na referido trecho.

(§)- Observa-se como complemento, que as curvas em más condições, acarretam bastante desconforto aos passageiros, tornando-se facilmente detetáveis.

Essa contagem é geralmente feita começando-se a numeração das curvas na cidade de kilometragem mais baixa, e indicando-se se a curva é para a direita ou para a esquerda. (fig. 3.1). (§§)

### 3.2 - PERIODICIDADE DO ARREDONDAMENTO

O intervalo de tempo entre dois arredondamentos, de uma mesma curva, varia muito, em função do tipo e qualidade da superestrutura, da densidade de tráfego, dos tipos de trens que utilizam a linha e outros.

Portanto, a maior ou menor facilidade de uma linha de estrada de ferro sofrer deslocamentos transversais, indica praticamente, a periodicidade do arredondamento.

De dados usuais, em condições normais, uma curva é arredondada, com uma periodicidade de 2 a 5 anos. As trocas de dormentes e nivelamentos, devem anteceder ao arredondamento, que se faz posteriormente em conjunto com um rigoroso realinhamento das tangentes.

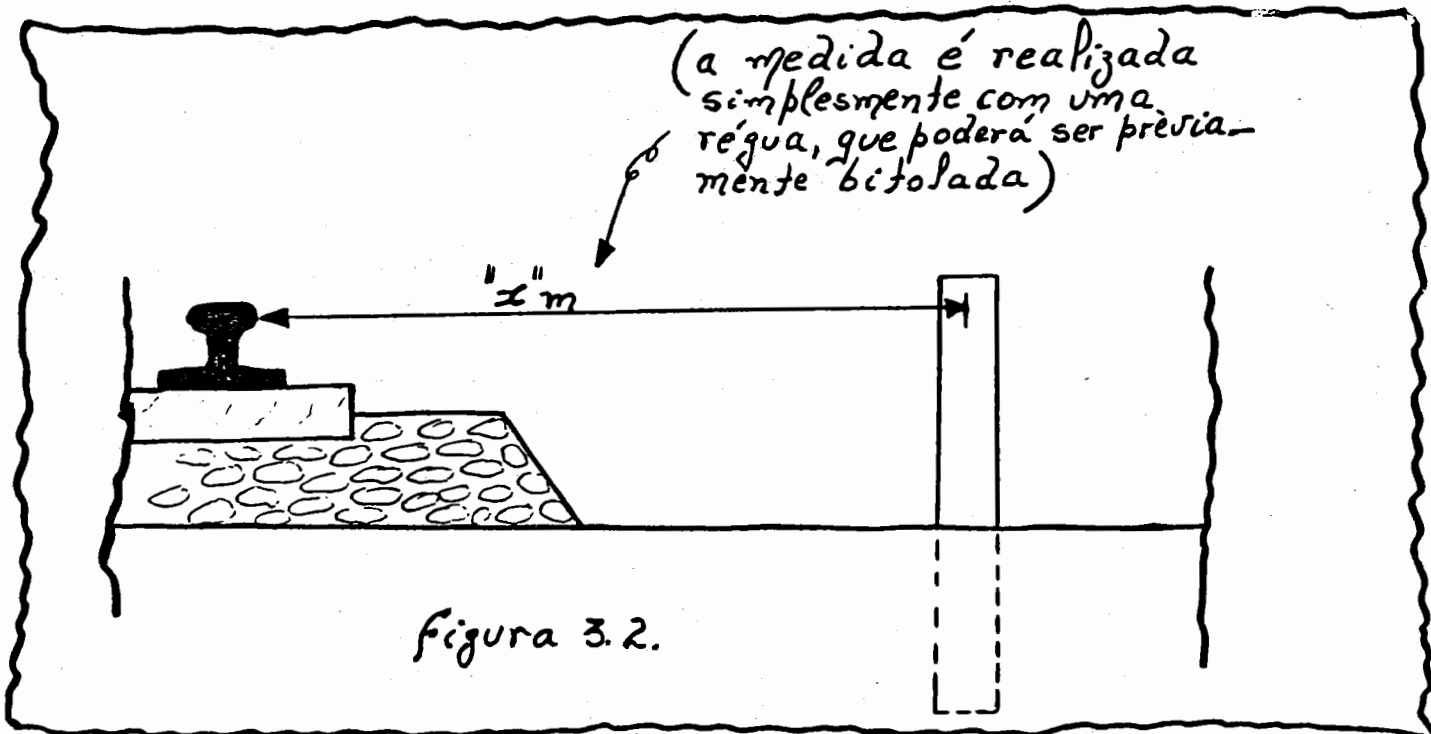
O intervalo entre duas operações de arredondamento da mesma curva, é em geral, o mesmo do relastramento ou limpeza do lastro.

---

(§§)- Um observador, com a costa voltada para a cidade A, assinala a curva à esquerda, quando a composição vira para a esquerda, e curva a direita, quando a composição vira à direita.

### 3.3- DESLOCAMENTO DA LINHA, EM CAMPO

Em condições iniciais, com a linha na posição exata de projeto, posterior ao primeiro cálculo de arredondamento, podem ser estabelecidos marcos fixos, espaçados geralmente de 20 em 20 metros, do lado interno da curva, e todos distantes de " $x$ " m do boleto do trilho interno (fig. 3.2).



Geralmente essa distância é de 0,80 m (ex-C.F.E.F). - quando se nota a irregularidade em curvas com marcos fixos, bastará a operação de recolocá-la na antiga posição, deixando a linha nos pontos correspondentes a cada marco fixo, a " $x$ " m do mesmo. Os trechos entre cada marco, são facilmente arredondados a olho nú, o que completa a operação.

Esse tipo de arredondamento de curvas, com o passar do tempo, não constitui um método rigoroso de colocação de curva ferroviária em sua antiga posição ideal, e muitas ferrovias atuais, preferem fazer um levantamento em campo, executar um cálculo, e recolocar a linha em uma outra posição favorável, próxima da posição primitiva. A utilização de marcos, não constitui de fato, um ponto rigoroso, onde se possa tomar as medidas para reposição da curva em seu lugar primitivo, pois verificou-se que os mesmos tendem a se deslocar, ou mesmo serem "retirados" de sua posição.

Quanto ao deslocamento da linha, propriamente dito, poderá ser feito com macacos de alinhamento, ou macacos comuns de linha. Muito prático, é o deslocamento a alavancas, onde 5 a 6 homens são suficientes para deslocá-la.

Para facilitar o deslocamento, em linhas cujos dormentes são inteiramente encaixados no lastro, as partes deste que exce-dem a parte inferior do dormente, denominados ombros do lastro, devem ser removidas do lado que a linha vai ser deslocada.

3.4- MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

No caso de existirem marcos de referência na curva a ser arredondada, essa medição é feita simplesmente com uma régua -- previamente bitolada. As correções são feitas logo após a verificação de que a linha está fora de posição.

Quando não existem marcos, será necessário fazer um levantamento preliminar das medidas básicas para o cálculo de arredondamento (assunto que será visto mais adiante), executar o cálculo de arredondamento e fazer o deslocamento ou puxamento, em campo. A medição do deslocamento corresponde à correção a introduzir na linha, para que a mesma seja deslocada para uma posição correta, tomando-se como base, a posição da linha que deu origem à determinação das correções, e na ocasião em que se procedeu o levantamento das medidas iniciais. Aliás, entre o levantamento das medidas de campo iniciais, e o deslocamento, não deve transcorrer muito tempo para que o levantamento não se torne obsoleto por fugir da realidade. Isso é devido ao fato de que, uma linha estando em más condições, pode mais facilmente sofrer outros deslocamentos, com a passagem de composições.

Para a medição do puxamento relativo da linha para a nova posição, pode-se usar fichas cravadas na banquetta a uma distância x, conhecida em relação ao trilho interno. O deslocamento ou puxamento para fora ou para dentro é feito somando-se ou subtraindo-se de x, o valor calculado.

Existe também, um aparelho denominado Medidor de Puxamento ou Ripâmetro (Thowmeter; fig. 3 3), que consiste num mostra--

dor com ponteiro e mola suave. Em torno do eixo do ponteiro está - enrolado um fio encerado que termina em argola. Para se usá-lo, acen- ta-se o medidor sobre o lastro, na direção do dormente corresponden- te ao ponto a deslocar; engata-se a argola do medidor, num prego, - colocado no dormente. Registra-se com o ponteiro, o valor da corre- ção e procede-se ao deslocamento da linha até se obter 0 (zero) no mostrador.

Trabalha-se geralmente com 4 a 6 peças. Seu uso é de grande rendimento e pode ser facilmente construído.

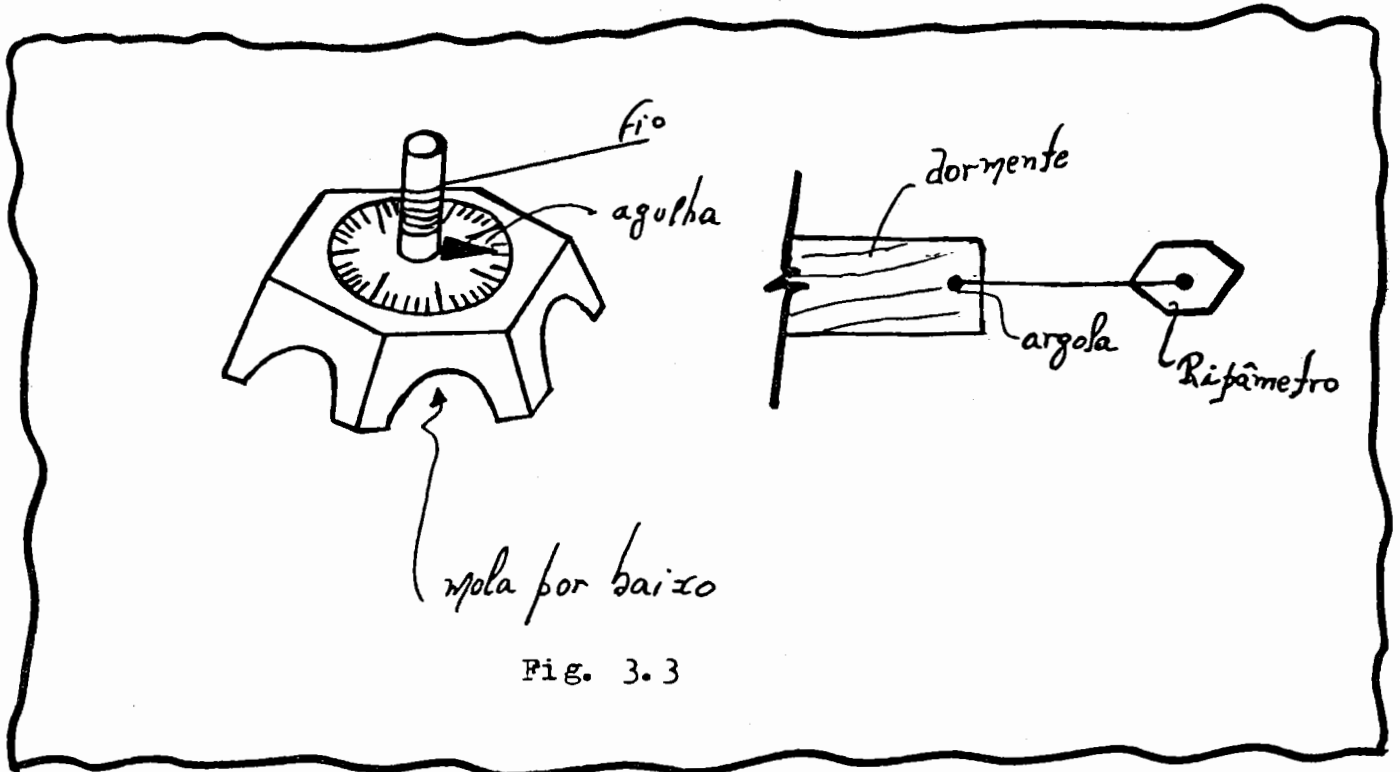


Fig. 3.3

Constatada em uma curva de uma estrada de ferro, condições não favoráveis ao deslocamento das composições, se não existirem marcos fixos ou se estes já não mais tiverem condições para um puxamento ideal, faz-se necessário o arredondamento desta curva.

Uma das maneiras para se determinar os deslocamentos a serem introduzidos nesta curva, é através da variação do valor das flechas, correspondentes a uma corda constante.

Colocando-se as estacas no eixo das abscissas de um gráfico, e os valores das flechas no eixo das ordenadas, obter-se-á o diagrama das flechas que, teoricamente corresponde razoavelmente ao próprio diagrama de curvatura (fig. 4.1).

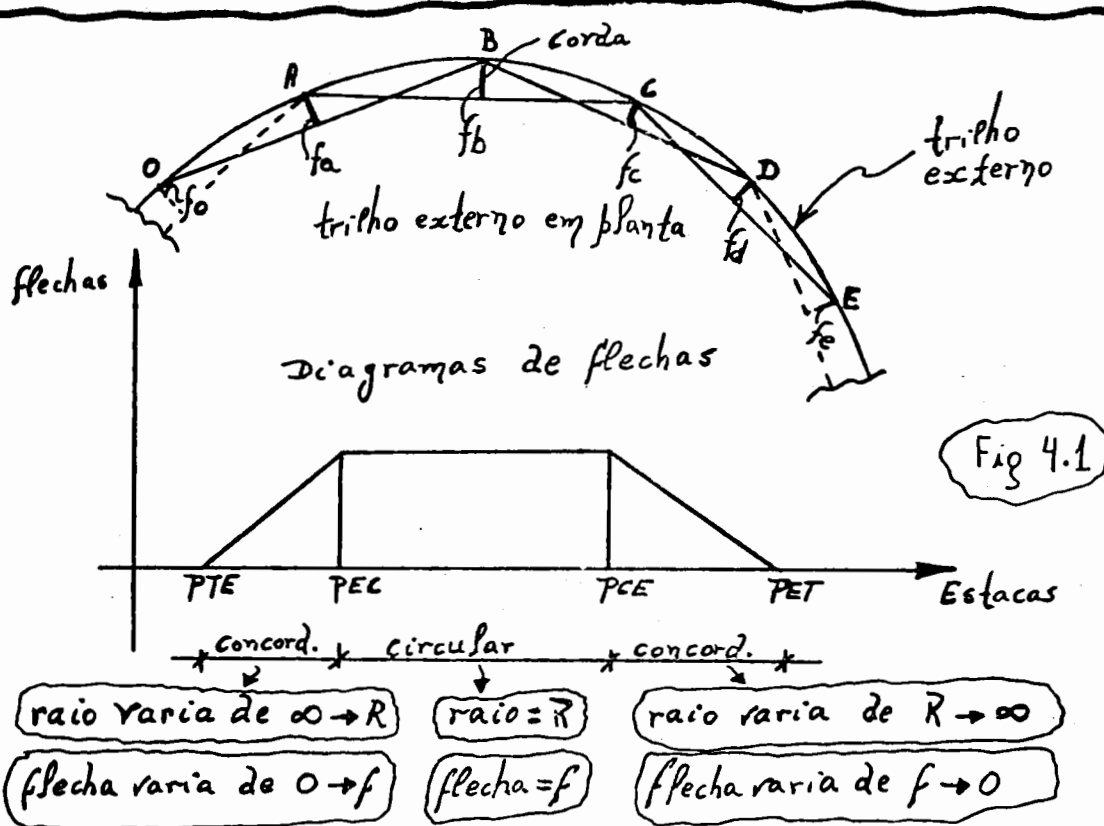
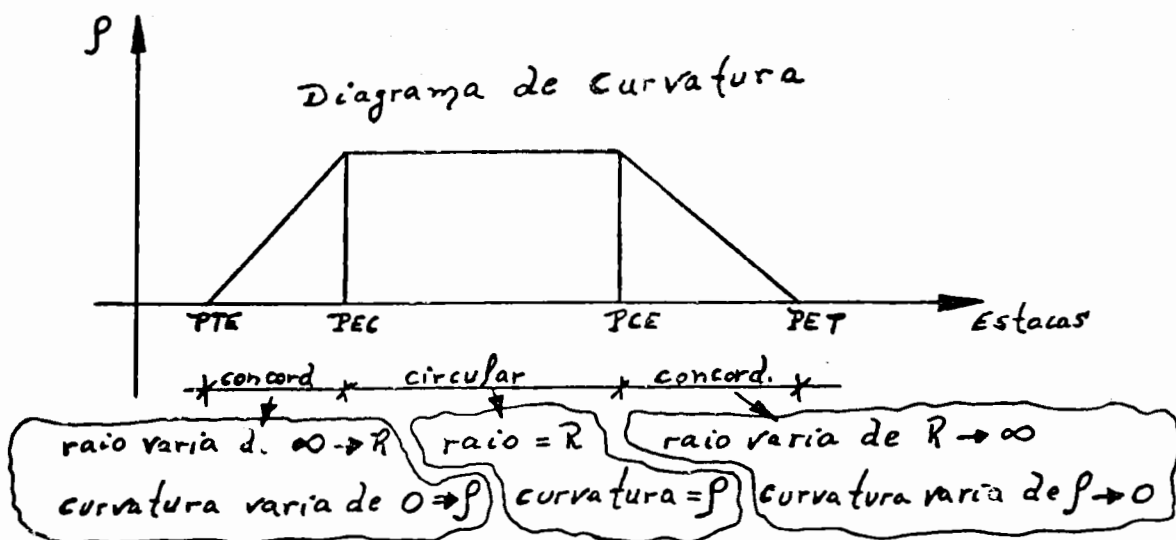
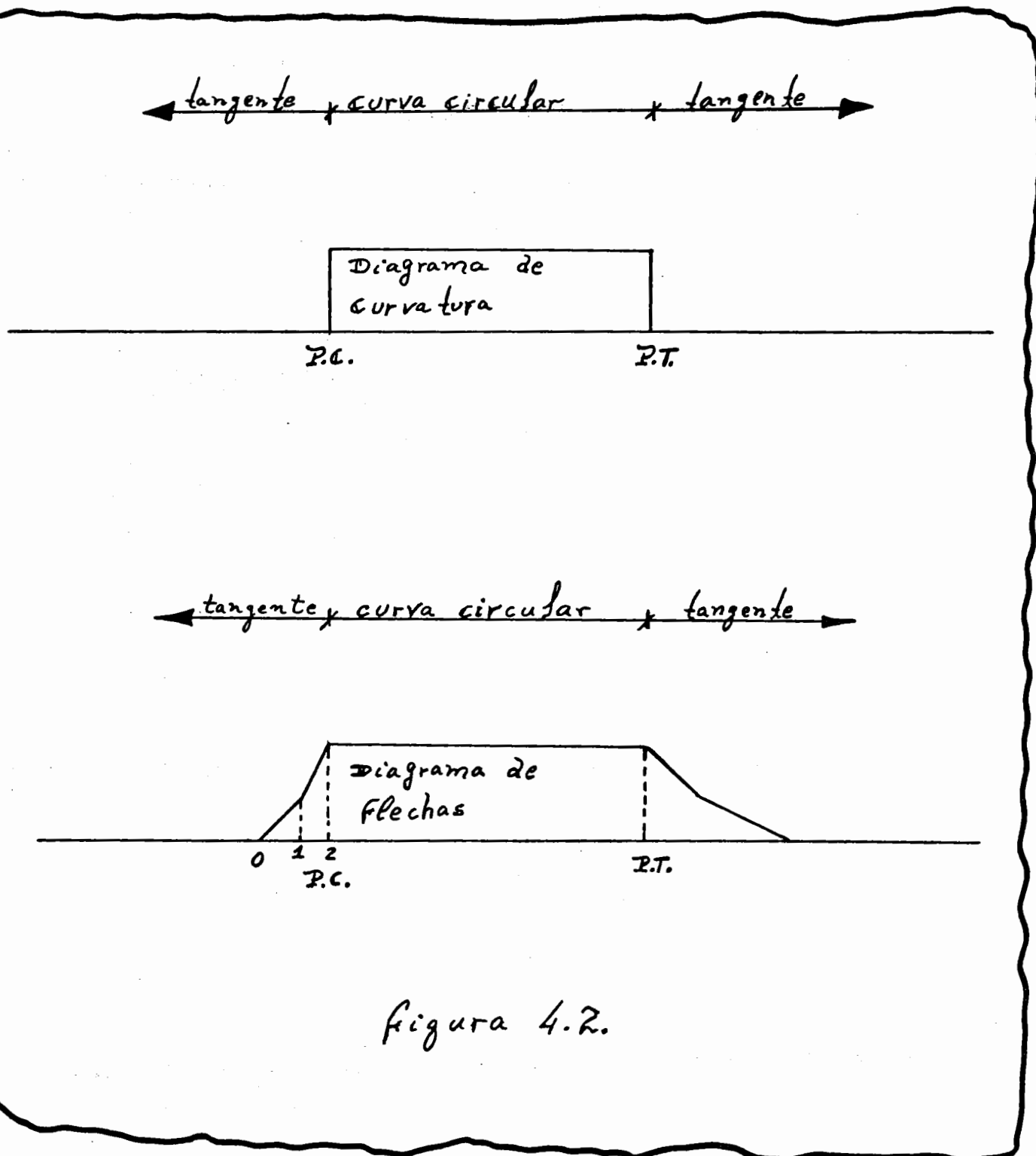


Fig 4.1



Praticamente, poderá haver distorções exageradas entre o diagrama de flechas e o diagrama de curvatura no caso de existência de uma curva circular, sem transição. Isso ocorre justamente devido ao processo de levantamento das flechas em campo e a não coincidência da estaca "0" com o "P.C.", isto é, durante o processo de levantamento das flechas, no início, uma das extremidades da corda se localiza na tangente, e outra na parte circular (fig 4.2)

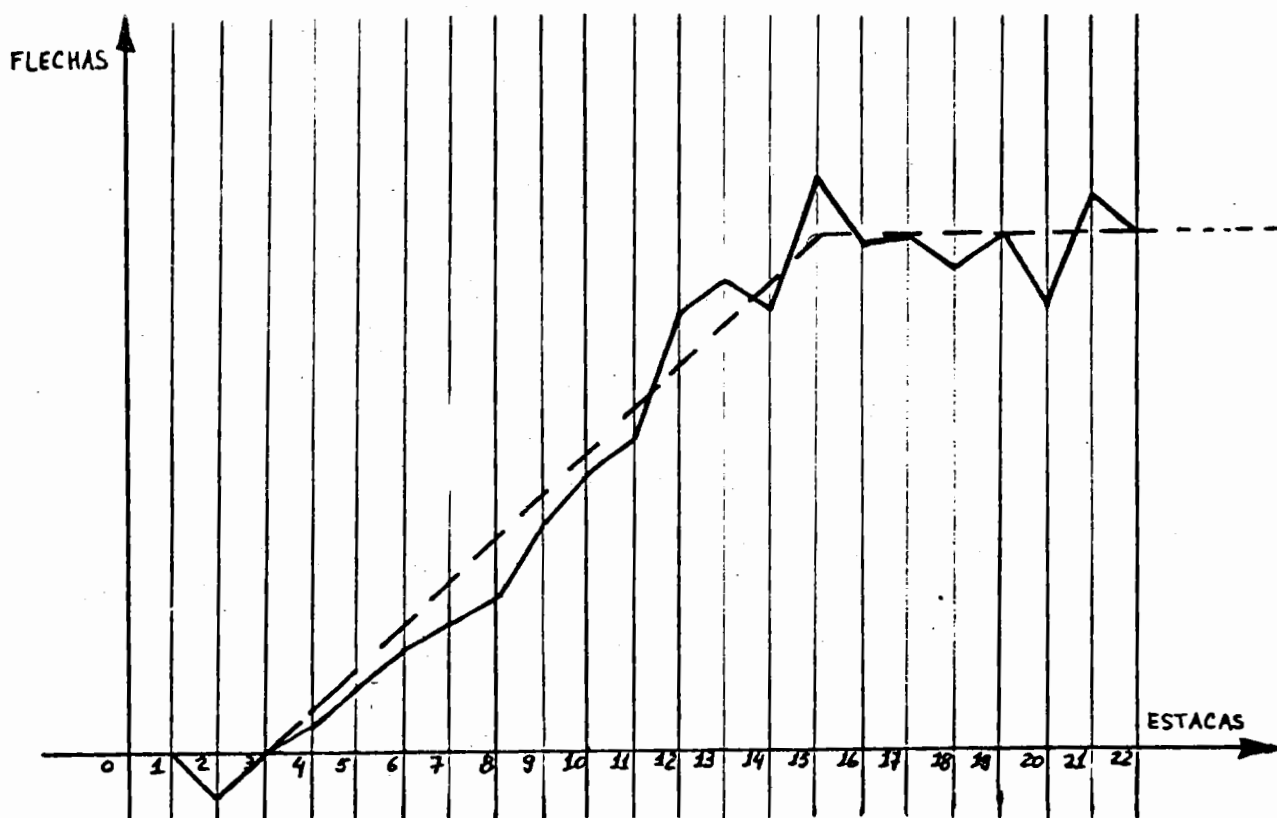




## 5- DIAGRAMAS DE CURVA

### 5.1- DIAGRAMA DE FLECHAS MEDIDAS OU FLECHAS LEVANTADAS OU FLECHAS VELHAS OU FLECHAS ANTIGAS

Quando se procede o levantamento em campo das flechas de uma curva, obtém-se, no gráfico "flechas x estacas", o diagrama das flechas medidas, ou flechas levantadas ou flechas velhas, ou flechas antigas. Esse diagrama apresenta como característica principal, uma forma bastante irregular como a representada na linha -- cheia na fig. 5.1 (trecho de uma curva)



LINHA CHEIA = DIAGRAMA DE FLECHAS MEDIDAS  
 LINHA PONTILHADA = DIAGRAMA DE FLECHAS PROJETADAS

FIG. 5.1.

6 - ESTUDO DAS CURVAS (CÁLCULO DE ARREDONDAMENTO)

O estudo das Curvas Ferroviárias (cálculo de Arredondamento) é baseado em dois princípios fundamentais:

- Princípio dos Deslocamentos proporcionais
- Princípio dos Três Pontos

que englobam, também, basicamente, a proporcionalidade, em termos aproximados de:

$$G \propto A$$

onde:  $G$  = ângulo externo das tangentes

$A$  = área do diagrama de flechas

e a coincidência, considerando-se os diagramas de flechas antigas e o diagrama de flechas novas, dos respectivos centros de simetrias - das áreas dos dois diagramas, em relação ao eixo das estacas (eixo dos "x").

Sumariamente, no caso da proporcionalidade das áreas - em relação ao ângulo das tangentes, pode-se demonstrar o seguinte:-

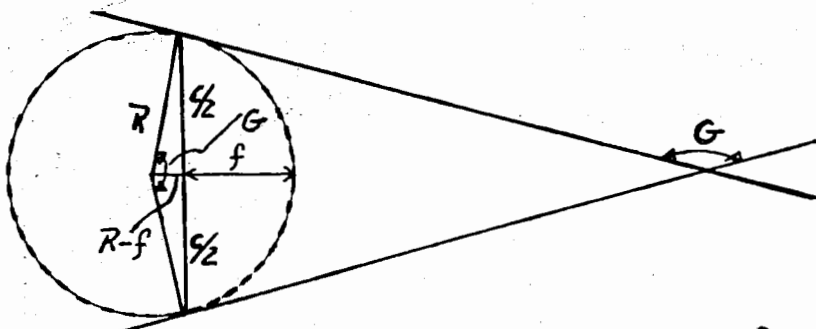


FIG. 60.

$$R^2 = (c/2)^2 + (R-f)^2 ; R^2 = c^2/4 + R^2 - 2Rf + f^2 ; f^2 \approx 0 \therefore$$

$$2Rf = c^2/4 \quad \text{OU} \quad f = \frac{c^2}{8R} ; \quad R = ?$$

$$R \sin \frac{G}{2} = \frac{c}{2} ; \quad \frac{G}{2} \text{ PEQUENO } \therefore \sin \frac{G}{2} \approx \frac{G}{2} \text{ (EM RADIANOS)} \therefore$$

$$R \sin \frac{G}{2} = R \frac{G}{2} = \frac{c}{2} \quad \text{ONDE} \quad R = \frac{c}{G} ; \text{ SUBSTITUINDO NA FÓRMULA ACIMA:}$$

$$f = \frac{c^2 \cdot G}{8c} \quad \text{OU} \quad G = \frac{8}{c^2} f \cdot c \quad \text{COM} \quad \frac{8}{c^2} = \text{CONSTANTE}$$

$$\therefore G \propto \text{ÁREA DO DIAGRAMA DE FLECHAS}$$

### 6.1- PRINCIPIO DOS DESLOCAMENTOS PROPORCIONAIS

É representado pelo Método das Flechas Novas Projeta-- das, as quais podem ser encontradas a partir de-:

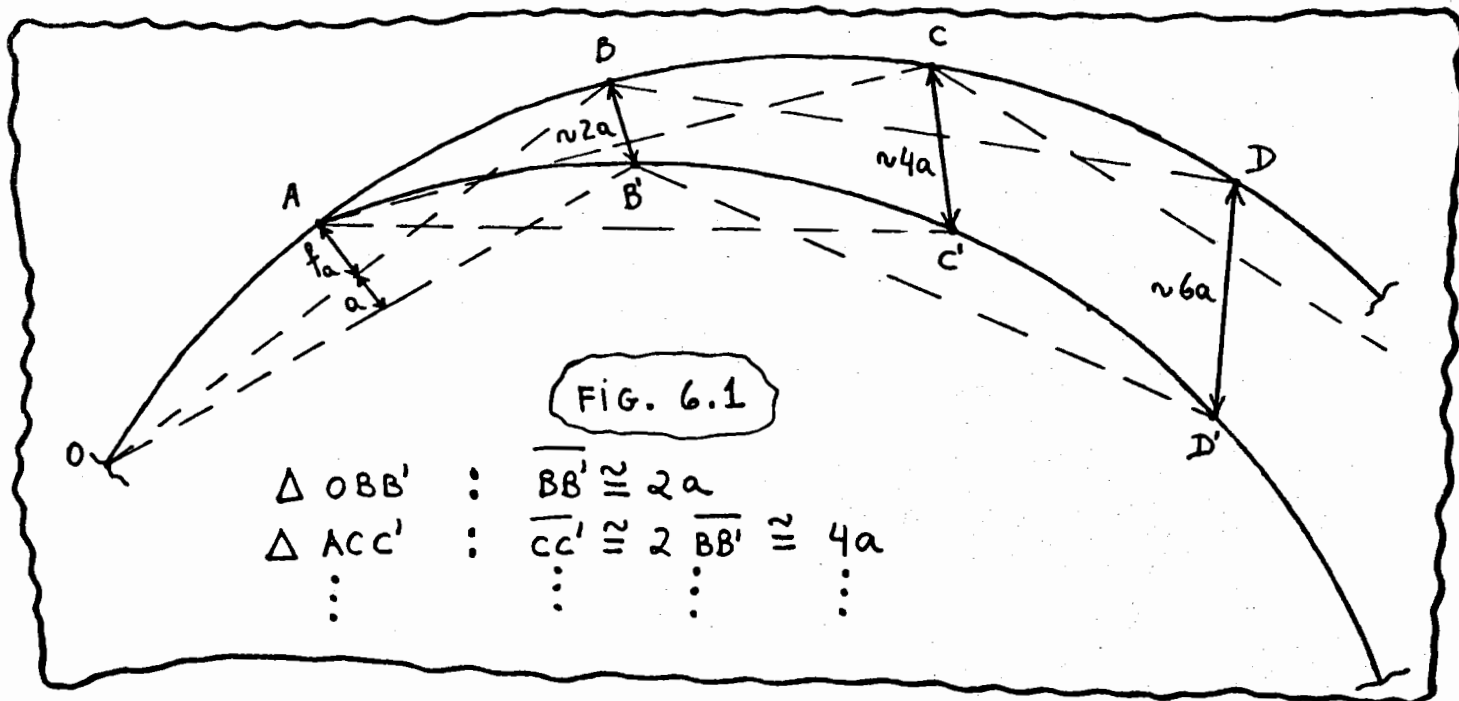
- a- Experiência
- b- Diagrama de Flechas
- c- Correções Localizadas.

### 6.2- PRINCIPIO DOS TRES PONTOS

É representado pelo Método das Fichas Móveis (Euro - Brandão) e/ou uma extensão mecanizada do mesmo através de Máquinas de Cálculo de Arredondamento de Curvas (ex. MATISA).

### 6.3- TEORIA SUMÁRIA DO PRINCIPIO DOS DESLOCAMENTOS PROPORCIONAIS

#### 6.3.1- TEORIA SIMPLIFICADA DO MÉTODO DOS DESLOCAMENTOS PRO- PORCIONAIS.



#### HIPÓTESE BÁSICA:

Para se aumentar a flecha "f<sub>a</sub>" em A de um valor a, é - necessário que se desloque o ponto B de 2a (aproximadamente), o C - de 4a (aproximadamente), D de 6a (aproximadamente), e assim por - diante (fig. 6.1). Por outro lado, as flechas de B, C, D, etc, não va - riarão, em função do aumento da flecha em A. (Supõe-se que a linha seja rígida suficientemente para que, uma modificação de flecha em

um ponto, condicione o aparecimento de deslocamentos, nas estacas - subsequentes, de valores múltiplos, da alteração introduzida na flecha e a linha, a partir do ponto em que se introduziu a alteração na flecha, desloca-se como um todo, conforme figura atrás. Evidentemente as considerações básicas são válidas tanto para alterações positivas, como para alterações negativas.

Consequentemente, tem-se o quadro abaixo:-

I ESTACAS	II ALTERAÇÃO DE FLECHA $f_i - F_i$	III DESLOCAMENTO TOTAL (PUXAMENTO)	IV DESLOCAMENTOS RELATIVOS AS ESTACAS ANTERIORES	V METADE DO DESLOCAMENTO RELATIVO A ESTACA ANTERIOR.
0	0	0	0	0
A	a	0	0	0
B	b	2a	2a	a
C	c	4a + 2b	2a + 2a	a + b
D	d	6a + 4b + 2c	2a + 2b + 2c	a + b + c
E	e	8a + 6b + 4c + 2d	2a + 2b + 2c + 2d	a + b + c + d

QUADRO 6.1

Praticamente, pode-se compor um quadro para desenvolver o raciocínio anterior, levando-se em consideração, as estacas, as flechas medidas respectivamente ( $f_a$ ), as flechas projetadas ( $F_a$ ), e as alterações de flechas consequentes em cada estaca dada pelas diferenças  $f_a - F_a = a$ ;  $f_b - F_b = b$ ;  $f_c - F_c = c$ ;  $f_d - F_d = d$ ; etc., constituindo, -- pois, um algoritmo de cálculo de Arredondamento de Curvas pelo Método dos Deslocamentos proporcionais; (Quadro 6.2).

NOTA:

NA COLUNA (V), A SOMA ACUMULADA DAS LINHAS (EXEMPLO:  $2$  (3ª linha) +  $a + b$  (4ª linha) =  $2a + b$  (4ª linha)) O QUE REPRESENTA A METADE DO PUXAMENTO DA COLUNA (III). ISSO FORNECE UM PRIMEIRO SUBSÍDIO PARA OBTENÇÃO DE UM ALGORITMO DE CÁLCULO JÁ QUE A PRÓPRIA COLUNA (V) PODE SER OBTIDA DA (II) POR SOMA ACUMULADA!

Tem-se:-

I	II	III	IV	V	VI	VII
ESTACAS	FLECHAS ANTIGAS	FLECHAS NOVAS	DIFERENÇA DE FLECHAS (ALTERAÇÃO NA FLECHA) $f_i - F_i = i$	SOMA DAS DIFERENÇAS	METADE DO PUXAMENTO (METADE DO DESLOCAMENTO TOTAL)	PUXAMENTO (DESLOCAMENTO TOTAL)
0	$f_0$	$F_0$	0	0	0	0
A	$f_a$	$F_a$	a	a	0	0
B	$f_b$	$F_b$	b	a + b	a	2a
C	$f_c$	$F_c$	c	a + b + c	2a + b	4a + 2b
D	$f_d$	$F_d$	d	a + b + c + d	3a + 2b + c	6a + 4b + 2c
E	$f_e$	$F_e$	e	a + b + c + d + e	4a + 3b + 2c + d	8a + 6b + 4c + 2d
:	:	:	:	:	:	:

QUADRO 6.2

Na estaca inicial, supõe-se sempre  $F_0 = f_0$ , portanto acarretando 0 (zero) como valor na coluna das diferenças de flechas. A linha de 0, é considerada pois, linha inicial básica, para efeito de cálculo, e seus valores nas colunas IV, V, VI e VII correspondem a zero.

Somando-se cumulativamente os valores da coluna IV, obteremos a soma das diferenças, para cada estaca. Praticamente isto poderá ser feito, segundo indicação de setas entre as colunas V e IV.

A coluna V, "Soma das diferenças", fornecerá a metade do puxamento real para cada estaca, se somada cumulativamente, segundo -- indicação por setas entre as colunas VI e V, vide valores no quadro. Multiplicando-se por 2 os valores da coluna VI, obtem-se o puxamento real de cada estaca, em função das alterações de flechas nas estacas anteriores. (Comparar valores da coluna III do Quadro 6.1. com os valores da coluna VII do quadro 2).

6.4- PRINCÍPIO DOS TRÊS PONTOS

6.4.1. TEORIA SIMPLIFICADA

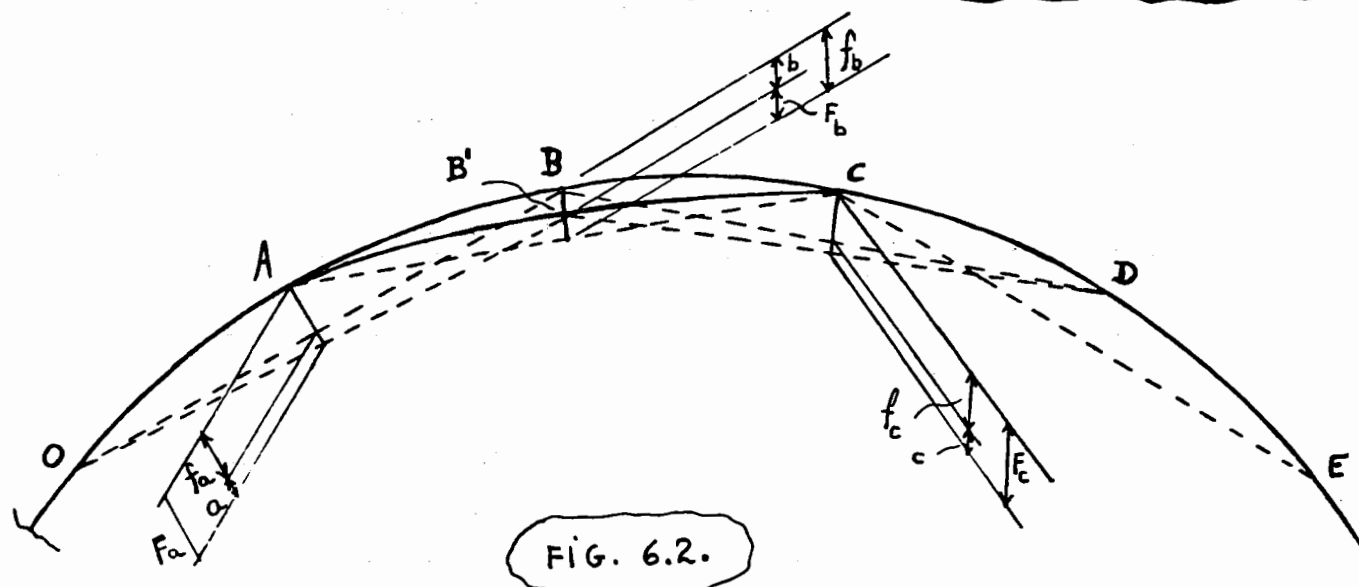


FIG. 6.2.

HIPÓTESE BÁSICA

"Se se deslocar (puxar) o ponto B para B' de um valor "b" (alteração física do ponto) a linha deslocar-se-á entre as estacas vizinhas segundo a curva A B'C (fig. 6.2)."

As cordas OB e BD passarão para OB' e B'D e a corda AC - permanecerá onde estava. Portanto a flecha antiga de B representada por "f<sub>b</sub>", com o puxamento de B para B' segundo um valor "b", ficará alterado de "b"; as flechas antigas de A e C, "f<sub>a</sub>" e "f<sub>c</sub>", ficarão alteradas segundo os valores "a" e "c" porém, os pontos (estacas) A e C não se deslocarão fisicamente. Por outro lado, os triângulos QBB' e BB'D fornecerão, aproximadamente, os valores das alterações "a" e "c", em função da alteração "b"; isto é, considerando-se as dimensões dos triângulos QBB' e BB'D, pode-se admitir:

$$a \approx b/2$$

$$c \approx b/2$$

Observa-se também que, a alteração de flecha de B é igual a

"-b" e das estacas vizinhas A e C é igual a "+b/2." Portanto, pode-se resumir "A alteração do valor da flecha numa estaca qualquer identificada por alteração introduzida, produz como consequência, a variação do valor das flechas das estacas adjacentes, identificadas como correções consequentes, iguais à metade da alteração introduzida e com sentidos inversos desta".

Portanto, pode-se resumir o que foi dito no quadro abaixo:

ESTACAS	$f_i$	$F_i$	DIFERENÇAS DE FLECHAS $f_i - F_i$	ALTERAÇÃO DE FLECHAS	PUXAMENTO
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
H	$f_h$	$F_h$	$-\frac{g}{2} + h - \frac{i}{2}$	$h$	$-h$
I	$f_i$	$F_i$	$-\frac{h}{2} + i - \frac{j}{2}$	$i$	$-i$
J	$f_j$	$F_j$	$-\frac{i}{2} + j - \frac{k}{2}$	$j$	$-j$
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·

QUADRO 6.3

Verifica-se pois que, para um puxamento para dentro da curva, convencionalmente negativo (-i), haverá alteração de flecha em "I" tal que  $f_i - F_i = i$  e em "H" e "J" iguais a "-i/2", isto é,

$$f_h - F_h = -i/2 \quad \text{e} \quad f_j - F_j = -i/2$$

#### 6.5- VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE ARREDONDAMENTO

A verificação do cálculo de arredondamento é a mesma tanto para os métodos que se baseiam no Princípio dos Deslocamentos Proporcionais, como para aqueles que se baseiam no Princípio dos Três Pontos.

Para fins didáticos, dividir-se-á a aferição em duas partes consistindo em:-

- Regra para se conferir cálculo de arredondamento baseado no princípio dos deslocamentos proporcionais, e Regra para se conferir cálculo de arredondamento baseado no princípio dos Três Pontos.

6.5.1- REGRA 1 (PRINCÍPIO DOS DESLOCAMENTOS PROPORCIONAIS)

Suponha-se o trecho do cálculo de arredondamento abaixo, com  $f_i - F_i = \pm i$  (§) e  $f_o = F_o$ . Tem-se o quadro 6.4, abaixo:

ESTACAS	FLECHAS ANTIGAS	FLECHAS NOVAS	DI F. DE FLECHAS	SOMA DAS DIFERENÇAS	METADE DO PUXAMENTO	PUXAMENTO
:	:	:	:	:	:	:
O	$f_o$	$F_o$	0	0	0	0
A	$f_a$	$F_a$	a	a	0	0
B	$f_b$	$F_b$	b	a + b	a	2a
(§) C	$f_c$	$F_c$	c	a + b + c	2a + b	4a + 2b
D	$f_d$	$F_d$	d	a + b + c + d	3a + 2b + c	6a + 4b + 2c
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

QUADRO 6.4-

Para se conferir a estaca "C", faz-se a sequência:

- soma do Puxamento de "B" com "D"

$$\textcircled{\text{I}} = 2a + 6a + 4b + 2c = 8a + 4b + 2c$$

Divide-se  $\textcircled{\text{I}}$  por (-2):

$$\textcircled{\text{II}} = \frac{8a + 4b + 2c}{-2} = -4a - 2b - c$$

Soma-se  $\textcircled{\text{II}}$  com o Puxamento de "C"

$$\textcircled{\text{III}} = -4a - 2b - c + 4a + 2b = -c$$

Soma-se  $\textcircled{\text{III}}$  com a flecha antiga de "C" obtendo-se:

$$\textcircled{\text{IV}} = f_c - c = F_c$$

ou

$$f_c - F_c = c$$

(§)- A diferença  $f_i - F_i = \pm i$  foi tomada na sequência  $f_i - F_i$  devido à facilidade da mesma (segundo o esquema da tabela) quando se utiliza o processo.



6.5.2- REGRA 2 (PRINCIPIO DOS TRES PONTOS)

Suponha-se o trecho do cálculo de arredondamento abaixo, com  $f_i - P_i = i$  (índice  $i$  variando de 0 a  $n$ ) e  $p_0 = 0$  e  $P_n = 0$ .

ESTACAS	① $f_i$	② $P_i$	④ DIFERENÇA DE FLECHAS $f_i - P_i$	⑤ ALTERAÇÃO DE flecha	⑥ PUXAMENTO
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
H	$f_h$	$P_h$	$-\frac{g}{2} + h - \frac{i}{2}$	$h$	$-h$
I	$f_i$	$P_i$	$-\frac{h}{2} + i - \frac{j}{2}$	$i$	$-i$
J	$f$	$P$	$-\frac{i}{2} + j - \frac{k}{2}$	$j$	$-j$
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·

QUADRO 6.5

VERIFICAÇÃO:

É idêntica à citada anteriormente, isto é:

Passos:

- ① =  $-h - j$
- ② =  $\frac{-h-j}{-2} = h/2 + j/2$
- ③ =  $h/2 + j/2 - i$
- ④ =  $f_i + h/2 + j/2 - i$

A expressão ④ deve ser igual a " $P_i$ ", acarretando o passo

$IV - P_i = 0$  ou  $(f_i + h/2 + j/2 - i) - P_i = 0$  ou

⑤  $f_i - P_i = -h/2 + i - j/2$

"IGUAL A EXPRESSÃO DA TABELA ACIMA - COLUNA ④"

OBSERVAÇÃO :

Para um arredondamento feito à máquina de cálculo, as transmissões de engrenagem da máquina, introduzem erros acumulados durante o processo. Isso se evidencia claramente, quando se faz um arredondamento utilizando-se as engrenagens muitas vezes e sem o devido cuidado. Os erros de transmissão acumulados podem ser de tal porte que introduzem em determinadas estacas, erros que serão notados, mesmo posteriormente ao cálculo de arredondamento.

Para se evitar distorções dessa natureza, algumas ferrovias, como por exemplo a ex-C.P.E.F., hoje pertencente à FEPASA, utilizam-se de tolerâncias que são expressas pela relação (V) da sequência da regra de verificação, da seguinte maneira:

$$| \textcircled{V} | = | \textcircled{IV} - F_i | = | f_{i+h/2} + j/2 - i - F_i | \leq 2 \text{ mm}$$

Quando para uma determinada estaca  $| \textcircled{V} | > 2 \text{ mm}$ , o cálculo deverá ser refeito, pois houve erro demasiado acumuladamente por parte do próprio mecanismo da máquina ou qualquer outro como leitura, marcação das flechas na máquina, superposição de cálculos para curvas com muitas estacas, etc.

6.6- APLICAÇÕES PRÁTICAS DO PRINCÍPIO DOS DESLOCAMENTOS PROPORCIONAIS ATRAVÉS DO MÉTODO DAS FLECHAS NOVAS PROJETADAS.

Aplica-se, basicamente, o algoritmo mostrado no item 6.3.1-Quadro 6.2, isto é:

ESTACAS	FLECHAS ANTIGAS $f_i$	FLECHAS NOVAS $F_i$	DIF. DE FLECHAS $f_i - F_i = i$	SOMA DAS DIFERENÇA	METADE DO PUXAMENTO	PUXAMENTO
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·
·	·	·	·	·	·	·

6.6.1- CÁLCULO DAS FLECHAS NOVAS PROJETADAS

a. EXPERIÊNCIA

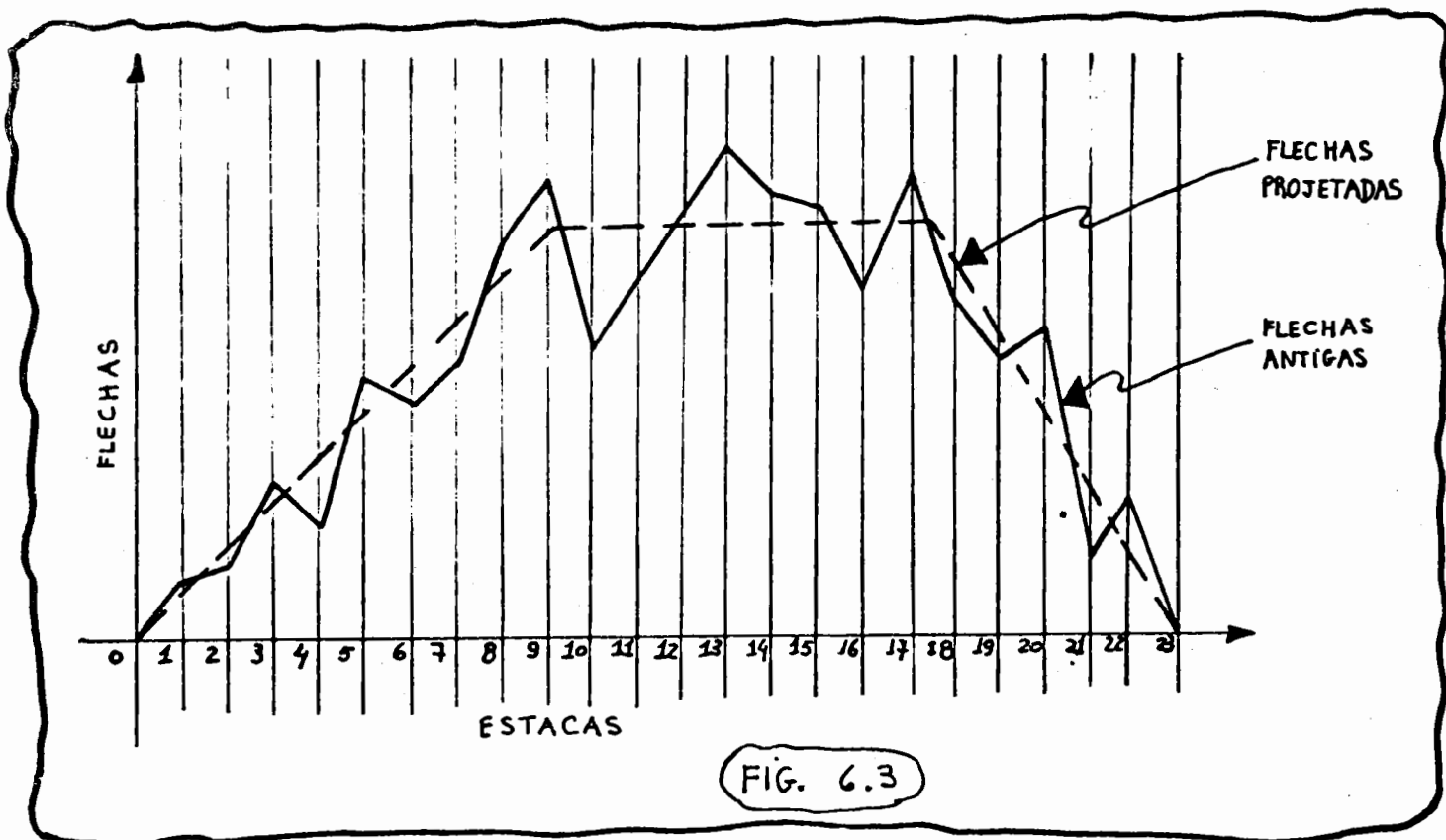
Conforme a experiência do técnico em questão, as flechas novas projetadas poderão ser transcritas pelo mesmo diretamente na

coluna  $F_i$  da tabela atrás. É função, pois, unicamente da experien -  
cia do profissional envolvido nesse tipo de cálculo.

b- DIAGRAMA DE FLECHAS

b.1- FLECHAS NOVAS

Procede-se o levantamento de flechas antigas em campo, da curva a ser arredondada e lança-se em um gráfico, obtendo-se preva-  
velmente um diagrama bastante irregular, conforme a linha cheia do exemplo abaixo: (fig. 6.3):



O ideal seria ter-se um diagrama trapezoidal conforme li-  
nha tracejada na mesma figura. Para o cálculo dos valores de  $F_i$   
(flechas novas) desenha-se pois um trapézio, aproximadamente, ten-  
tando-se obter um máximo balanceamento de áreas internas e externas  
à linha tracejada, formadas pelo diagrama de flechas antigas (linha  
cheia). Essa condição de balanceamento é fundamental, visando-se  
obter uma das condições básicas do cálculo de arredondamento que é  
a igualdade de áreas dos dois diagramas (antigo e novo), traduzido  
pela expressão:-

$$\sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n F_i$$

ou

$$\sum_{i=1}^n (f_i - F_i) = 0$$

NOTA 1:- LEVANTAMENTO DE FLECHAS ANTIGAS EM CAMPO

O equipamento para medição de flechas, consta de duas garras, um cabo de aço, um metro de pedreiro e um calço para esse metro.

As garras tem dois punhos, um dos quais é móvel, de maneira a permitir o uso das mesmas garras em trilhos de vários pesos.

Não é necessário apertar o parafuso, cada vez que se fizer uma medida. As garras devem estar na cabeça do trilho, com uma pequena folga para efeito de se retirá-las rapidamente durante a aproximação repentina de um trem. Observa-se que quando o cabo é esticado, a garra se inclina um pouco, dando a outra garra uma inclinação simétrica. Puxa-se o cabo até que se tenha dado tensão necessária, o que se verifica pela diferença de altura entre os trilhos e o meio do cabo de aço. Pode-se soltar, então, e a garra ficará na posição de trabalho.

A corda consta de um cabo de aço fino e flexível. Não há fixação na dimensão da mesma. Teóricamente, ela deve ser a menor possível. Na prática as cordas diminutas acarretam erros de medidas excessivas usando-se, portanto, cordas de 20 metros de comprimento. Convém amarrar um pedaço de barbante no meio do cabo, para facilitar a medida da flecha, caso esse não venha marcado.

A medida da flecha deverá ser feita com o calço do latão colocado na ponta do metro. Apoiando o calço no trilho e colocado o metro em posição horizontal, perpendicularmente ao trilho, na altura da linha de bitola a escala ficará acima do cabo e a leitura da flecha se faz imediatamente.

As flechas devem ser tomadas ao longo do trilho externo de dez em dez metros (10 em 10 m) começando cerca de 60 metros antes do P.T.S. aparente e terminando mais ou menos à mesma distância além do P.T.S. aparente.

Não se deve esquecer a amarração a pontes ou obras de arte, porque os sinais das estacas (estações) podem desaparecer antes de se efetuar o puxamento.

Na primeira estaca "0", não se fará leitura de flecha e as estações serão numeradas de uma em uma.

É preciso, registrar no formulário todos os pontos em que é difícil ou impraticável o puxamento da linha, indicando o motivo (pontilhões, agulha, etc).

A medição de flechas, é feita na seguinte sequência:

- a) Procura-se o olho, o início da curva, e marca-se com "x" na alma do trilho externo da curva, uma estaca seja por exemplo a estaca 6. Retrocede-se para a tangente, marcando as estacas anteriores até zero.
- b) Com 3 homens, um em cada ponta e um no meio, vai se medindo sucessivamente as flechas, sempre no trilho externo até ultrapassar se 4 a 6 estacas do P.T. da curva.
- c) O homem que vai a frente, enquanto se procede a leitura, marca no trilho a estaca seguinte.
- d) Anotam-se os pontos especiais tais como ponta de agulha, pontilhões, etc.
- e) Preenche-se a coluna "flechas antigas" em um formulário semelhante ao do quadro 6.2 (item 6.3.1) acrescido da coluna de sobrelevação, conforme o quadro 6.6 a seguir:

ESTACAS	FLECHAS ANTIGAS	FLECHAS PROJETADAS			DIFERENÇAS			SOMA DAS DIFERENÇAS			METADE DO PUXAMENTO			PUXAMENTO	PONTOS ESPECIAIS	SUPERELEVAÇÃO	
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c			ANT.	PROJ.

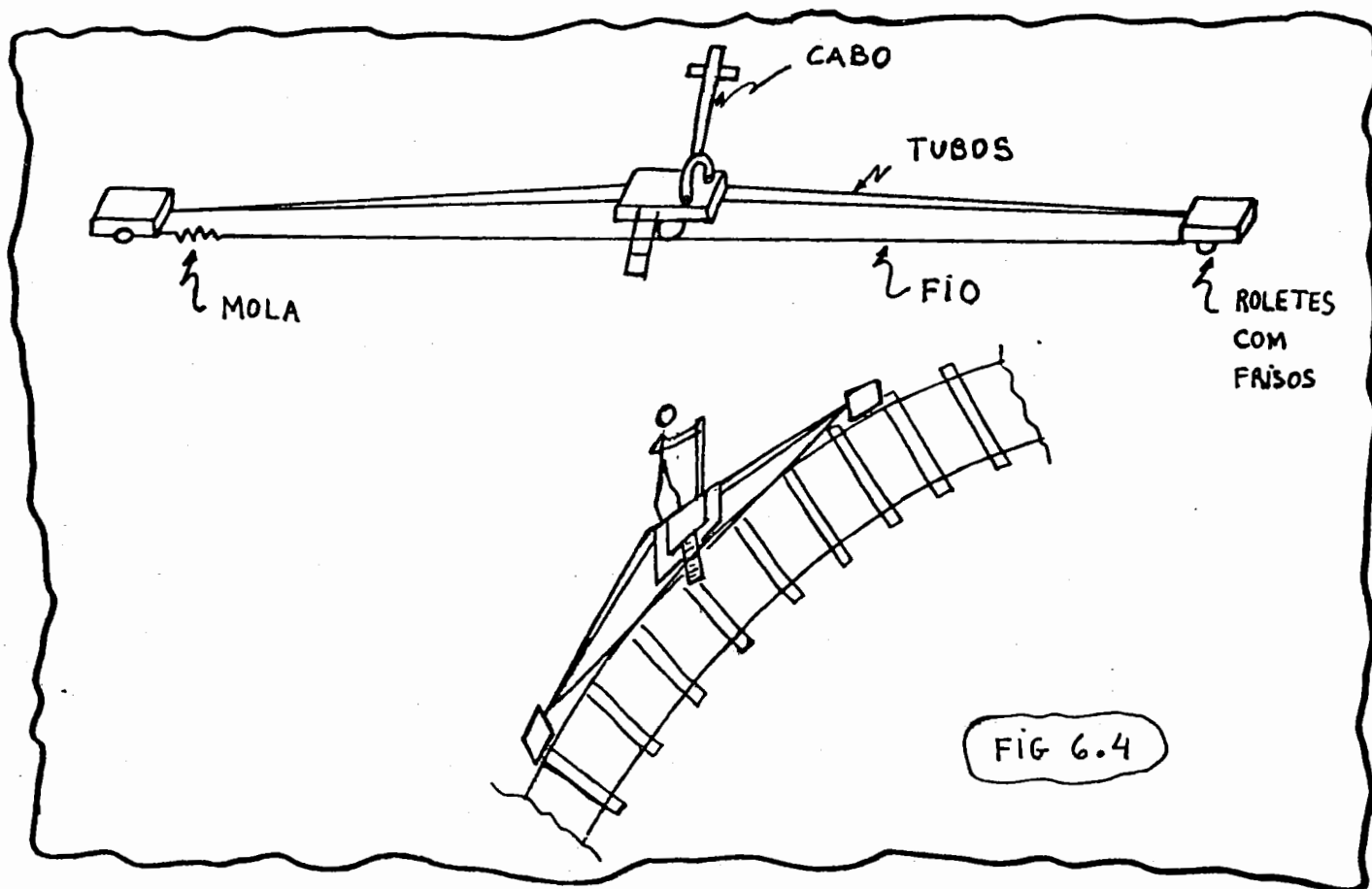
QUADRO 6.6.

f) Mede-se em cada estaca a superelevação correspondente e coloca-se no formulário, na coluna correspondente.

NOTA 2: - MEDIDOR DIRETO DE FLECHAS

A medição pode ser muito acelerada, com o emprêgo de um dispositivo para medir flechas, composto de tubos metálicos (alumínio com o comprimento desejado, cujas extremidades são ligadas por um fio de aço tensionado por uma mola. Uns roletes e guias para o dispositivo deslocar-se sobre o trilho e uma escala fixada horizontalmente no meio de onde parte também um cabo para empurrar. Esses dispositivos permitem que um homem realize medidas de flechas com grande rapidez. O modelo americano (Roll-Ordinator) A.R.C. é totalmente desmontável e pode ser armado com três extensões diferentes (31', 39', 62').

Fig. 6.4- Medidor de flechas em curvas



NOTA 3: CONTROLE E MEDIDAS DE SUPERELEVÇÃO

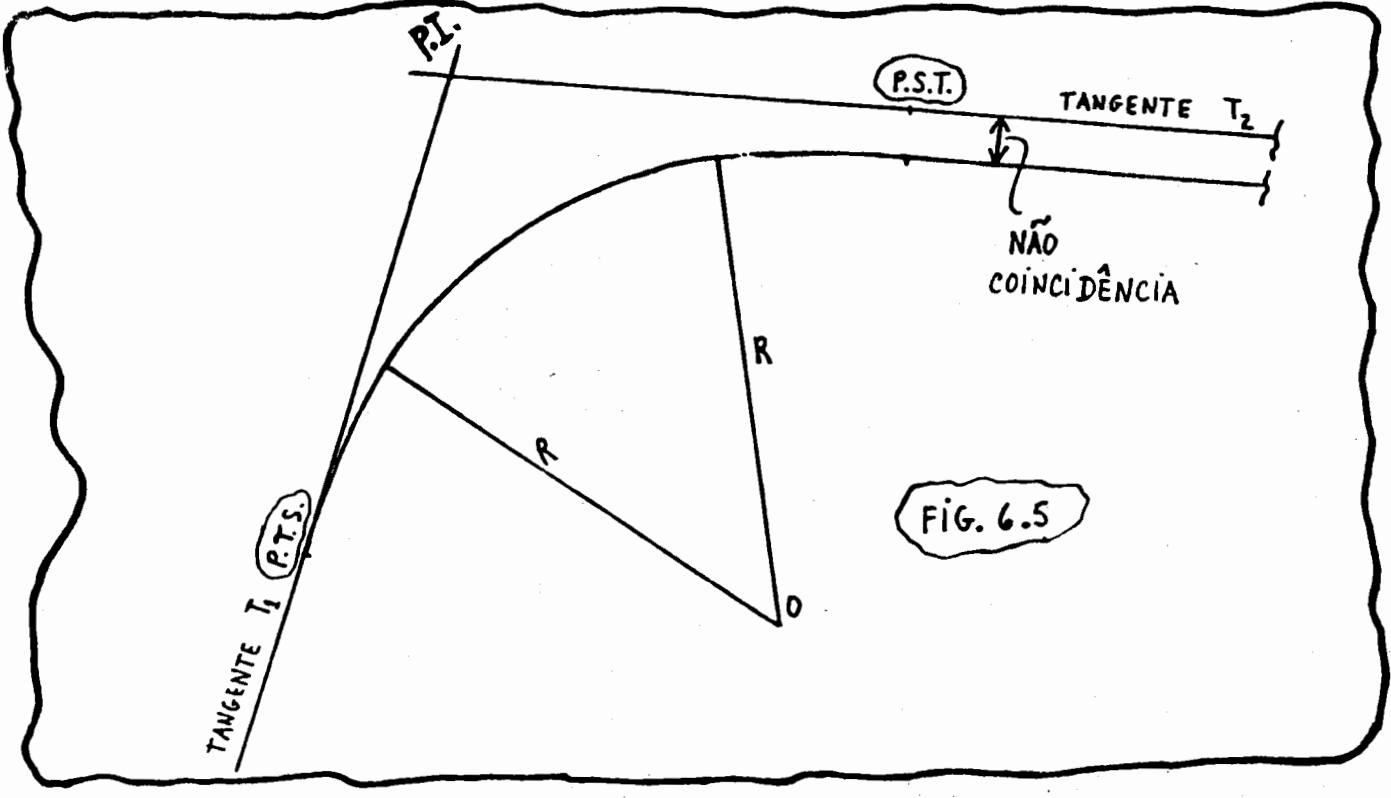
Para se efetuar as medidas de superelevação em campo, usa-se uma régua de madeira, um nível e um esquadro especial. Existe ...

também uma régua metálica ( MATISA<sup>(\*)</sup> ) englobando em uma só peça, a régua, o nível e o esquadro.

b.2- CONTINUIDADE DOS CÁLCULOS

Com os valores de  $f_i$  e  $F_i$ , obtém-se os valores  $i$  e com estes segue-se a mesma seqüência indicada no algoritmo do item 6.3.1.

Observou-se, então, no final do cálculo, que a coluna de "metade do puxamento", em sua última estaca, tem, provavelmente, um valor diferente de zero. Portanto, o próprio puxamento (igual a duas vezes a metade do puxamento) será diferente de zero, ocasionando uma não coincidência física entre a curva arredondada e a tangente/consequente, isto é (fig. 6.5):



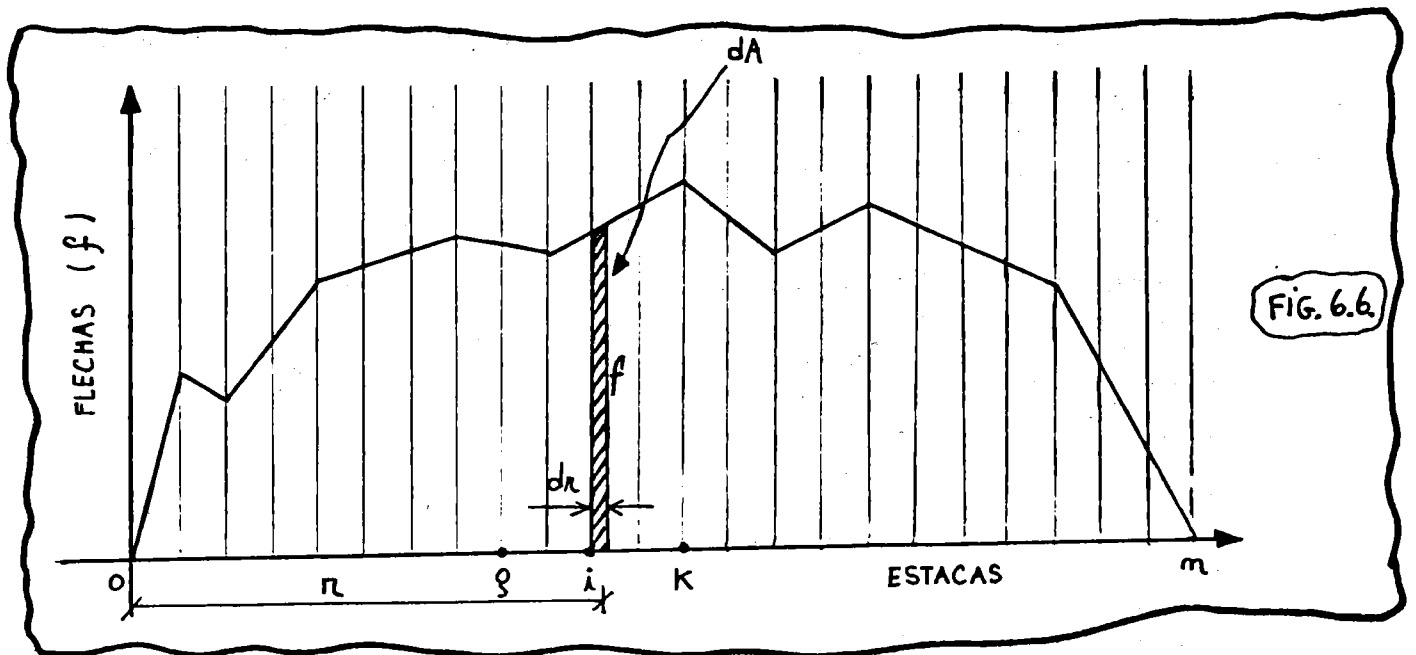
Esse problema deve-se ao fato de que apesar de se ter conservada uma igualdade entre as flechas antigas e as flechas novas - visando uma igualdade final de áreas entre os diagramas de flechas antigas e o diagrama de flechas novas, não se conservou nenhum centro de simetria em relação às estacas (eixo dos x) das duas áreas, isto é, a figura traduzida pelo diagrama de flechas foi alterada com relação ao seu centro de simetria (centro de simetria considerado - na direção do eixo x ou eixo das estacas).

Portanto, a segunda condição básica para o cálculo de Arredondamento é baseada na inalterabilidade dos eixos de simetria -

(\*) OU SIMILAR

das duas áreas em questões, em relação ao eixo das estacas.

Essa analogia deverá ser estendida de tal maneira que se possa ter:



PARA "m" ESTACAS QUANDO "m"  $\rightarrow \infty$

$$dM = n \cdot dA \quad ; \quad M = \int dM = \int n \cdot dA \quad ; \quad dA = f \cdot dn \quad \therefore$$

$$M = \int n \cdot f \cdot dn \quad ; \quad f = \varphi'(n) \quad ; \quad M = \int_0^m n \cdot \varphi'(n) \cdot dn \quad \therefore$$

$$M = \left[ \varphi''(n) \right]_0^m = \phi_n$$

A procura de um diagrama de curvas diferente do primeiro deverá ser feita de modo que se encontre um  $M'$  tal que:

$$M' = M = \phi_n \quad (*)$$

isto é, se no elemento  $dA$  da estaca  $i$  acrescentarmos um diferencial  $df$  deveríamos ter em quaisquer elementos simétricos a  $dA$  um decréscimo de  $df/2$  tal que:

$$\begin{aligned} M' &= \int dM' = \int n \cdot f \cdot dn + \int 2 \cdot n_i \frac{df}{2} - n_g \frac{df}{2} - n_k \frac{df}{2} = \\ &= \int n \cdot f \cdot dn + \frac{df}{2} (2n_i - n_g - n_k) = \int n \cdot f \cdot dn + \frac{df}{2} [2n_i - (n_g + n_k)] \end{aligned}$$

$$\text{MAS } \frac{n_g + n_k}{2} = n_i \quad \therefore \quad n_g + n_k = 2n_i$$

$$\text{LOGO } M' = \int dM' = \int n \cdot f \cdot dn \quad \text{E PORTANTO } M' = M = \phi_n .$$

(\*) CONSERVAÇÃO DO EIXO DE SIMETRIA DO DIAGRAMA EM RELAÇÃO ÀS ESTACAS.



Esse novo balanceamento, em termos práticos poderá tomar como analogia, os elementos básicos em FÍSICA, de um corpo em equilíbrio onde  $\sum f_x = 0$ ;  $\sum f_y = 0$ ;  $\sum f_z = 0$ ;  $\sum M = 0$ , isto é, o sistema de forças está em equilíbrio e a somatória dos momentos resultantes é zero.

Portanto, analogicamente, pode-se escrever:

alteração de flecha = força

diferença de numeração de estacas = distâncias

então:

$$\sum_{i=0}^m f_i = \sum_{i=0}^m F_i \quad (*)$$

(\*) (primeira condição já vista visando a igualdade de áreas); e

$$\sum M = 0 \quad (**)$$

(\*\*) (conforme já visto quanto à coincidência dos centros de simetria em relação às estacas no diagrama de flechas).

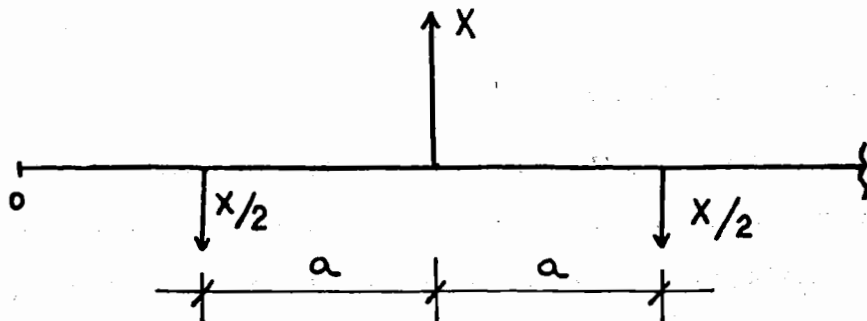
Portanto além de  $\sum_{i=0}^m f_i = \sum_{i=0}^m F_i$  para um sistema de equilíbrio - continuar em equilíbrio, tem-se que levar em consideração que  $\sum M = 0$ , isto é, as alterações de flecha também tem que levar em conta - uma realidade de alterações que não desloque o centro simetria em relação às estacas.

Analogicamente, e como exemplos, seguem esquemas da Física onde :

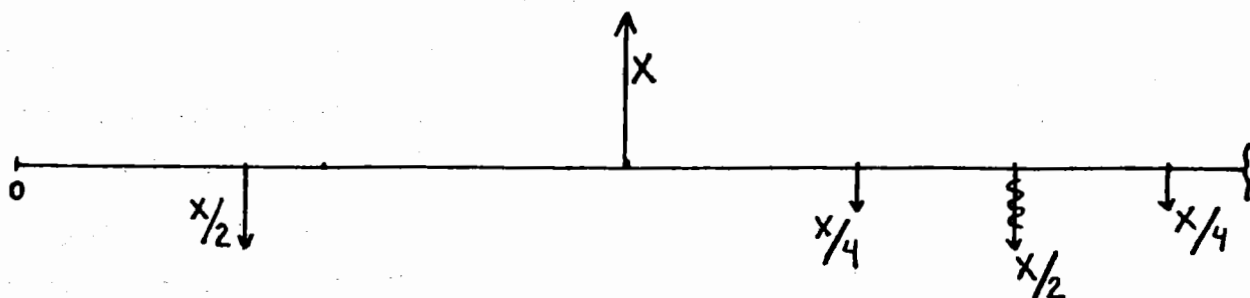
fôrça = alteração de flecha

Distância = diferença de numeração de estacas

FIG. 6.6.a

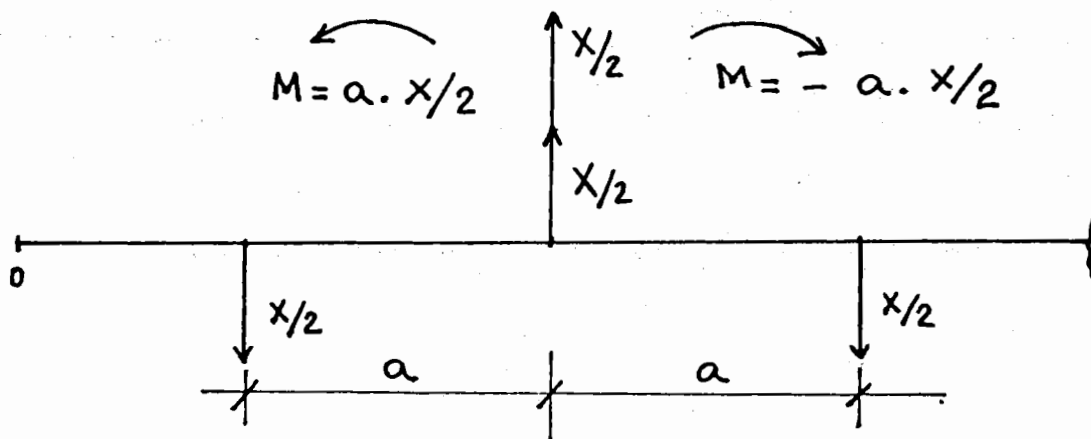


FORÇA "X" = ALTERAÇÃO DE FLECHA  
 DISTÂNCIA "a" = DIFERENÇA DE NUMERAÇÃO DE ESTACAS



$$M = a \cdot X/2$$

$$M = -a \cdot X/2$$



### EXEMPLOS DE SISTEMAS EM EQUILÍBRIO

Portanto, nesse tipo de cálculo de flechas novas projetadas, devido às alterações realizadas nas flechas de cada estaca quando se obtêm as flechas novas, assim que se chega na coluna de metade do puxamento, do algoritmo em questão, o valor da última estaca/será o "momento" diferente de zero que se deverá balancear, visando uma obtenção de  $M = M' = 0$  conforme visto anteriormente. Para tal seguem REGRAS PRÁTICAS visando o estabelecimento de  $\sum M = 0$

REGRAS PARA CORREÇÃO DE  $\sum M \neq 0$

"Quando a metade do puxamento da última estaca resulta positivo ( $p > 0$ ), diminuem-se os valores das flechas projetadas de numeração alta, acrescentando-se as mesmas quantidades nas flechas -- projetadas de numeração baixa".

EXEMPLO:

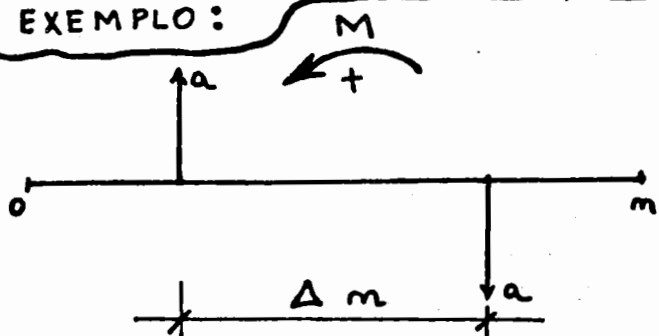


FIG. 6.6. b.

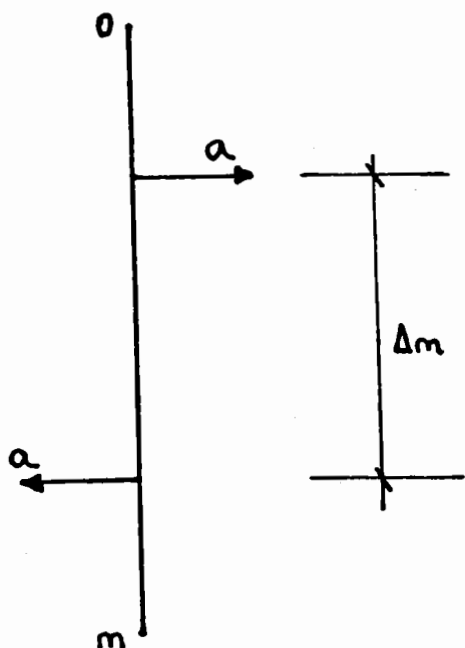
- $a$  = ALTERAÇÃO DE FLECHA
- $\Delta m$  = DIFERENÇA DE NUMERAÇÃO DE ESTACAS
- $M$  = METADE DO PUXAMENTO DA ÚLTIMA ESTACA

BALANCEAMENTO:

$M = a \cdot \Delta m$

OU, SEGUNDO "VISUAL VERTICAL" DO CÁLCULO DE ARREDONDAMENTO:

$m$ :  
NUMERAÇÃO DAS ESTACAS CRESCENTE



$+ M$

$M = a \cdot \Delta m$

FIG. 6.6. c.

quando  $M$  é muito grande em módulo, fazem-se diversas --  
 correções, isto é, introduções de binários em diversas posições:

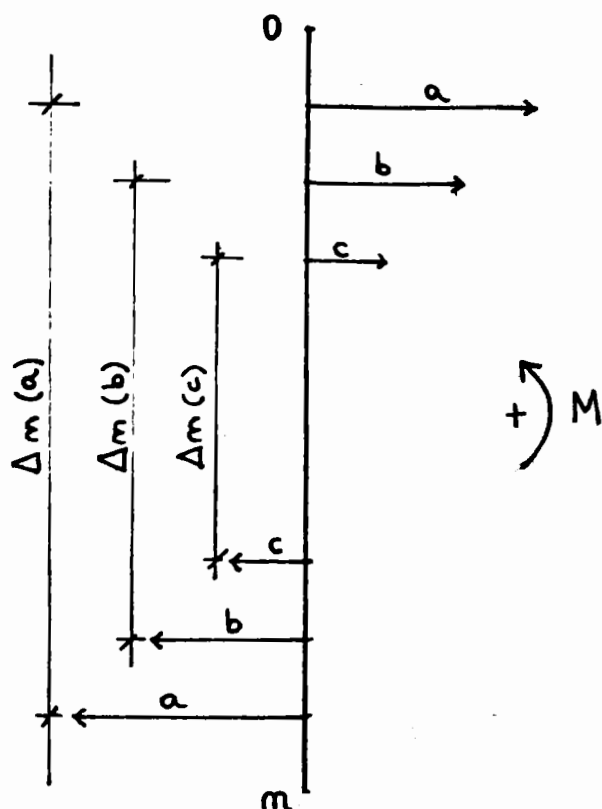


Fig. 6.6.d.

$$M = a \cdot \Delta_m(a) + b \cdot \Delta_m(b) + c \cdot \Delta_m(c)$$

"quando a metade do puxamento da última estaca for negativo ( $p < 0$ ) aumentam-se os valores das flechas projetadas de numeração alta, diminuindo-se das mesmas quantidades, as flechas projetadas de numeração baixa".

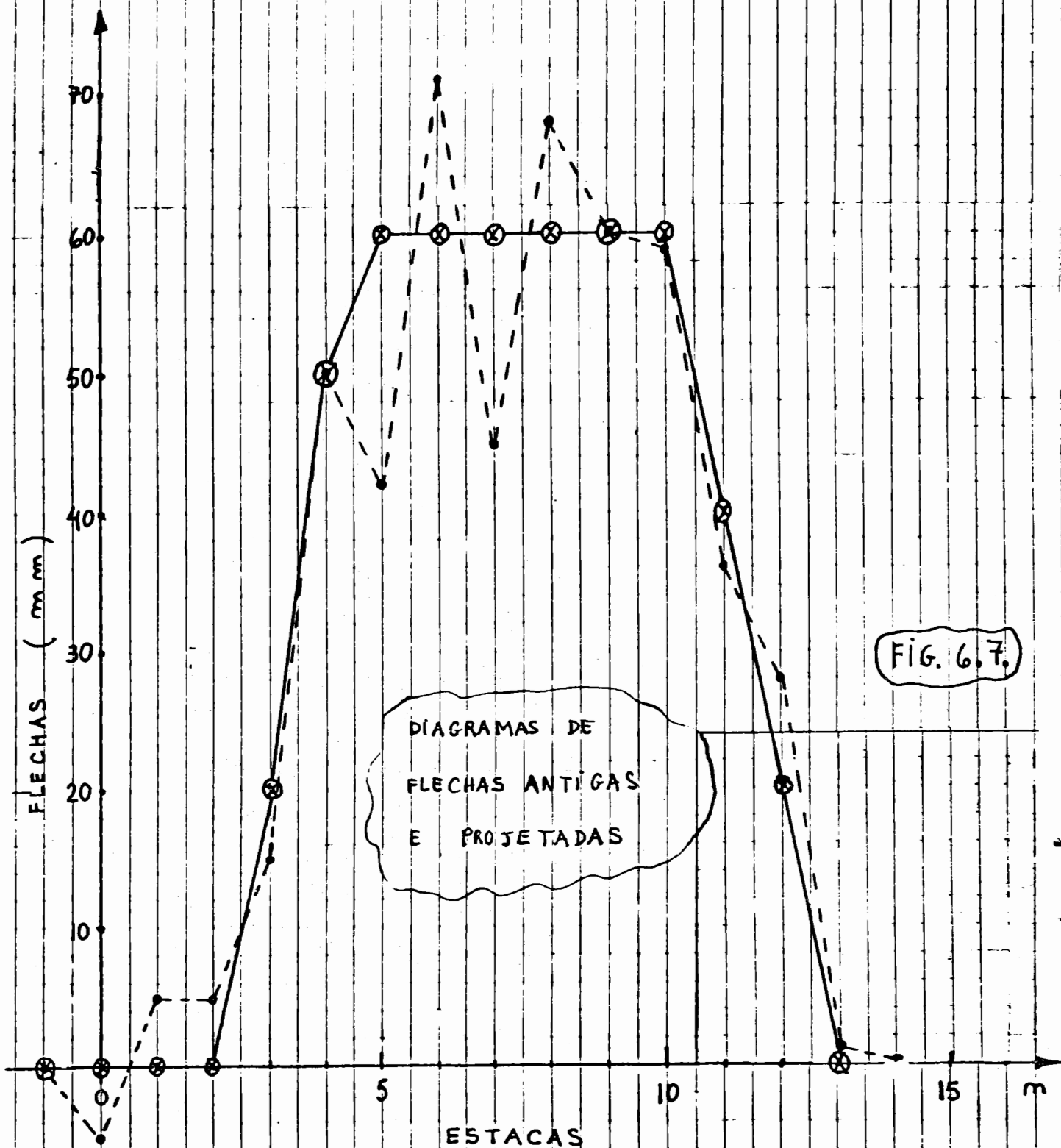
NOTA:- O conceito de numeração alta e baixa é relativo, isto é, estaca "45" é mais alta que a nº "2" mas é também mais alta que a "44".

Obtendo-se, então, uma nova sequência de valores de " $F_i$ ", a partir das alterações visando obter  $\Sigma M = 0$ , tem-se novos valores de  $f_i - F_i = 1$  e com estes executa-se novamente o algoritmo, obtendo-se na última estaca da coluna de metade do puxamento e consequentemente do puxamento, o valor zero; isso significa a obtenção de uma curva arredondada e com concidência da tangente final.

**b. 3- EXEMPLO NUMÉRICO DO CÁLCULO DE ARREDONDAMENTO POR MEIO DE FLECHAS NOVAS PROJETADAS.**

Sejam dadas as flechas antigas da coluna 2 (quadro 6.7). Por experiência ou pelo diagrama de flechas obtiveram-se as flechas novas (coluna 3)<sup>(\*)</sup> e conseqüentemente as diferenças de flechas( $f_i - F_i$ ).

(\*) VIDE TABELA SEGUINTE



Aplicando-se o algoritmo, observa-se o valor de

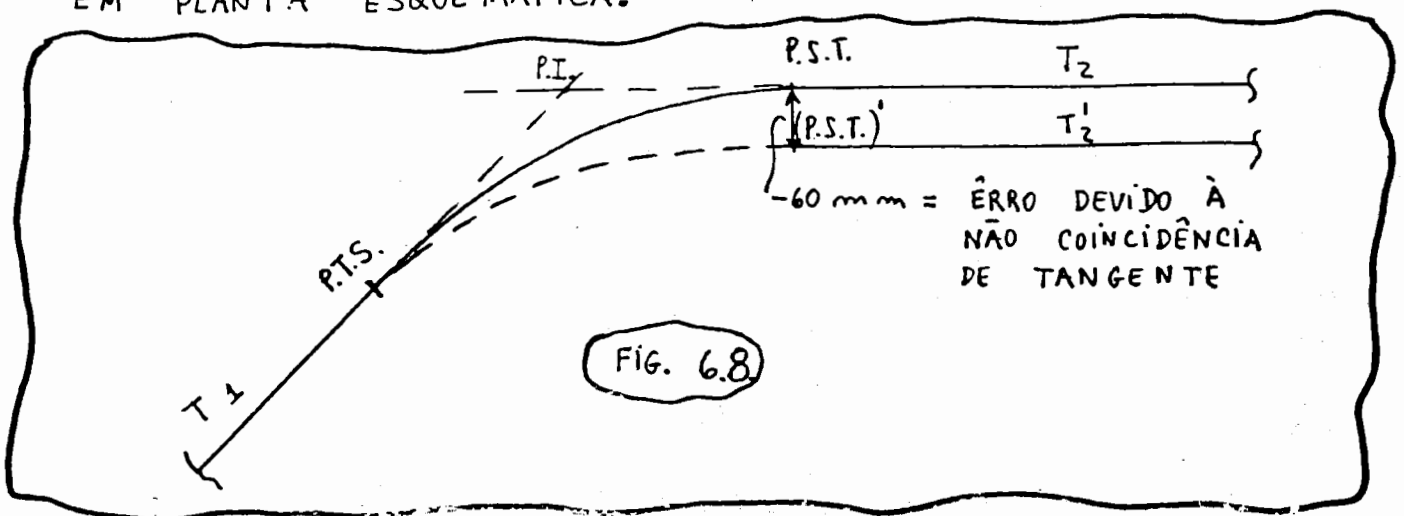
$$\sum M = -30 \neq 0$$

na coluna de metade do puxamento, acarretando pois um erro devido a não coincidência da tangente:

ESTACAS	FLECHAS $f_i$ ANTIGAS (mm)	FLECHAS PROJETADAS (mm)			DIFERENÇAS			SOMA DAS DIFERENÇAS			METADE DO PUXAMENTO			PUXAMENTO
		$F_i$			$f_i - F_i$									
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
-1	0	0			0			0			0			
0	-5	0			-5			-5			0			
1	5	0			5			0			-5			
2	5	0			5			5			-5			
3	15	20			-5			0			0			
4	50	40			10			10			0			
5	42	60			-18			-8			10			
6	71	60			11			3			2			
7	45	60			-15			-12			5			
8	68	60			8			-4			-7			
9	60	60			0			-4			-11			
10	59	60			-1			-5			-15			
11	36	40			-4			-9			-20			
12	28	20			8			-1			-29			
13	1	0			1			0			-30			
14	0	0			0			0			-30			
	$\sum = 480$	$\sum = -480$			$\sum = 0$									

QUADRO 6.7

EM PLANTA ESQUEMÁTICA:



Por isso é necessária uma nova tentativa utilizando as -  
colunas "b".

Para tal, nesse exemplo dado (Quadro 6.8), as estacas 3 e  
13 foram alteradas do valor 3 ou seja:

Diferença entre numeração das estacas	10
Valor da alteração	<u>x3</u>
	30

30 valor a balancear na coluna (6)

A visualização física desse processo (em analogia) é:

<u>Nº da ESTACA</u> (Braço do "momento" em relação à estaca "0")	<u>CORREÇÃO INTRODIZIDA</u> (força)	<u>VALOR DO MOMENTO</u>
3	x -3	= -9
13	x 3	= <u>39</u>
		$\Sigma$ 30

força = alteração no valor da flecha

braço = diferença entre a numeração de estacas

VISUALIZAÇÃO GRÁFICA ESQUEMÁTICA:

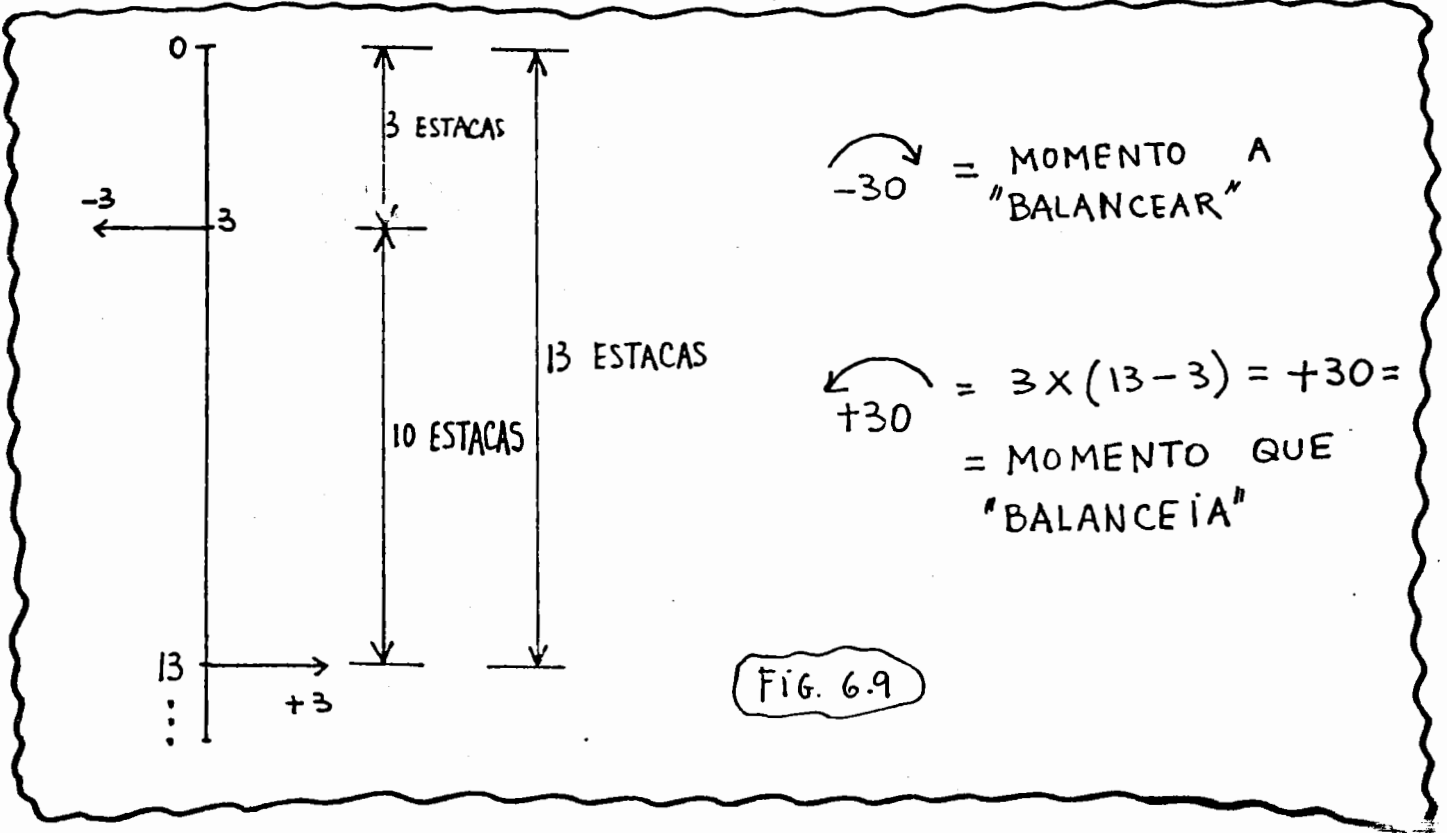


FIG. 6.9

0 ALGORITMO FICARIA:

ESTACAS	FLECHAS ANTIGAS $f_i$ (mm)	FLECHAS PROJETADAS $F_i$ (mm)			DIFERENÇAS $f_i - F_i$			SOMA DAS DIFERENÇAS			METADE DO PUXAMENTO			PUXAMENTO (mm)
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
		-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	-5	0	0	-5	-5	-5	-5	-5	0	0	0	0	0	0
1	5	0	0	5	5	5	5	5	-5	-5	-5	-5	-10	0
2	5	0	0	5	5	5	5	5	-5	-5	-5	-5	-10	0
3	15	20	17	-5	-2	-2	0	3	0	0	0	0	0	6
4	50	40	40	10	10	10	10	13	0	3	0	3	6	32
5	42	60	60	-18	-18	-18	-8	-5	10	16	10	16	32	22
6	71	60	60	11	11	11	3	6	2	11	2	11	22	34
7	45	60	60	-15	-15	-15	-12	-9	5	17	5	17	34	16
8	68	60	60	8	8	8	-4	-1	-7	8	-7	8	16	14
9	60	60	60	0	0	0	-4	-1	-11	7	-11	7	14	12
10	59	60	60	-1	-1	-1	-5	-2	-15	6	-15	6	12	8
11	36	40	40	-4	-4	-4	-9	-6	-20	4	-20	4	8	-4
12	28	20	20	8	8	8	-1	2	-29	-2	-29	-2	-4	0
13	1	0	3	1	-2	-2	0	0	-30	0	-30	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	-30	0	-30	0	0	0
	$\Sigma = 480$		$\Sigma = 480$			$\Sigma = 0$								

QUADRO 6.8.

EM PLANTA ESQUEMÁTICA:

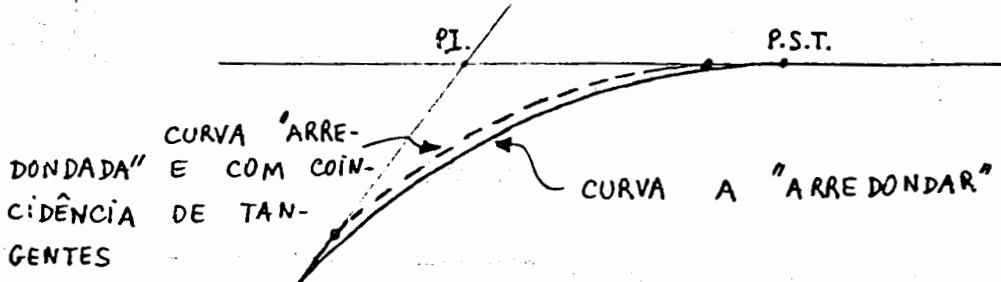


FIG. 6.10



O GRÁFICO FINAL, FICARIA :

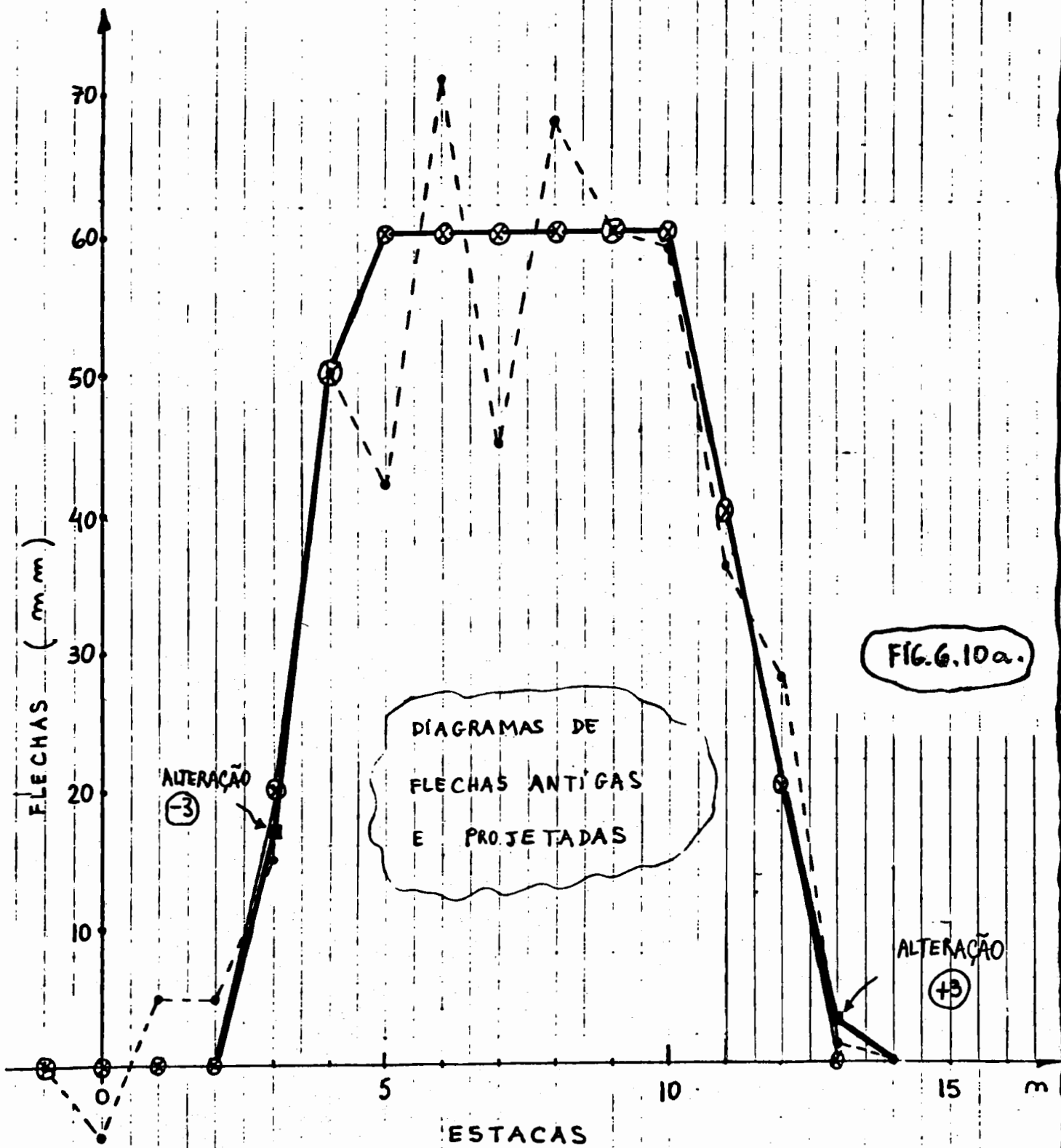


FIG. 6.10a.

**NOTAS:**

- Os puxamentos negativos são sempre efetuados para dentro da curva, os positivos para fora.

- O método analítico exige tentativa de correções e só pode ser aplicado por pessoas experientes, pois permite um número infinito de soluções boas e más. É também difícil obter correções de curvas quando há pontos que não podem ser deslocados. O calculador deverá variar as flechas projetadas de maneira a conseguir arredondamento com puxamentos pequenos.

Isto se consegue procurando fazer as diferenças entre as flechas medidas e projetadas, menores possíveis.

b.4. SEGUNDO EXEMPLO NUMÉRICO COMPLETO DO CÁLCULO DE ARREDONDAMENTO POR MEIO DE FLECHAS NOVAS PROJETADAS.

- LEVANTAMENTO DE CAMPO (FLECHAS ANTIGAS):

ESTACAS	FLECHAS ANT. (mm)
0	0
1	5
2	5
3	12
4	5
5	15
6	15
7	18
8	30
9	40

ESTACAS	FLECHAS ANT. (mm)
10	84
11	86
12	107
13	105
14	120
15	102
16	90
17	103
18	103
19	90

ESTACAS	FLECHAS ANT. (mm)
20	112
21	110
22	91
23	85
24	85
25	60
26	31
27	20
28	6
29	0
30	0

- OS GRÁFICOS SEGUINTE MOSTRAM:

- (a) DIAGRAMA DE FLECHAS ANTIGAS (LINHA CHEIA FINA)
- (b) DIAGRAMA DE FLECHAS PROJETADAS APÓS IGUALDADE  $\sum f_a = \sum F_a$  VERIFICADA (LINHA TRACEJADA)
- (c) DIAGRAMA DE FLECHAS NOVAS (LINHA CHEIA GROSSA)

- AS CORREÇÕES DO MOMENTO (-253) NO ALGORITMO FORAM:

$$M' = (-5 \times 8) + (-5 \times 10) + (-5 \times 12) + (2 \times 23) + (3 \times 24) + (5 \times 28) + (5 \times 29) = -40 - 50 - 60 + 46 + 72 + 140 + 145 = +253$$

$$\therefore \sum M_{(b)} = 0$$

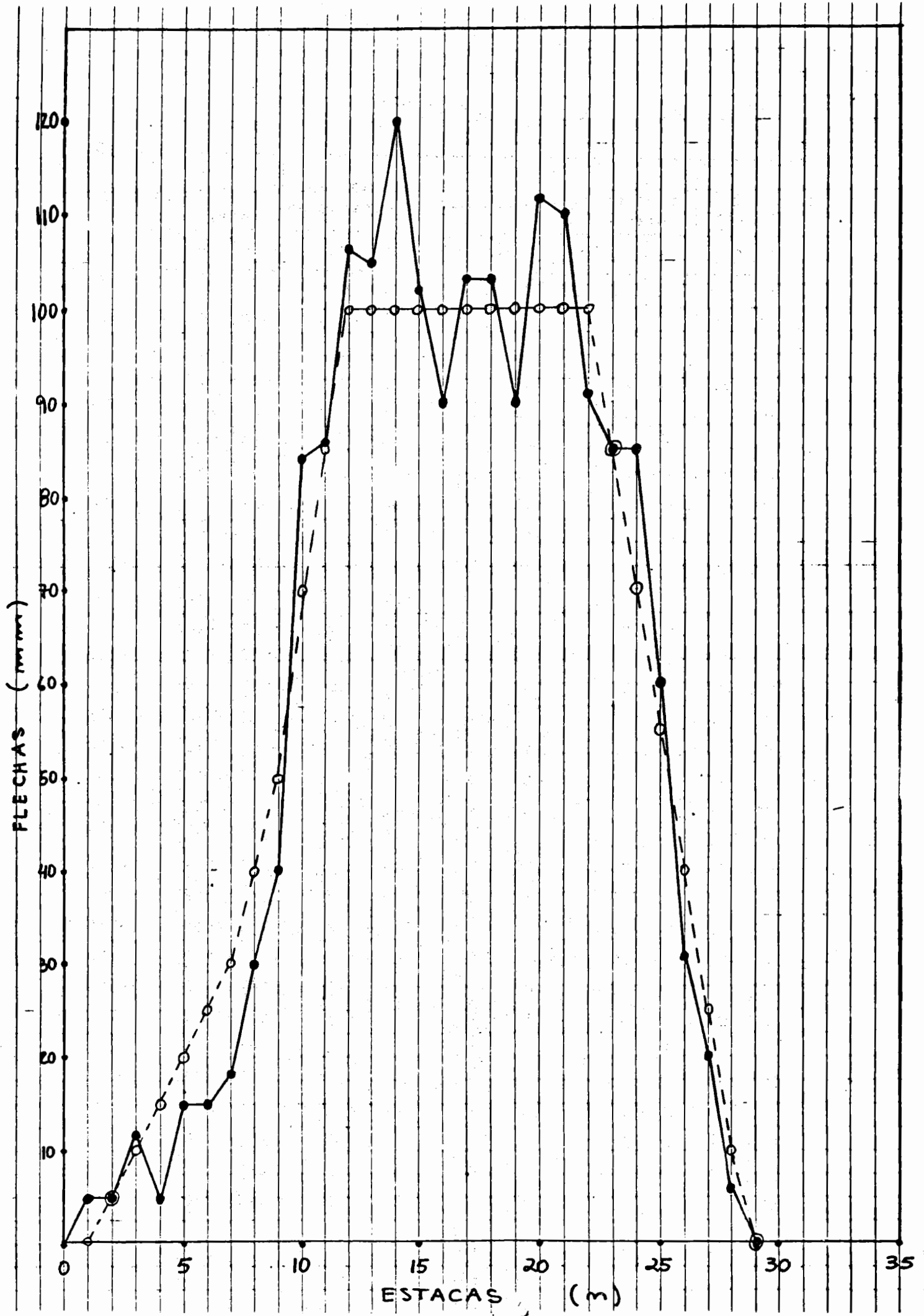


FIG. 6. 10 b.



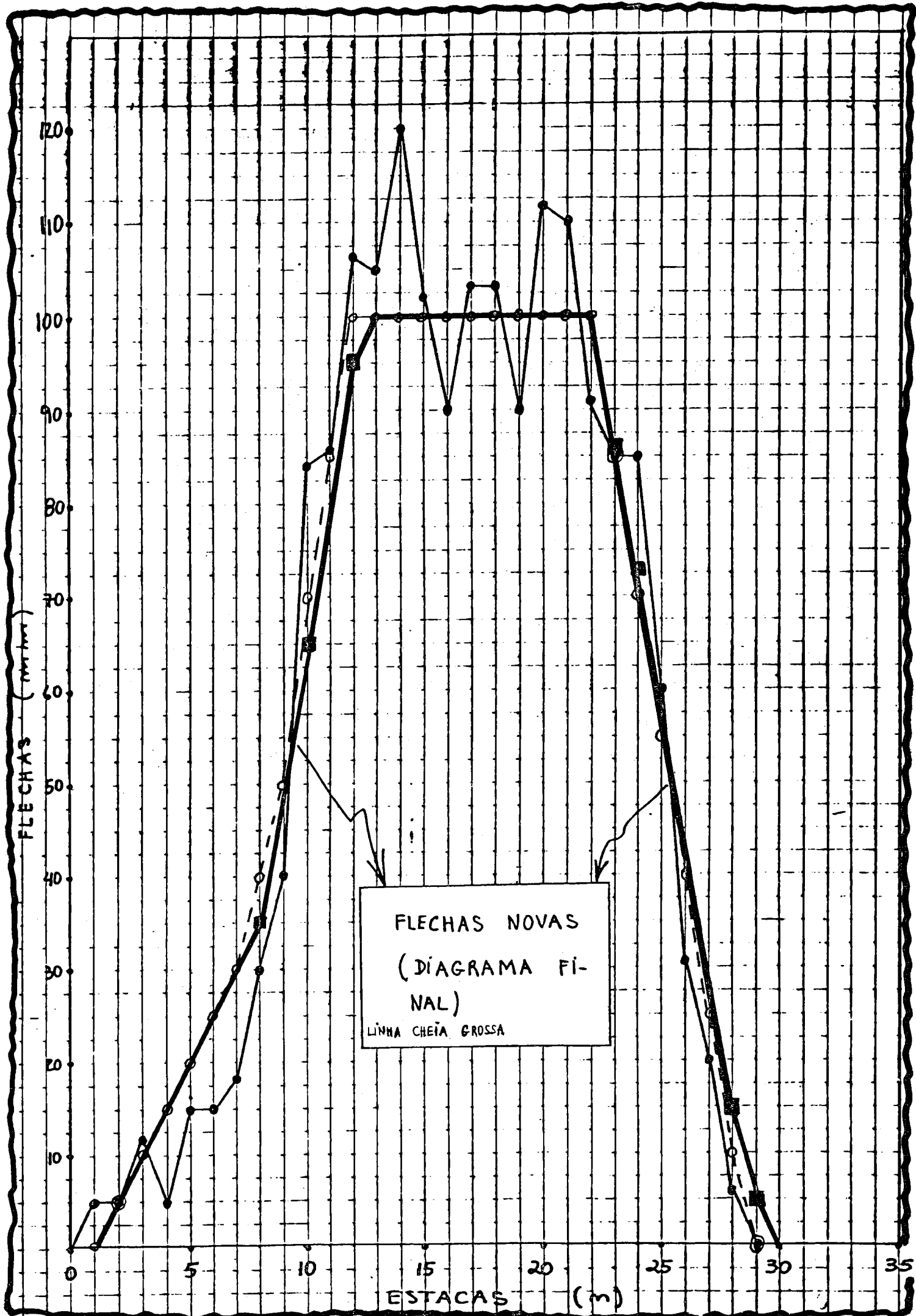


FIG. 6.10 c

c. CORREÇÕES LOCALIZADAS

O Método das correções localizadas visando a obtenção das flechas Novas Projetadas, é, basicamente, igual ao visto anteriormente (Diagrama de Flechas) só que as alterações de flechas nas estacas devidas são realizadas de tal maneira que se conservam as condições fundamentais de equilíbrio dos diagramas de flechas antigas e diagrama de flechas novas. Assim conservam-se  $\sum_{i=1}^m f_i = \sum_{i=1}^m P_i$  (ou  $\sum_{i=1}^m (f_i - P_i) = 0$ ) e  $\sum M = 0$ , isto é, respectivamente somatória dos valores das flechas antigas igual à somatória dos valores das flechas novas e somatória dos momentos relativos às alterações de flechas (conforme visto anteriormente) também igual à zero.

Nesse processo portanto, as novas flechas, são obtidas das antigas, mas de maneira um pouco diferente do processo anterior.

Aplicam-se nas flechas antigas, compensações localizadas por meio de analogia com o momento da física, transformando-se as mesmas em uma nova sequência que esteja mais correta ou mais próxima à um trapézio segundo o diagrama de flechas. Deve-se fazer as compensações de maneira a não alterar a soma das flechas e o respectivo momento. Segue um exemplo de cálculo de novas flechas: (Quadro 6.10).

ESTACAS	FLECHAS ANTIGAS (mm)	CÁLCULOS										FLECHAS NOVAS (mm)
0	0											0
1	2									(+1)		3
2	8									(-2)	(-2)	4
3	1		(+4)							(+1)		6
4	7		↑									7
5	10											10
6	11											13
7	22		(-4)									22
8	34		↑							(+2)		36
9	61		↑		(-8)	(+2)						55
10	70		(+8)									78
11	93		↓				(+2)					95
12	103		↓									101
13	105		(-4)									101
14	100		↓									100
15	100		(+4)									100
16	104									(-4)	(-1)	100
17	102									(+2)	(+1)	100
18	101									(-1)		100
19	104						(-4)					100
20	100											100
21	95						(+2)					95
22	73											73
23	59											59
24	39									(+2)		41
25	21											21
26	12										(+1)	13
27	5						(+2)					7
28	2											4
29	1										(+2)	1
30	0											0
Σ 2545												Σ 1545

Σ M<sub>0</sub>(+) = 398  
 Σ M<sub>0</sub>(-) = 398 (\*)

QUADRO 6.10

(\*) = "MOMENTOS" EM RELAÇÃO À ESTACA "0" (ZERO)



Como se ve no exemplo, as compensações são feitas de maneira que a soma dos momentos, e a variação da soma das flechas são nulas. Não se deve esquecer que são sempre tomadas três estacas -- igualmente espaçadas. Ex:

ESTACAS	MUDANÇA DO VALOR DAS ESTACAS	MOMENTO EM RELAÇÃO A ESTACA 0
7	-4	-28
10	+8	+80
13	-4	-52
	0	$\sum M_0 = 0$



Pode-se aplicar alguns recursos ( análogos aos já vistos anteriormente ) , para melhor desenvolver o método . Como exemplo, na estaca "15" foi anulado o aumento da flecha de "4", mas compensou-se com o aumento de "2" na flecha da estaca "9" e "2" na flecha da estaca "21". Vemos que as estacas "9" e "21" são igualmente espaçadas em relação à estaca "15" e que a soma das flechas, não se alterou e também não se alterou o momento resultante , isto é ,  $M = 0$  .

Obtidas as novas flechas, procede-se análogamente ao método anterior, para se calcular os puxamentos. Observa-se, fundamentalmente, que neste processo não haverá necessidade de se calcularem as flechas, pois elas já estão balanceadas e as tangentes coincidirão no fim da curva. Isso quer dizer que já no primeiro cálculo as metades dos puxamentos darão zero, para as estacas finais: quadro -- 6.11). Como complemento de verificação (Possíveis erros de contas) -- usam-se durante a sua execução, as igualdades já conhecidas:

$$\sum_{i=1}^n f_i = \sum_{i=1}^n F_i$$

$$\sum_{i=1}^n (f_i - F_i) = 0$$

ALGORITMO :

ESTACAS	FLECHAS ANTIGAS mm	FLECHAS PROJETADAS mm	DIFERENÇAS 	SOMA DAS DIFERENÇAS 	METADE DO PUXAMENTO	PUXAMENTO mm
0	0	0	0	0	0	0
1	2	3	-1	-1	0	0
2	8	4	4	3	-1	-2
3	1	6	-5	-2	2	4
4	7	7	0	-2	0	0
5	10	10	0	-2	-2	-4
6	11	13	-2	-4	-4	-8
7	22	22	0	-4	-8	-16
8	34	36	-2	-6	-12	-24
9	61	55	6	0	-18	-36
10	70	78	-8	-8	-18	-36
11	93	95	-2	-10	-26	-52
12	103	101	2	-8	-36	-72
13	105	101	4	-4	-44	-88
14	100	100	0	-4	-48	-96
15	100	100	0	-4	-52	-104
16	104	100	4	0	-56	-112
17	102	100	2	2	-56	-112
18	101	100	1	3	-54	-108
19	104	100	4	7	-51	-102
20	100	100	0	7	-44	-88
21	95	95	0	7	-37	-74
22	73	73	0	7	-30	-60
23	59	59	0	7	-23	-46
24	39	41	-2	5	-16	-32
25	21	21	0	5	-11	-22
26	12	13	-1	4	-6	-12
27	5	7	-2	2	-2	-4
28	2	4	-2	0	0	0
29	1	1	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
$\Sigma$	1545	1545	0			

QUADRO 6.11.

- OS DIAGRAMAS DE FLECHAS (ANTIGAS E NOVAS), FICARIAM:

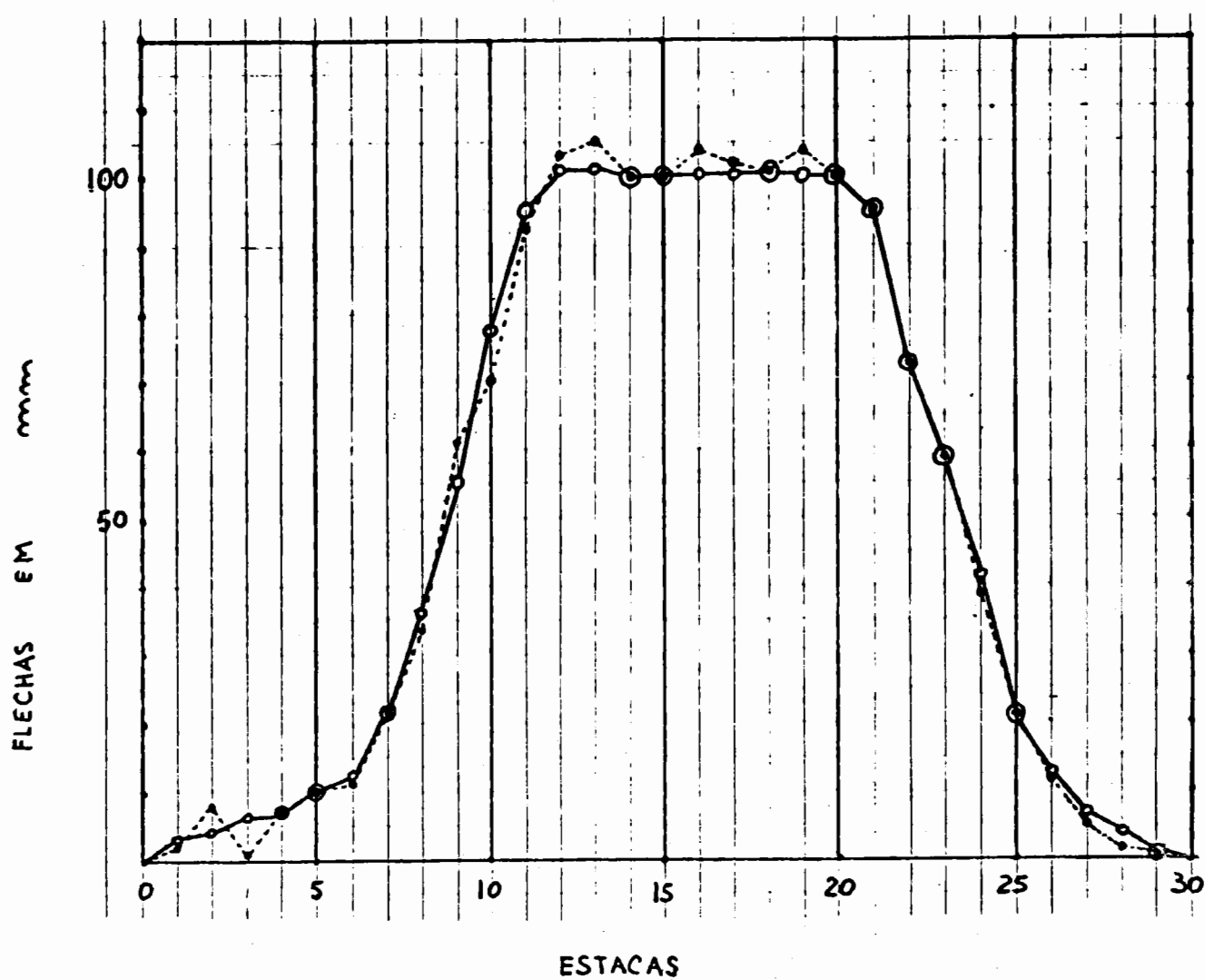
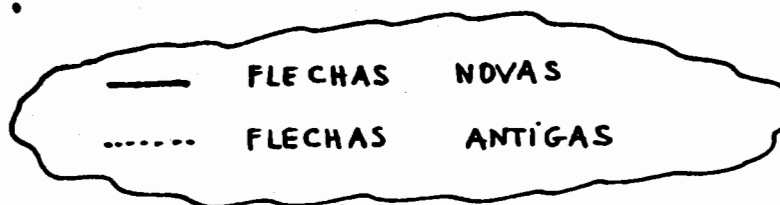


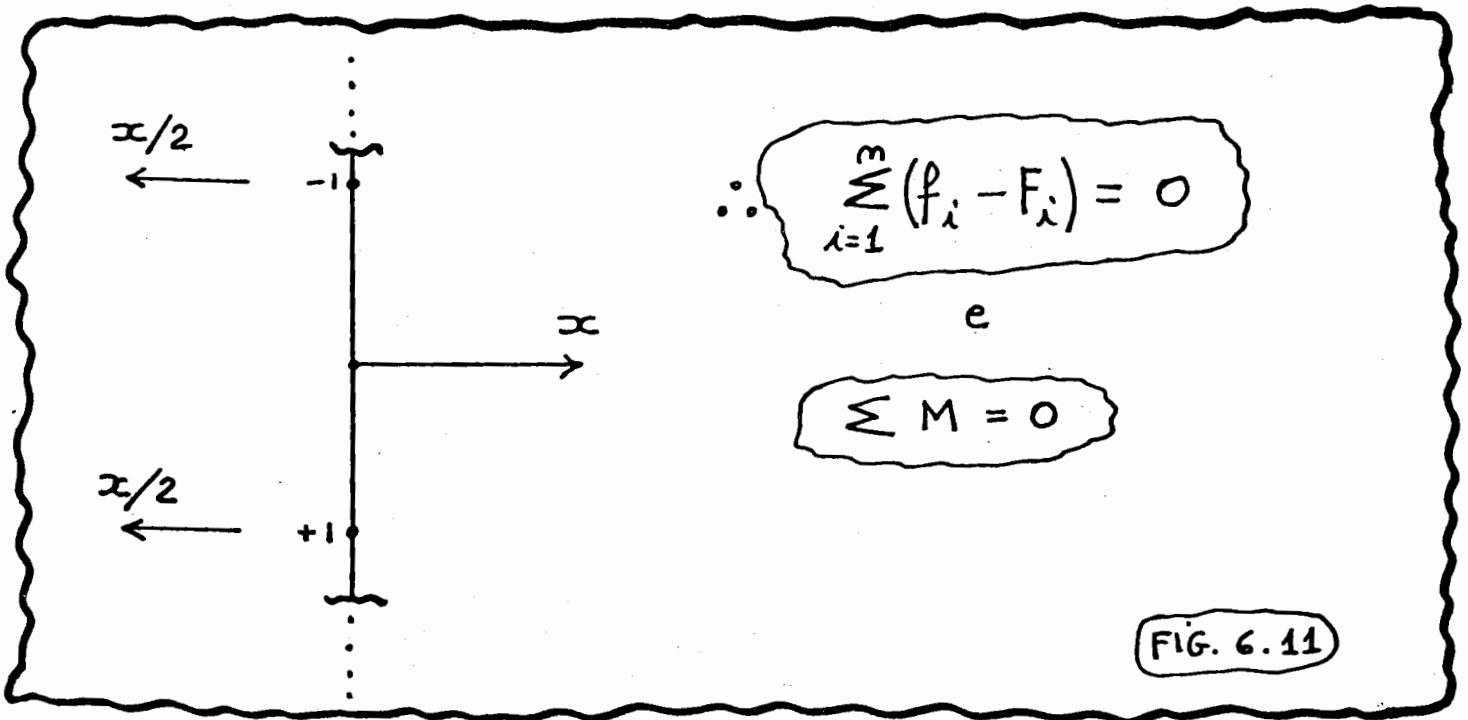
FIG. 6.10 d

6.7- APLICAÇÕES PRÁTICAS DO PRINCÍPIO DOS TRÊS PONTOS

Conforme visto na teoria respectiva , as alterações de flechas relativas ao "Princípio dos Três Pontos" e devido a um deslocamento físico de uma estaca qualquer , para dentro ou para fora da curva , são feitas em conjunto de três , isto é , para uma alteração de flecha segundo um valor x , as flechas adjacentes serão alteradas , segundo valores -x/2 e segundo a sua sequencia :

-x/2 ; x ; -x/2

Portanto, uma correção desse tipo, não só não altera a área, do diagrama de flechas, como também não provoca paralelismo entre o fim da curva e a tangente consequente, pois  $\sum M = 0$ , automaticamente:



Em sequência, serão vistos dois processos semelhantes, baseados no Princípio dos Três Pontos.

### 6.7.1- PROCESSOS DAS MARCAS MÓVEIS (FICHAS MÓVEIS) (EURO BRANDÃO)

Esse processo, permite a determinação dos puxamentos necessários à correção das curvas, sem qualquer cálculo gráfico ou analítico, suprimindo a falta do calculador de curvas (que se verá a seguir).

Sobre uma prancheta, afixa-se um papel quadriculado onde numa escala qualquer marca-se com alfinetes de mapa, mediante dois eixos de coordenadas, as flechas medidas e as respectivas estacas, vide figura abaixo:

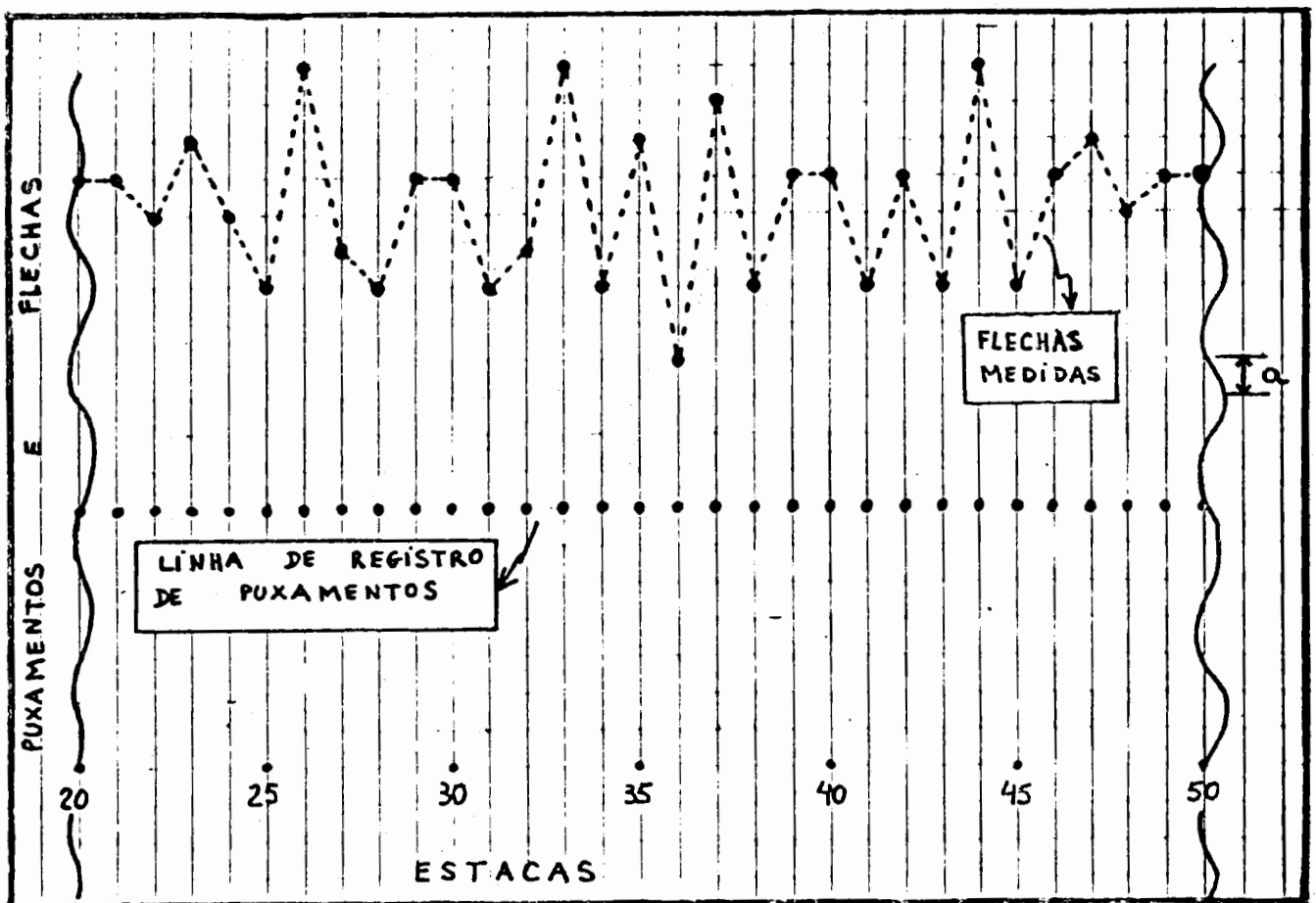
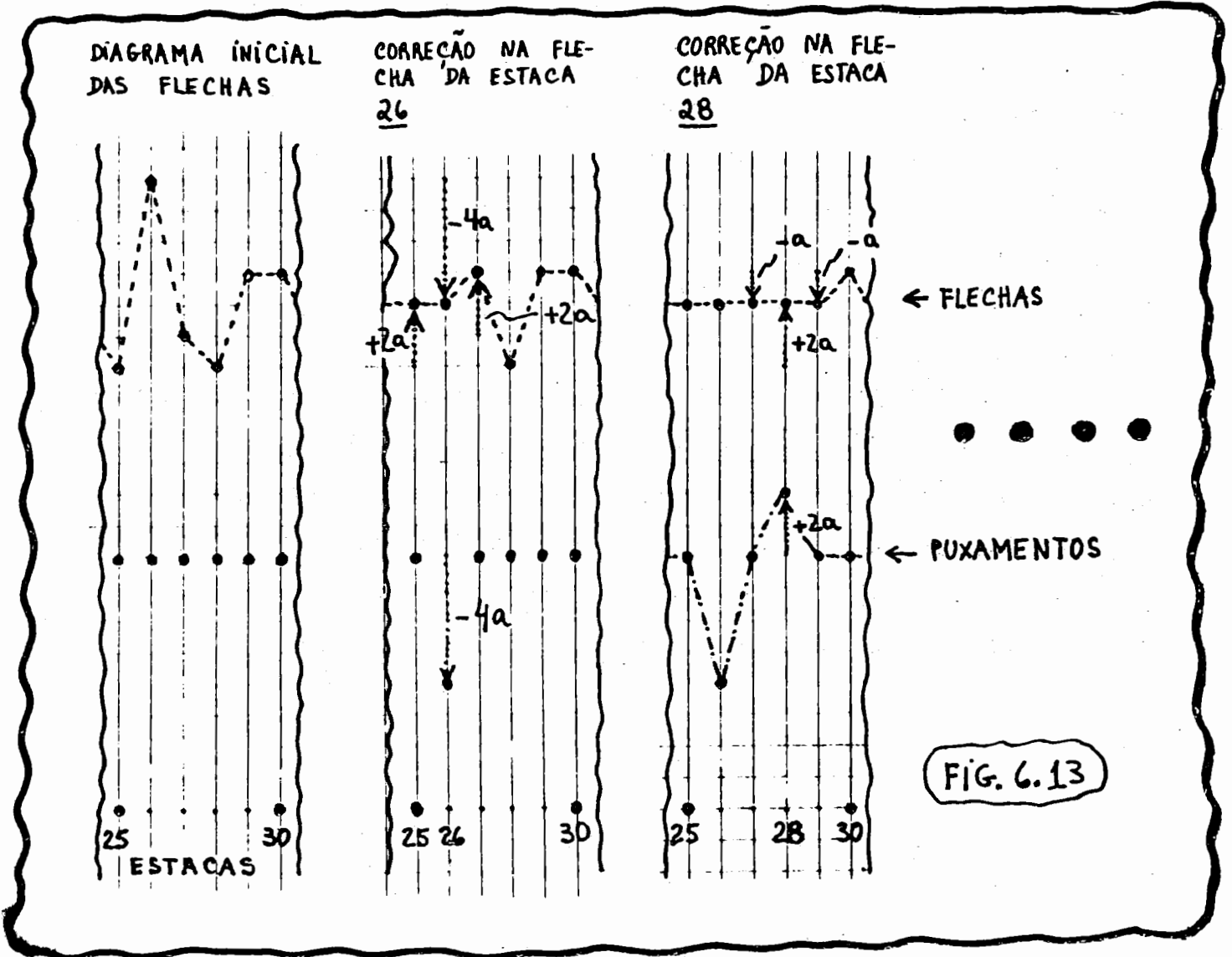


FIG. 6.12

$Q$  = Unidade pré estabelecida para medida dos valores das flechas (variável conforme necessidade e dimensão das flechas em questão); fixa também, o provável erro que se admite no cálculo.

Prepara-se também uma linha horizontal de marcas que se denomina linha de registro (vide figura). Em seguida procura-se movimentar as marcas correspondentes às flechas para posições mais favoráveis à regularização das curvas, conforme exemplo abaixo:



NOTAS:

- PUXAMENTO POSITIVO → ACIMA DA LINHA DE REGISTRO DOS PUXAMENTOS (CONSEQUÊNCIA DE AUMENTO DO VALOR DA FLECHA RESPECTIVA OU, FÍSICAMENTE, PUXAMENTO DA LINHA PARA FORA); ESTACA 28.
- PUXAMENTO NEGATIVO → ABAIXO DA LINHA DE REGISTRO DOS PUXAMENTOS (CONSEQUÊNCIA DE DIMINUIÇÃO DO VALOR DA FLECHA RESPECTIVA OU, FÍSICAMENTE, PUXAMENTO DA LINHA PARA DENTRO); ESTACA 26.



Maneira de aplicar o processo:-

- a) Introduz-se uma correção em uma marca de cada vez.
- b) Aplica-se essa correção introduzida na linha de registro, na mesma estaca e com o mesmo valor e sentido.
- c) Procede-se às correções consequentes nas duas flechas adjacentes segundo um valor de metade da correção introduzida com sinal trocado, sem levar os mesmos à linha de registro (variação exclusiva das flechas adjacentes, conforme visto na teoria).
- d) repete-se sucessivamente a operação até o diagrama atingir o aspecto desejado.

Facilmente se adquire a prática de utilização desse processo, que tem todas as vantagens da calculadora embora com um pouco mais de demora. As marcas deslocadas para cima da linha de registro correspondem na escala, a puxamentos para fora da curva (puxamento positivo) e aquelas para baixo correspondem a puxamentos para dentro da curva (puxamentos negativos).

## 6.7.2- CÁLCULO DE ARREDONDAMENTO POR MEIO DE MÁQUINAS

(Ex:  $\rightarrow$  Calculador Múltiplo MATISA)<sup>(\*)</sup>

O calculador MATISA, materializa, na forma e nas escalas habituais, o diagrama de um traçado. Permite obter, rapidamente, sem cálculo, partindo-se das flechas medidas " $f_i$ ", as novas flechas " $F_i$ " e o "puxamento correspondente p".

Fundamentalmente, é idêntico ao processo das fichas móveis; pode-se dizer que é uma automatização desse método com sistemas mecânicos que, acoplados a uma estaca, indicam em um mostrador o puxamento e a alteração de flecha dessa estaca e as alterações de flechas das estacas adjacentes a ela (segundo um valor de metade daquele primeiro introduzido e com sentido inverso).

Obtido um diagrama aceitável, copia-se diretamente os valores registrados, passando-os para os formulários.

Portanto, as necessárias rotações das engrenagens, transformam rapidamente o diagrama das flechas a retificar, em um diagrama com novas flechas aceitáveis.

As novas flechas  $F_i$ , são dadas diretamente pela posição do índice de cada haste ao longo da graduação milimétrica correspondente. As flechas são modificadas de uma forma contínua ao curso das manipulações das engrenagens e são avaliadas com aproximação de milímetro.

O calculador MATISA é composto de unidades, que podem trabalhar sozinhas ou acopladas em duas ou mais unidades, e cada unidade permite materializar um diagrama de 30 flechas.

Para se arredondar uma curva, com mais de 30 flechas, em uma só unidade do calculador, faz-se o arredondamento por parcelas; colocam-se na máquina, inicialmente, 30 flechas e faz-se o arredondamento daquela parte; para continuar arredondando a curva, não se inicia da estaca 30, onde se tinha parado, mas sim, um pouco antes, por exemplo da estaca 20 sendo que da estaca 20 até a 30 colocam-se as flechas já arredondadas e assim por diante.

É necessário haver sobreposição das curvas, pois ao se continuar o arredondamento, poderá haver arredondamentos consequentes que atingem estacas de valor inferior à 30.



NOTA: Calculado um arredondamento de curva através de máquinas, deve-se fazer as verificações de estaca em estaca, conforme visto anteriormente.

Toma-se por exemplo, um trecho de um arredondamento qualquer feito à máquina. Verifica-se a estaca 8; tem-se:-

ESTACAS	$f_i$	$F_i$	$P_i$
7	150	125	-750
8	150	125	-700
9	150	125	-600

Sequência de verificação:-

Ⓘ = -750-600

Ⓜ =  $\frac{-750 - 600}{-2} = \frac{-1350}{-2} = +675$

ⓂⓂ = -700+675 = -25

ⓂⓂⓂ =  $f_8 + (25) = 150 - 25 = 125$

ⓂⓂⓂⓂ =  $|\text{ⓂⓂⓂⓂ} - F_8| = |125 - 125| = 0$

Nesse caso, conforme visto, o valor em módulo de  $|\text{ⓂⓂⓂⓂ} - F_8|$  seria aceitável até 2 mm (valor adotado na ex- C.P.E.F.); isto é:

OBSERVAÇÃO : - Na máquina calculadora de curvas, deve-se tentar girar as engrenagens o mínimo possível para não se introduzirem erros excessivos no diagrama das flechas corrigidas em virtude das próprias engrenagens apresentarem pequenos erros de transmissões; esses erros, acumulados em várias operações das engrenagens, poderão acarretar um desvio muito grande ou inadequado, no final dos cálculos. Portanto, restringe-se esse desvio total no final dos cálculos a um valor que obedeça à expressão :

$|\text{ⓂⓂⓂⓂ} - F_8| \leq 2 \text{ mm}$

ONDE ⓂⓂⓂⓂ É DADO PELA EXPRESSÃO VISTA ATRÁS

## EXEMPLO:

- ARREDONDAMENTO DE UMA CURVA FEITO COM O CALCULADOR MÚLTIPLO PARA CORREÇÃO DE CURVAS "MATISA".
- CURVA ENTRE PEDERNEIRAS E CARAJÁS (Nº 5); DESENVOLVIMENTO 1040,00 m (EX - C.P.E.F.) - 1967
- ESTACA 0 NO km 307 + 575,0 m
- CURVA A ESQUERDA; VELOCIDADE DE 120 km/h; BITOLA 1,60 m.

Estacas (números)	Flechas (mm)		Puxamen to (mm)
	Antigas	Novas	
0	0	0	0
1	2	1	0
2	0	2	+3
3	2	4	+1
4	12	7	-4
5	12	11	0
6	10	14	+5
7	23	18	0
8	18	22	+5
9	32	27	0
10	26	31	+5
11	38	34	0
12	39	36	+2
13	39	38	+9
14	35	40	+16
15	37	41	+13
16	44	41	+4
17	45	41	0
18	37	41	+5
19	44	41	+4
20	43	41	+9
21	34	41	+17
22	39	41	+13
23	45	41	+2
24	37	43	-1
25	49	45	-17
26	58	45	-24
27	39	45	-6
28	39	45	-1
29	53	45	-8
30	42	45	+3

## EXEMPLOS DE VERIFICAÇÃO:

- ESTACA 8:

$$0+0 = 0$$

$$\frac{0}{-2} = 0$$

$$0+5 = 5$$

$$18+5 = 23$$

$$|23 - 22| = 1 < 2 \text{ mm}$$

#

- ESTACA 19:

$$5+9 = 14$$

$$\frac{14}{-2} = -7$$

$$-7+4 = -3$$

$$44-3 = 41$$

$$|41 - 41| = 0 < 2 \text{ mm}$$

#

- ESTACA 25:

$$-1-24 = -25$$

$$\frac{-25}{-2} = 12,5$$

$$-17 + 12,5 = -4,5$$

$$49 - 4,5 = 44,5$$

$$|44,5 - 45| = 0,5 < 2 \text{ mm}$$

Estacas (números)	Flechas (mm)		Diferença to ma
	Antigas	Novas	
31	41	45	+4
32	49	45	-2
33	39	45	+1
34	49	45	-7
35	53	45	-4
36	40	45	+15
37	38	41	+27
38	35	41	+34
39	38	41	+25
40	46	41	+10
41	48	42	+2
42	42	45	+2
43	37	45	+7
44	52	45	-10
45	46	45	-15
46	43	45	-15
47	47	45	-17
48	50	45	-15
49	47	44	-3
50	40	44	+14
51	32	44	+25
52	45	44	+12
53	48	44	0
54	49	44	-3
55	48	44	+3
56	44	45	+17
57	32	45	+32
58	40	45	+19
59	53	44	-2
60	47	44	-7
61	47	45	-7
62	48	44	-1
63	38	44	+11
64	44	44	+12
65	44	43	+12
66	41	43	+14
67	36	41	+12

EXEMPLOS DE VERIFICAÇÃO:

• ESTACA 38:

$$25 + 27 = 52$$

$$\frac{52}{-2} = -26$$

$$34 - 26 = 8$$

$$35 + 8 = 43$$

$$|43 - 41| = 2 = 2 \text{ mm}$$

• ESTACA 47:

$$-16 - 13 = -29$$

$$\frac{-29}{-2} = 14,5$$

$$-17 + 14,5 = -2,5$$

$$47 - 2,5 = 44,5$$

$$|44,5 - 45| = 0,5 < 2 \text{ mm}$$

• ESTACA 64:

$$11 + 12 = 23$$

$$\frac{23}{-2} = -11,5$$

$$12 - 11,5 = 0,5$$

$$44 + 0,5 = 44,5$$

$$|44,5 - 44| = 0,5 < 2 \text{ mm}$$

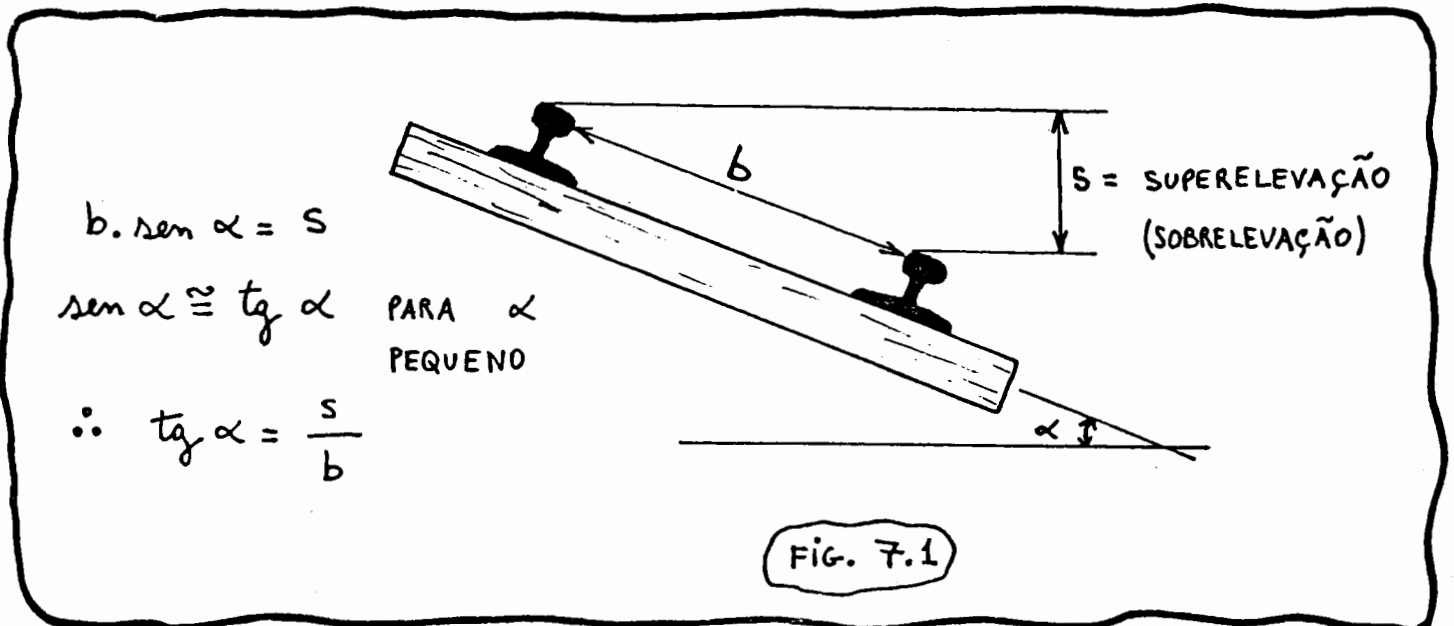
Estacas números	Flechas mm		Incrasmen to mm
	Antigas	Novas	
68	41	42	-1
69	47	42	-15
70	54	42	-20
71	33	43	0
72	44	44	0
73	44	44	0
74	36	42	0
75	42	41	-12
76	50	40	-20
77	33	40	-12
78	38	41	-16
79	40	41	-25
80	47	42	-33
81	43	42	-33
82	39	42	-32
83	44	42	-35
84	45	42	-36
85	48	42	-32
86	31	41	-27
87	45	36	-19
88	33	36	-9
89	33	34	-5
90	32	32	-2
91	28	29	+1
92	27	27	0
93	26	24	0
94	22	22	-3
95	12	19	-7
96	18	15	-2
97	18	12	-5
98	5	9	+3
99	3	5	+5
100	3	3	+3
101	3	2	0
102	0	0	0
103	0	0	0
104	0	0	0

## 7 - CONSIDERAÇÕES RELATIVAS A SOBREVLEVAÇÃO

### 7.1- ESCOLHA DA SUPERELEVAÇÃO NAS ESTRADAS DE FERRO

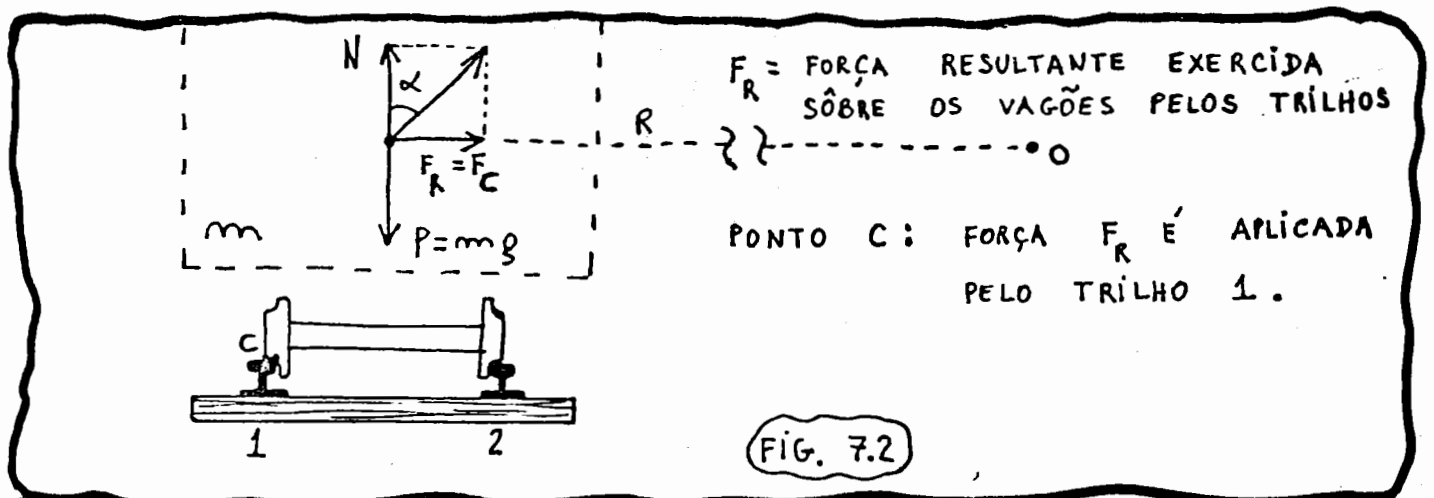
Nas estradas de ferro, a escolha de uma superelevação tem grande importância, principalmente porque proporciona aos passageiros, condições de conforto adequadas e evita excessivos esforços sobre a superestrutura, o que acarretaria altas despesas de conservação da via permanente, desgastes anormais dos trilhos nas curvas, etc.

Nas estradas de rodagem, a superelevação foi sempre expressa em % de inclinação transversal das pistas; porém em ferrovias, expressa-se a superelevação como a diferença de altura (S) entre os topos dos trilhos; (V. fig. 7.1):



### 7.2- CONDIÇÕES GERAIS

Suponha-se, segundo a figura, que o vagão de massa " $m$ " se aproxime do leitor, com uma velocidade  $V$ , descrevendo uma curva de raio  $R$ , cujo centro se encontra a direita da figura 7.2.:



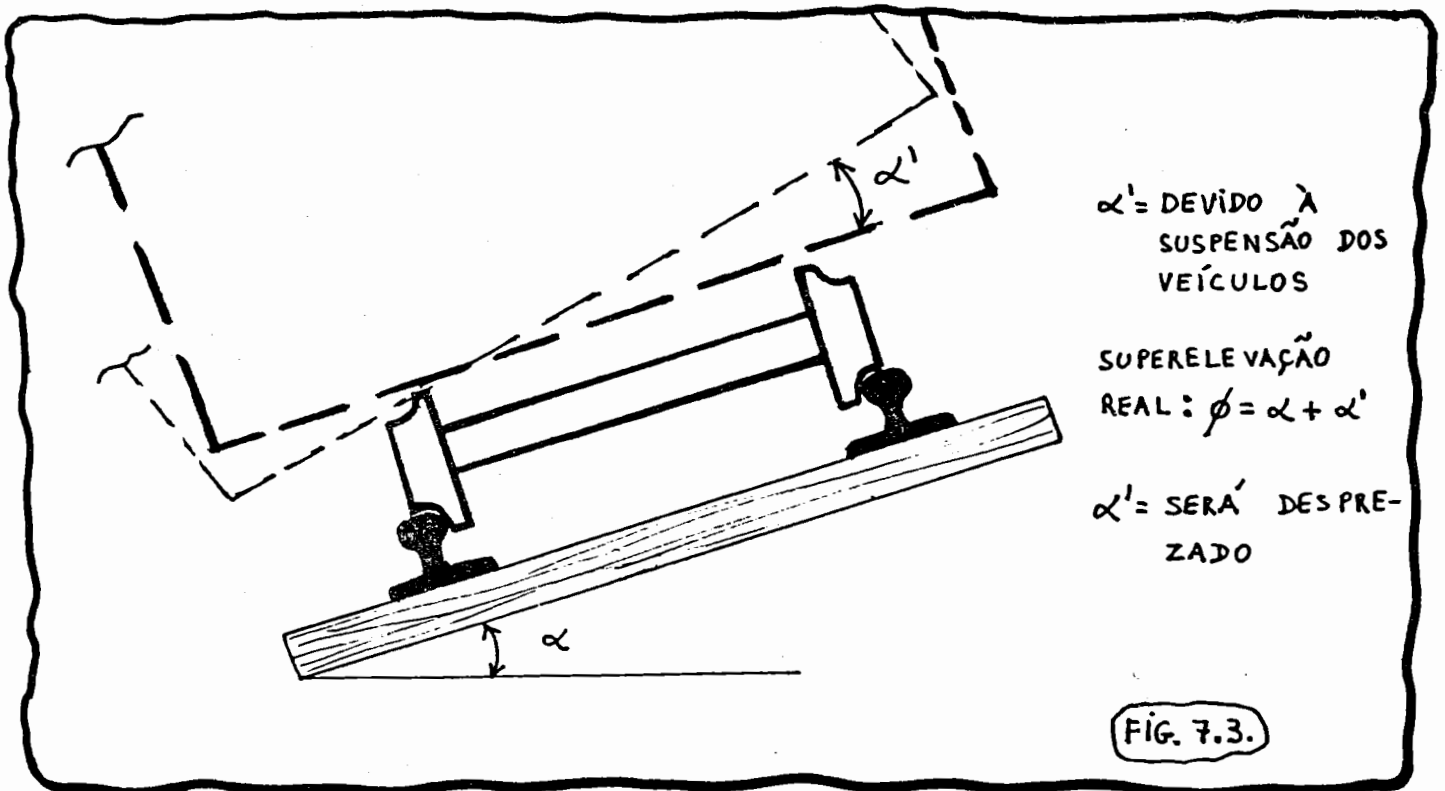
Para que o vagão descreva uma trajetória circular, é necessário que exista uma força centrípeta igual a  $\frac{mV^2}{R}$  com direção perpendicular à trajetória e sentido para o centro "O" do círculo descrito. Esta força, como se pode observar pela figura acima, é dada pela reação horizontal do trilho (1) sobre o rebordo da roda de aço do conjunto. Para efeito de simplificação, considerar-se-ão todas as forças aplicadas no "C.M." do veículo; (C.M. = CENTRO DE MASSA).

Se os trilhos tivessem sido convenientemente superelevados de um ângulo

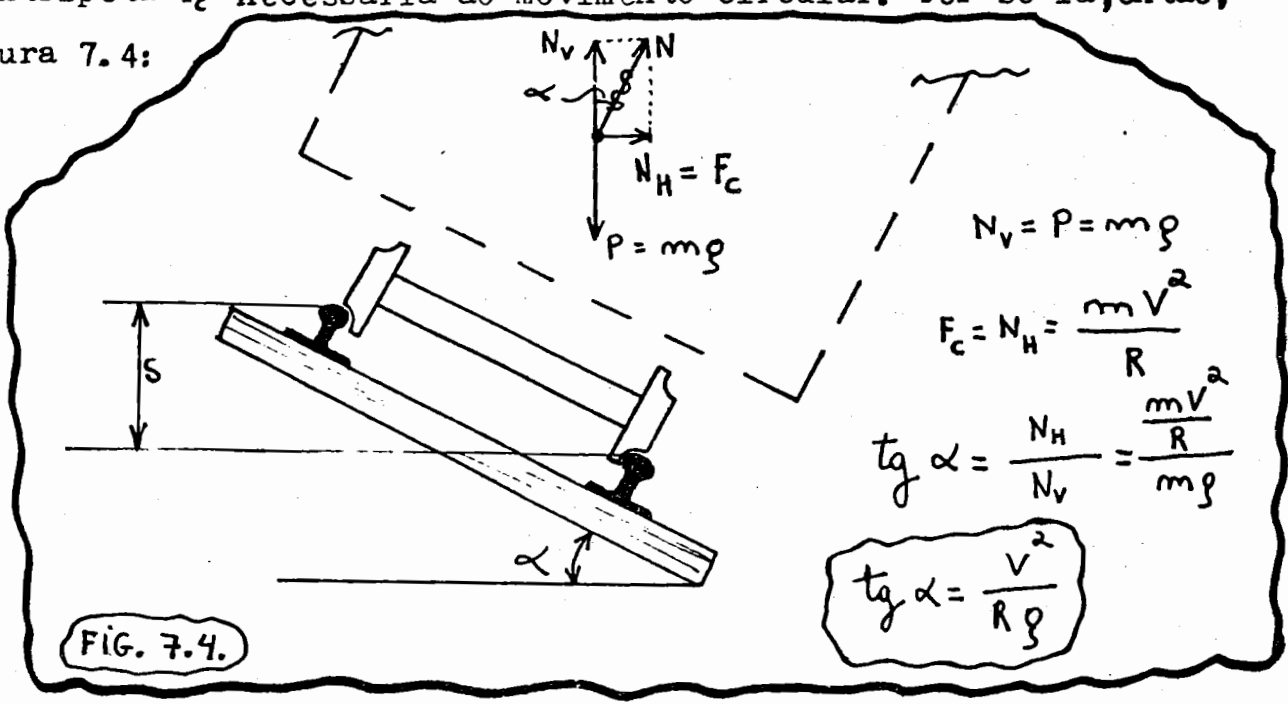
$$\alpha = f(v, R)$$

a componente de reação normal "N" na direção requerida pela força centrípeta evitaria esforços horizontais no rebordo das rodas, como na figura anterior.

NOTA:- Não se considerarão, para efeito de simplificação, as variações de sobreelevação consequentes das suspensões dos vagões, carros e outros veículos ferroviários; (V. ex. da fig. 7.3):



Portanto, a componente vertical da reação "N" igualaria o peso do conjunto, e a componente horizontal da mesma forneceria a força centrípeta  $F_c$  necessária ao movimento circular. Ter-se-ia, então, a figura 7.4:



Nas figuras 7.2 e 7.4, pode-se observar que a resultante dos sistemas de forças nos dois casos, é a mesma  $|\vec{F}_c|$  e com módulo

$$F_c = \frac{m v^2}{R}$$

O ângulo " $\alpha$ " de sobrelevação da fig. 7.4 é igual ao ângulo da figura 7.2; Portanto:

$$tg \alpha = \frac{m v^2}{R m g} = \frac{v^2}{R g}$$

Para se chegar ao valor da sobrelevação S, pode-se fazer, para os valores de " $\alpha$ " pequenos,  $sen \alpha = tg \alpha$

$$sen \alpha = \frac{s}{b} \quad \therefore \quad tg \alpha \approx \frac{s}{b}$$

Substituindo na expressão anterior:

$$\frac{s}{b} = \frac{v^2}{R \cdot g} \quad \text{ou} \quad S = \frac{b \cdot v^2}{R \cdot g}$$

Ve-se pois que  $S = f(\vec{V}, R)$  ou, mais especificamente, " $\underline{S}$ " é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade ( $V$ ) e inversamente proporcional ao raio ( $R$ ) da trajetória descrita. Daí a importância em se escolher uma velocidade média para se projetar estradas de ferro e de rodagens.

### 7.3- SUPERELEVÇÃO EQUILIBRADA

Essa determinada superelevação em que as reações são exclusivamente normais ao plano inclinado é que se chama de Superelevação Equilibrada.

Mas, devido a diversa variedade de trens que usam a linha, em diferentes velocidades, não é possível que exista um valor de " $\underline{S}$ " que satisfaça a todos os casos. Algum esforço lateral, adicional ou subtrativo à componente horizontal da força normal ao plano inclinado do movimento do veículo, aparecerá então, sempre que a velocidade for diferente daquela projetada para a superelevação " $\underline{S}$ " em função do determinado raio " $\underline{R}$ " fixo, e velocidade " $\underline{v}$ ";

Essa componente de força centrípeta, quando atinge determinado valor, é desaconselhável para o conforto do passageiro, assim como poderá acarretar o movimento interno das cargas de um vagão e, talvez, em casos extremos, ocasionar o descarrilhamento do veículo.

Seguem dois casos básicos para análises teóricas das sobrelevações não equilibradas:

**CASO 1**:- Inclinação suave para a velocidade  $V_{prat}$  do vagão, isto é, a superelevação real da linha é menor que a necessária para o referido problema. Nesse caso portanto,  $V_{prat} > V_{normal}$ .  
(fig. 7.5):



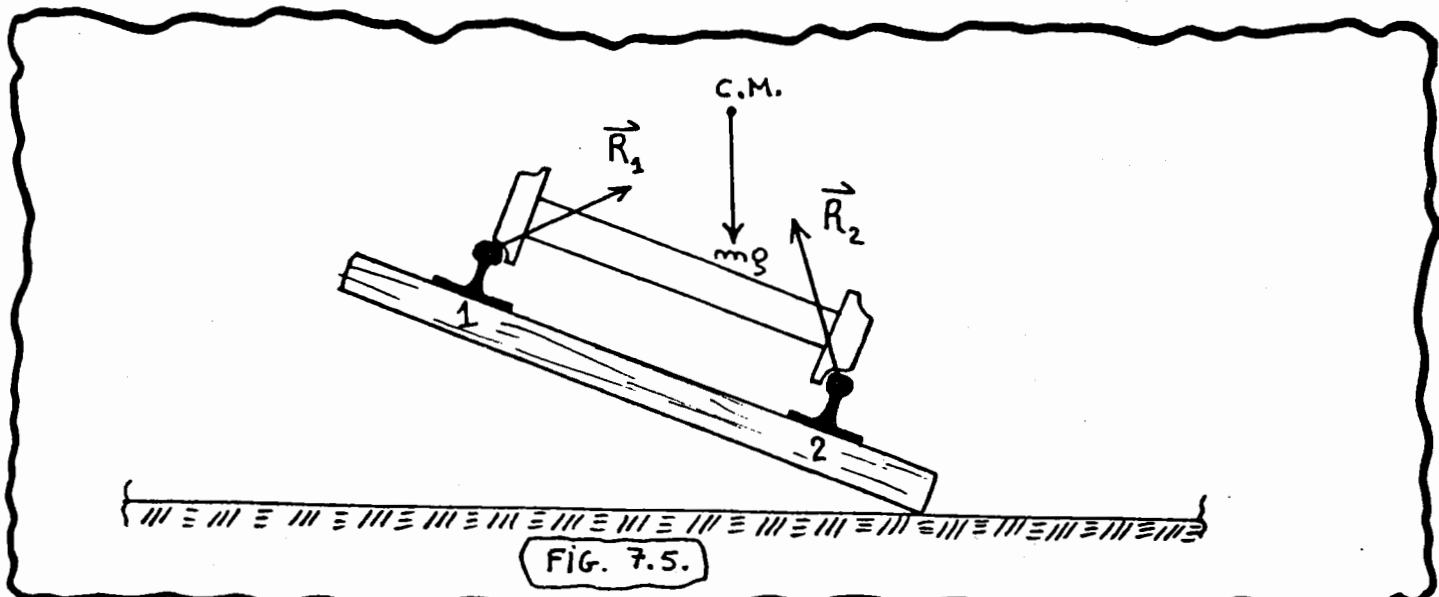


FIG. 7.5.

Centralizando as forças no "C.M." do vagão ter-se-á (fig7.6.):

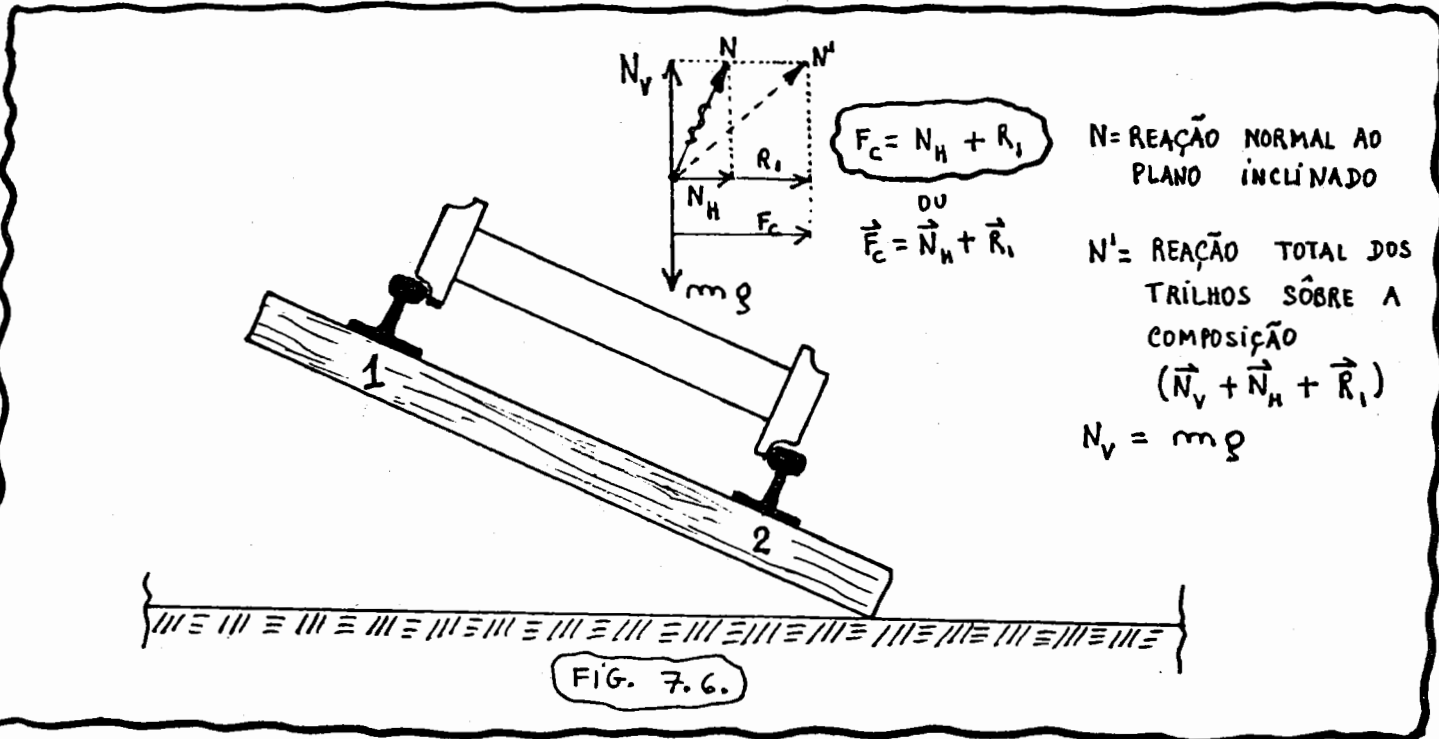


FIG. 7.6.

Para que a composição descrevesse a curva com raio " $R$ " e velocidade acima da calculada ( $V_{prat} > V_{normal}$ ) deverá existir, atuando sobre a composição, uma força centrípeta  $F_c > N_H$ . A reação " $R_1$ " do trilho 1 sobre a roda, fornecerá o complemento para obtenção da força centrípeta adequada, isto é,

$$F_c = N_H + R_1 \quad \text{ou} \quad \vec{F}_c = \vec{N}_H + \vec{R}_1$$

CASO 2:-

Inclinação excessiva para a velocidade " $V_{\text{prat}}$ " do vagão, isto é, a superelevação real da linha é maior que a necessária para o referido problema. Nesse caso, portanto  $V_{\text{prat}} < V_{\text{normal}}$  (fig 7.7).

Centralizando as forças no C.M. do vagão ter-se-á:

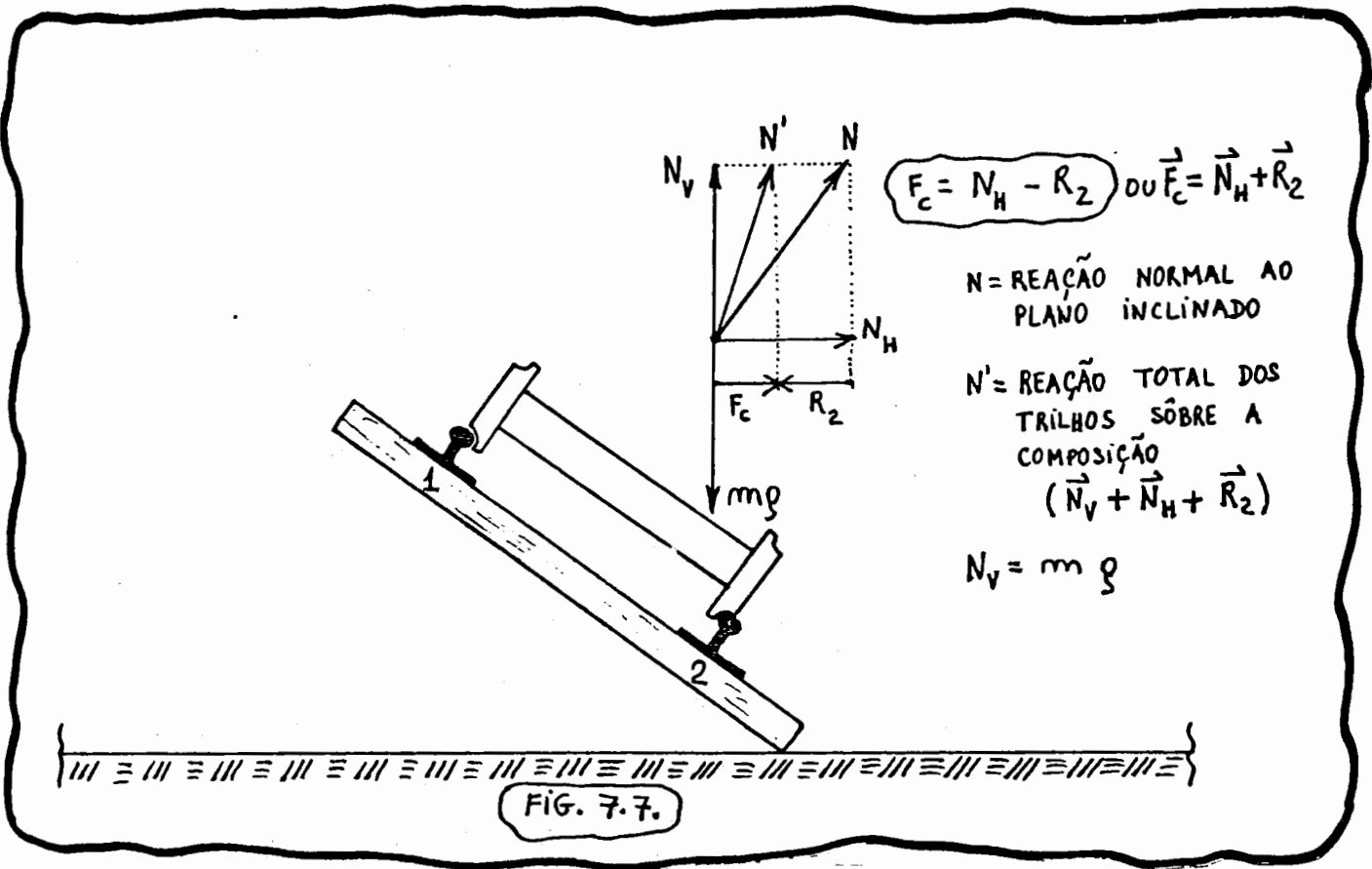


FIG. 7.7.

Para que a composição descrevesse a curva com raio " $R$ " e velocidade abaixo da calculada ( $V_{\text{prat}} < V_{\text{normal}}$ ) deverá existir, atuando sobre a composição, uma força centrípeta  $F_c < N_H$ . A reação " $R_2$ " do trilho sobre a roda, fornecerá o valor adequado que subtraído de " $N_H$ ", acarretará a força centrípeta necessária, isto é, :

$F_c = N_H - R_2$  ou  $\vec{F}_c = \vec{N}_H + \vec{R}_2$

Nota-se que as considerações sobre as fórmulas anteriores, são válidas para os casos extremos em que  $|\vec{F}_c|$  ou  $|\vec{N}_H|$  ou  $|\vec{R}_1|$  ou  $|\vec{R}_2|$  sejam nulos, bastando considerar que as reações " $R$ " sejam aplicadas tanto no trilho ① como no trilho ② em função do problema e dos dados já vistos. Nos casos em que o trem para na parte circular, deve-se considerar também que a linha de ação da força peso passe dentro da bitola. Voltar-se-á a considerar mais tarde o assunto.

Com referência às acelerações nos casos ① e ② , tem-se a considerar que a aceleração centrípeta terá duas componentes que se chamarão " $\gamma_{comp}$ " ( aceleração compensada ) e " $\gamma_{\bar{m}comp}$ " ( aceleração não compensada ).

" $\gamma_{comp}$ " será a componente de " $\gamma_c$ " referente à força componente da reação " $\vec{N}$ " na seção transversal em estudo , isto é , é a aceleração correspondente a " $N_H$ ".

" $\gamma_{\bar{m}comp}$ " será a componente de " $\gamma_c$ " referente às forças de reação  $\vec{R}_1$  e  $\vec{R}_2$  nos boletos dos trilhos , de acôrde com os casos ① e ② anteriores .

O sinal de " $\gamma_{\bar{m}comp}$ " será evidentemente negativo para a reação do trilho interno ( trilho 2 no caso ② ) , e positivo para a reação do trilho externo ( trilho 1 no caso ① ) , tomando-se como referência positiva , o sentido da força centrípeta.

Experimentalmente , segundo as ferrovias alemãs ( D B - German Federal Railway ) e muitas outras ferrovias , os máximos valores de " $\gamma_{\bar{m}comp}$ " adotados foram os seguintes :

case ①:  $\gamma_{\bar{m}comp} = + 0,65 \text{ m/s}^2$

case ②:  $\gamma_{\bar{m}comp} = - 0,98 \text{ m/s}^2$  ( nesse caso , entretanto , o mais racional é admitir-se

a possibilidade de trem parar na curva . Nesse caso , as condições são estudadas estáticamente , em função de onde se quer que a linha de ação da força pêsse passe entre os trilhos )

Resumidamente , ter-se-á :

$\gamma_c = \gamma_{comp} + \gamma_{\bar{m}comp}$

onde :  $\gamma_{comp} = f(m, v, R)$   
 $\gamma_{\bar{m}comp} = f(\text{REAÇÃO DO BOLETO } R)$

e experimentalmente :

$- 0,98 \text{ m/s}^2 \leq \gamma_{\bar{m}comp} \leq + 0,65 \text{ m/s}^2$

EXEMPLOS:

Ⓐ Admitindo-se que:-

$s = 10 \text{ cm}$   
 $b = 1,60 \text{ m}$   
 TR 57 - (ABNT)  
 $R = 400 \text{ m}$

$b \approx 1,67 \text{ m}$

e que  $-0,98 \text{ m/s}^2 \leq \gamma_{\tilde{n} \text{ comp}} \leq 0,65 \text{ m/s}^2$

Calcular a máxima e a mínima velocidade para o trecho, dentro dos padrões confortáveis da DB.

SOLUÇÃO:

$s = \frac{b \cdot v^2}{R \cdot g}$  ;  $v^2 = \frac{s \cdot R \cdot g}{b} = \frac{0,1 \times 400 \times 9,78}{1,67} \approx 234,25 \text{ m}^2/\text{s}^2$

$\therefore v = 15,3 \text{ m/s} = (15,3 \times 3,6) \text{ km/h} = 55,1 \text{ km/h}$

$\gamma_{\text{comp}} = \frac{v^2}{R} = \frac{234,25}{400} = 0,586 \text{ m/s}^2$

• CÁLCULO DA VELOCIDADE MÁXIMA ( $V_{\text{MÁX}}$ ):

$\gamma_c = \gamma_{\text{comp}} + \gamma_{\tilde{n} \text{ comp}} = 0,586 + 0,65 = 1,236 \text{ m/s}^2$

$\gamma_c = \frac{v^2}{R}$  ;  $v^2 = 1,236 \times 400 = 494,4 \text{ m}^2/\text{s}^2$  ;

$v \approx 22,24 \text{ m/s} \approx 80 \text{ km/h}$

• CÁLCULO DA VELOCIDADE MÍNIMA ( $V_{\text{MÍN}}$ );  $V_{\text{MÍN}} = 0$  POIS:

PARA O TREM PARADO, CONDIÇÕES ESTÁTICAS:  $V=0$  ;  $\gamma_c=0$

$\gamma_{\tilde{n} \text{ comp}} = f(R_2)$  ;  $R_2 = m \cdot \gamma_{\tilde{n} \text{ comp}}$

$|\gamma_{\tilde{n} \text{ comp}}| \leq 0,98 \text{ m/s}^2 \therefore R_2 \leq (0,98 \cdot m) \text{ m/s}^2$

$N_H = N_V \cdot \tan \alpha = N_V \cdot \sin \alpha \therefore R_2 = N_H = N_V \cdot \sin \alpha$

$\tan \alpha = \frac{N_H}{N_V}$  ;  $N_V = m \cdot g \therefore R_2 = m \cdot g \cdot \sin \alpha$

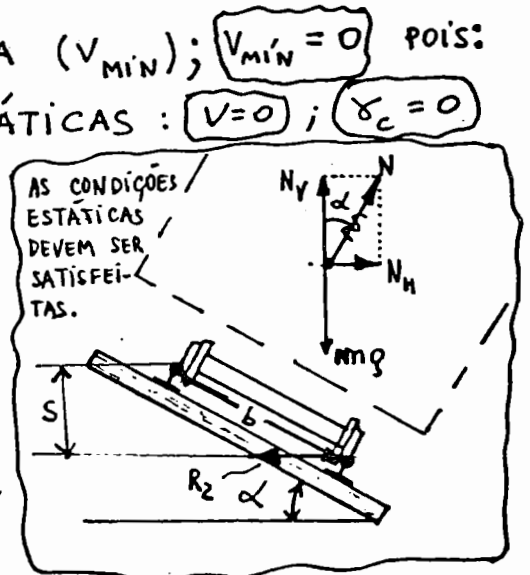
ENTÃO ,  $m \cdot g \cdot \sin \alpha \leq 0,98 \cdot m$  ;  $\sin \alpha = \frac{s}{b}$

$\therefore g \cdot \sin \alpha = g \frac{s}{b} \leq 0,98$

$s = \frac{0,98 \times 1,60}{9,78}$

$\therefore s = 0,16 \text{ m} > 0,10 \text{ m}$  DO PROBLEMA.

$\gamma_{\tilde{n} \text{ comp}} < -0,98 \text{ m/s}^2$



b) ADMITINDO-SE QUE:  $S = 20 \text{ cm}$  (MÁXIMO PRÁTICO DA EX-C.P.E.F. PARA  $b = 1,60 \text{ m}$ );  $b = 1,60 \text{ m}$ ; TR-57 (ABNT)  $\therefore b \cong 1,67 \text{ m}$ ;  $R = 400 \text{ m}$  E QUE  $-0,98 \text{ m/s}^2 \leq \gamma_{\bar{m} \text{ comp}} \leq +0,65 \text{ m/s}^2$  CALCULAR A MÁXIMA

E A MÍNIMA VELOCIDADES PARA O TRECHO.

SOLUÇÃO:

$$S = \frac{bV^2}{Rg} \therefore V = \left( \frac{0,2 \times 400 \times 9,78}{1,67} \right)^{1/2} = 21,65 \text{ m/s} = 77,9 \text{ km/h}$$

$$\gamma_{\text{comp}} = \frac{V^2}{R} = \frac{468,72}{400} \cong 1,17 \text{ m/s}^2$$

• VELOCIDADE MÁXIMA

$$\gamma_c = \gamma_{\text{comp}} + \gamma_{\bar{m} \text{ comp}} = 1,17 + 0,65 = 1,82 \text{ m/s}^2$$

$$V^2 = \gamma_c \cdot R = 1,82 \times 400 = 728,5 \text{ m}^2/\text{s}^2 \therefore$$

$$V_{\text{MÁX}} \cong 27 \text{ m/s} \cong 97,17 \text{ km/h}$$

• VELOCIDADE MÍNIMA

$$\gamma_c = \gamma_{\text{comp}} + \gamma_{\bar{m} \text{ comp}} = 1,17 - 0,98 = 0,19 \text{ m/s}^2$$

$$V^2 = \gamma_c \cdot R = 0,19 \times 400 = 76,0 \text{ m}^2/\text{s}^2 \therefore V = 8,72 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{MÍN}} \cong 31,4 \text{ km/h}$$

NOTA: NO CASO DE  $V_{\text{MÍN}}$ , AS CONDIÇÕES ESTÁTICAS DEVEM SER ATENDIDAS PARA  $V=0$ , MESMO SABENDO QUE EM TERMOS DE CONFORTO  $V_{\text{MÍN}} \cong 31,4 \text{ km/h}$ .

(C) No problema (b), calcular qual deverá ser a sobrelevação máxima para que o trem possa ter até a velocidade nula, dentro dos padrões confortáveis estabelecidos pela DB. Calcular a  $V_{normal}$  neste caso e a  $V_{MAX}$

SOLUÇÃO:

$$\gamma_c = 0 \quad \therefore \quad \gamma_{\bar{m}comp} = -0,98 \text{ m/s}^2$$

$$\gamma_{comp} + \gamma_{\bar{m}comp} = 0 \quad ; \quad \gamma_{comp} = -\gamma_{\bar{m}comp}$$

$$\gamma_{comp} = \frac{V^2}{R} = 0,98 \quad ; \quad \frac{SP}{b} \leq 0,98 \quad ; \quad \text{NO CASO LI-}$$

$$\text{MITE, } \frac{SP}{b} = 0,98 \quad ; \quad s = \frac{0,98 \times b}{g} = \frac{0,98 \times 1,67}{9,78} \approx 0,167 \text{ m}$$

$$\therefore \quad S \approx 16,7 \text{ cm}$$

$V_{NORMAL}$

$$V = \left( \frac{0,167 \times 400 \times 9,78}{1,67} \right)^{1/2} = 19,78 \text{ m/s} = 71,2 \text{ km/h}$$

$V_{MAX}$

$$\gamma_c = 0,98 + 0,65 = 1,63 \text{ m/s}^2$$

$$V^2 = 1,63 \times 400 = 652 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad \therefore \quad V = 25,5 \text{ m/s} = 91,9 \text{ km/h}$$

d) Supondo-se que o " $\gamma_{mcomp}$ ", para velocidades mais altas que a média, seja  $0,65 \text{ m/s}^2$  para que satisfaça as condições de conforto em trens de passageiros, calcular qual será a superelavacão " $S$ " em uma curva circular de raio  $R = 400 \text{ m}$ , para uma certa velocidade de  $80 \text{ km/h}$ .

SOLUÇÃO:

$$\gamma_c = \frac{v^2}{R} = \frac{\left[80 \left(\frac{1000}{3600}\right)\right]^2}{400} = 1,235 \text{ m/s}^2$$

$$\gamma_c = \gamma_{comp} + \gamma_{mcomp} \therefore \gamma_{comp} = \gamma_c - \gamma_{mcomp}$$

$$\gamma_{comp} = 1,235 - 0,65 = 0,585 \text{ m/s}^2$$

$$S = \frac{bv^2}{Rg} \quad ; \quad \frac{v^2}{R} = \gamma_{comp} = \frac{g \cdot S}{b}$$

$$S = \frac{\gamma_{comp} \cdot b}{g} = \frac{0,585 \times 1,67}{9,78} \approx 0,0999 \text{ m}$$

$$S \approx 0,1 \text{ m} = 10 \text{ cm}$$

#### 7.4- SOBRELEVAÇÃO PRÁTICA

Como se viu, o uso de uma linha ferroviária é destinado para diversos tipos de trens, a diversas velocidades. A existência de velocidades diferentes da do projeto acarreta desgastes muito desiguais dos trilhos do lado externo e interno das curvas e, conseqüentemente, alto custo e difícil manutenção da linha.

Geralmente acontece que a ferrovia dá melhores condições de conforto para os passageiros dos trens rápidos, mesmo com um maior custo de manutenção das linhas e nesses casos, adotam-se valores de "V" mais próximos das velocidades dos trens rápidos. Segundo as normas alemãs, costuma-se adotar a sobrelevação real usada em campo como sendo 2/3 da sobrelevação teórica. Ter-se-á pois:

$$S_p = \frac{2}{3} S_t \quad \text{COM} \quad \begin{array}{l} S_p = \text{SOBRELEVAÇÃO PRÁTICA ou} \\ \text{DE CAMPO} \\ S_t = \text{SOBRELEVAÇÃO TEÓRICA} \end{array}$$

Da equação  $S = \frac{bV^2}{Rg}$  virá, então, para o cálculo prático da superrelação, que:

$$S_p = \frac{2}{3} \frac{bV^2}{Rg} \quad (5)$$

Introduzindo-se na equação (5) o valor numérico de "g" e adaptando-a para se entrar com "b" em m, "V" em Km/h, tirar-se-á S em m e a equação (5) assumirá a forma:

$$S_p = \frac{2}{3} \frac{b V^2}{127 R} \quad (6)$$

ou simplificando os termos numéricos:

$$S_p = 0,0052 \frac{b V^2}{R}$$



### 7.5- FÓRMULAS EMPÍRICAS USADAS POR FERROVIAS PARA O CÁLCULO DA SOBRELEVAÇÃO

Como informação sucinta, seguem algumas fórmulas empíricas para o cálculo da sobrelevação :

$$S = \frac{V}{R}$$

$$S = \frac{V}{2R}$$

$$S = 0,6 \frac{V}{R}$$

$$S = 0,66 \frac{V}{R}$$

A tendência para a determinação de fórmulas empíricas ocorre frequentemente, subtraindo-se da fórmula teórica um certo valor que é tomado como base admitindo-se que até um certo ponto, as acelerações não compensadas não causam nenhum desconforto aos passageiros; ou melhor, os desconfortos causados são toleráveis.

As estradas americanas e inglesas adotam a dedução de 50,8 a 76 mm; algumas estradas europeias deduzem 50 mm; a SNCF, em particular, adota os coeficientes 0,7, 0,6 e 0,5, conforme a velocidade na curva seja mais ou menos próxima da velocidade normal da linha.

Seguem fórmulas para velocidades de 80 km/h ou mais e para superelevação limite de 18 cm :

Fórmula americana adaptada para  $b=1,60$  m :

$$S = \frac{1,26 \cdot V^2}{R} - 7,6$$

Fórmula da SNCF adaptada para  $b=1,60$  m :

$$S = \frac{1,26 \cdot V^2}{R} \cdot 0,7$$

Fórmula da SNCF para  $b=1,60$  m :

$$S = \frac{0,8 \cdot V^2}{R} \cdot 0,7$$

onde : V em km/h ; R em m ;

## 7.6 - TAXA DE VARIAÇÃO DA SUPERELEVAÇÃO NAS CURVAS DE TRANSIÇÃO

Prescrições da A.R.E.A. ( American Railway Engineering Association )

Velocidade	Taxa
Normais	3,17 cm /s
Altas	2,96 cm /s

Algumas estradas norte-americanas com velocidades de 85 a 100 milhas per hora ( 136,76 a 160,90 km/h ), reduzem esta taxa para 2,86 cm/s .

A ex- C.P.E.F. adotava uma taxa de variação de 3,17 cm/s , visto que sua previsão para velocidade máxima ( até 1967 ) era de 120 km/h .

Usando , portanto , 3,17 cm/s como taxa de variação de sobrelevação , pede-se compor o quadro :

Velocidade em km/h	Velocidade em m/s	Resistência em m para a variação de 1 cm na sobrelevação
80	22,2	7,0
90	25,0	7,9
100	27,8	8,7
110	30,6	9,6
120	33,3	10,5

Velocidades	Distâncias mínimas para a variação de 1 cm na sobrelevação
até 80 km/h	5,00 m
de 80 a 90 km/h	6,66 m ( ou 3 cm cada 20 m )
além de 90 km/h	10,00 m

7.7 - LIMITES DE SUPERELEVACÃO

Linha dupla ; b = 1,60 m

$$S_{\text{máx.}} = 20,0 \text{ cm}$$

Linha Singela ; b = 1,60 m

$$S_{\text{máx.}} = 18,0 \text{ cm}$$

Linha Singela ; b = 1,00 m

$$S_{\text{máx.}} = 8,0 \text{ cm}$$

## 8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 8.1 - Outros fatores que influenciam no critério de correção da curva

#### a) Comprimento da curva de concordância

Quando se trata de linha já corrigida anteriormente, aparece já esboçada no diagrama de flechas medidas, o comprimento a ser adotado para a curva de concordância. Em caso de dúvida, ou quando houver mudança de velocidade de tráfego, desde o último arredondamento, recalcula-se o comprimento mínimo da curva de concordância.

Se a linha não recebeu qualquer cuidado anterior neste sentido, a introdução de curvas de concordância produzirá pequena redução no raio da curva e um deslocamento lateral sobre a plataforma. Se a curva não é a de ponte crítica para o tráfego, provavelmente a primeira circunstância não trará inconvenientes, mas se os deslocamentos forem excessivos, terão de ser acompanhados de cortes ou aterros, o que não pode ser realizado em certas condições particulares.

#### b) Pontes inamevíveis

Tratam-se de pontilhões, bueiros, pontas de agulha, corações, etc. São de difícil consideração, no método analítico, complicando as tentativas de cálculo. Na calculadora, por outro lado, basta fixar o ponto através de dispositivo especial de bloqueio.

No processo das marcas móveis assinalam-se os pontos inamevíveis na linha de registro pois pode haver correções consequentes nestes pontos.

#### c) Deslocamento da linha, paralelamente.

Às vezes, deseja-se centrar a linha sobre uma ponte em curvas ou deslocar tangentes entre curvas; basta introduzir diretamente as correções desejadas, quer na máquina, quer no processo dos pontos. Nota-se que as análises ou correções analíticas são difíceis.

#### d) Corte de trilhos

Deve-se procurar, sempre que possível, equilibrar os valê-

res de deslocamento para fora e para dentro da curva ou deixar aquê-les levemente superiores a estes. Isto para evitar um desenvolvimento menor na curva corrigida, requerendo corte de trilhos. Nas condições de curvas já concordadas anteriormente, isso é sempre fácil de se obter, pelo simples exame da linha de registro. Entretanto, no primeiro arredondamento de curvas anteriormente circulares, o corte não poderá ser sempre evitado.

**e/** Curvas compostas e curvas inversas

Estas curvas e as que tem pequena tangente (menores que 100 metros) devem ser levantadas de ponta a ponta. Na curva inversa passa-se para o trilho exterior com a igualdade de estaqueamento.

**f/** Operações finais de arredondamento

Efetuando-se o puxamento da curva nos pontos marcados, haverá ainda necessidade de uma complementação de arredondamento a olho, no intervalo entre duas estacas consecutivas. Neste caso, as cordas menores facilitam o trabalho.

Procede-se finalmente o fechamento dos ombros dos dormentes de onde, eventualmente, o lastro tenha sido removido, recompondo-se a banquetta.

ANEXOS "A"

**A.1** - TABELA COM OS DADOS CALCULADOS PARA DIVERSAS VELOCIDADES(\*)

Para bitola de 1,60 m

Nota : Os raios mínimos obtidos dizem respeito apenas à velocidade . É preciso examinar , em cada ponte , se esse raio mínimo permite a inscrição dos veículos usados .

V(km/h)	R <sub>mínimo</sub> (m)	F <sub>máxima</sub> (m)	$\Delta f$ (m)	S (m)	D <sub>s</sub> (m)
60	156,00	0,320	0,0655	0,601 F	48,8
65	183,00	0,273	0,0514	0,705 F	53,1
70	213,00	0,234	0,0408	0,818 F	57,3
75	244,00	0,204	0,0333	0,929 F	61,2
80	278,00	0,179	0,0273	1,068 F	65,5
85	314,00	0,159	0,0227	1,206 F	70,0
90	352,00	0,142	0,0192	1,352 F	73,9
95	392,00	0,127	0,0163	1,507 F	77,9
100	434,00	0,115	0,0140	1,670 F	82,1
105	478,00	0,104	0,0120	1,830 F	86,6
110	525,00	0,095	0,0105	2,020 F	90,4
115	574,00	0,087	0,0092	2,200 F	94,5
120	625,00	0,080	0,0081	2,400 F	98,7
125	678,00	0,073	0,0071	2,600 F	102,8
130	733,00	0,068	0,0063	2,820 F	107,9
135	791,00	0,063	0,0056	3,030 F	112,5
140	851,00	0,058	0,0051	3,270 F	113,7
145	912,00	0,054	0,0045	3,500 F	120,0
150	976,00	0,051	0,0041	3,750 F	124,3
155	1043,00	0,047	0,0037	4,000 F	127,0

V = velocidade em Km/h ; R<sub>mínimo</sub> = menor raio compatível com V.

F<sub>máxima</sub> = maior flecha admissível para a velocidade V .

$\Delta f$  = variação máxima entre flechas distantes de 10 m .

S = sobrelevação em função de cada flecha medida para velocidade V

D<sub>s</sub> = comprimento mínimo de cada ramo de concordância para com uma velocidade V atingir-se o raio R<sub>mín</sub> .

$$D_s = \frac{F_{\text{máx.}}}{\Delta f} \times 10$$

$$F_{\text{máx}} = \frac{1.149}{V_{\text{Máx}}^2}$$

(\*) TRABALHO DO Dr. BERNARDINO F. NUNES JÚNIOR  
ex- C.P.E.F.

**A.2) - TABELA COM OS DADOS OBTIDOS PARA DIVERSAS VELOCIDADES (\*)**

Para bitola de 1,00 m

Nota : Os raios obtidos dizem respeito à velocidade . É preciso examinar em cada caso se esse raio mínimo permite a inscrição dos veículos usados .

V (km/h)	R <sub>mínimo</sub> (m)	F <sub>máxima</sub> (m)	Δf (m)	S (m)	D <sub>s</sub> (m)
40	68,32	0,182	0,027	0,656 F	33,70
45	86,46	0,144	0,019	0,830 F	37,80
50	106,75	0,117	0,014	1,025 F	41,70
55	129,16	0,096	0,0105	1,24 F	48,00
60	153,72	0,081	0,0081	1,47 F	50,00
65	180,40	0,069	0,0063	1,73 F	54,70
70	209,23	0,059	0,0051	2,09 F	57,80
75	240,18	0,052	0,0041	2,30 F	63,40
80	273,28	0,046	0,0034	2,62 F	67,60

V = velocidade em km/h

R<sub>mínimo</sub> = menor raio compatível com V

F<sub>máxima</sub> = maior flecha admissível para velocidade V

Δf = variação máxima entre flechas distantes de 5 m

S = sobrelevação em função de cada flecha medida para velocidade V

D<sub>s</sub> = comprimento mínimo de cada ramo de concordância para , com uma velocidade V atingir-se o raio R<sub>mín</sub> .

$$D_s = \frac{F_{MÁX}}{\Delta f} \times 5$$

$$F_{MÁX} = \frac{292}{V_{MÁX}^2}$$

(\*) TRABALHO DO Dr. BERNARDINO F. NUNES JÚNIOR  
ex- C.P.E.F.



**A.3. QUADRO DAS FLEXAS EM CORDAS DE 20m CORRESPONDENTES À SOBRELEVAÇÃO TEÓRICA PARA DIFERENTES VELOCIDADES**

Trabalho do eng<sup>o</sup> Francisco Cliva

Sobrelev. teórica (em cm) (S <sub>t</sub> )		Velocidade em km/h															Sobrelev. teórica (em cm) (S <sub>t</sub> )			
		120	110	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40			30	
BE.	BL.	Flexas em mm															BL.	BE.		
0,6	1	3	3	4	4	5	5	6	7	8	9	11	13	16	20	25	44	1	0,6	
1,2	2	5	7	8	9	10	11	12	14	16	19	22	26	32	39	50	88	2	1,2	
1,9	3	8	10	12	13	15	16	18	21	24	28	33	39	48	59	74	132	3	1,9	
2,5	4	11	13	16	18	20	22	25	28	32	38	44	52	63	78	99	176	4	2,5	
3,1	5	14	16	20	22	24	27	31	35	40	47	55	66	79	98	124	220	5	3,1	
3,7	6	16	20	24	26	29	33	37	42	49	56	66	79	95	118	149	265	6	3,7	
4,4	7	19	23	28	31	34	38	43	49	57	66	77	92	111	137	174	309	7	4,4	
5	8	22	26	32	35	39	44	49	56	65	75	88	105	127	157	198	353	8	5	
5,6	9	25	29	36	39	44	49	56	63	73	85	99	118	143	176	223	397	9	5,6	
6,2	10	27	33	40	44	49	55	62	71	81	94	110	131	159	196	248	441	10	6,2	
6,9	11	30	36	44	48	54	60	68	78	89	104	121	144	175	216	273	485	11	6,9	
7,5	12	33	39	47	53	59	66	74	85	97	113	132	157	190	235	298	529	12	7,5	
8,1	13	36	43	51	57	64	71	80	92	105	122	143	171	206	255	322	573	13	8,1	
8,7	14	38	46	55	61	69	77	87	99	113	132	154	184	222	274	347	617	14	8,7	
9,4	15	41	49	59	66	74	82	93	106	121	141	165	197	238	294	372	661	15	9,4	
10	16	44	52	63	70	78	88	99	113	130	151	176	210	254	314	397	706	16	10	
10,6	17	47	56	67	75	83	93	105	120	138	160	187	223	270	333	422	750	17	10,6	
11,2	18	49	59	72	79	88	99	111	127	146	170	198	236	286	353	446	794	18	11,2	
11,9	19	52	62	75	83	93	104	118	134	154	179	209	249	301	372	471	838	19	11,9	
12,5	20	55	65	79	88	98	110	124	141	162	188	220	262	317	392	496	882	20	12,5	
13,1	21	58	69	83	92	103	115	130	148	170	198	231	276	333	412	521	926	21	13,1	
13,7	22	60	72	87	97	108	121	136	155	178	207	242	289	349	431	546	970	22	13,7	
14,4	23	63	75	91	101	113	126	142	162	186	217	253	302	365	451	570	1014	23	14,4	
15	24	66	79	95	105	118	132	149	169	194	226	264	315	381	470	595	1058	24	15	
15,6	25	69	82	99	110	122	137	155	176	202	235	275	328	397	490	620	1102	25	15,6	
16,2	26	72	85	103	114	127	143	161	183	211	244	287	341	413	510	645	1147	26	16,2	
16,9	27	74	88	107	118	132	148	167	190	219	254	298	354	428	529	670	1191	27	16,9	
17,5	28	77	92	111	123	137	154	173	197	227	263	309	367	444	549	694	1235	28	17,5	
18,1	29	80	95	115	127	142	159	180	204	235	273	320	380	460	568	719	1279	29	18,1	
18,7	30	83	98	119	132	147	165	186	212	243	282	331	394	476	588	744	1323	30	18,7	
		Variação máxima da redução da Sobrelevação (cm)																		
		1,5			2			2,5			3		3,5		4		4,5		6	

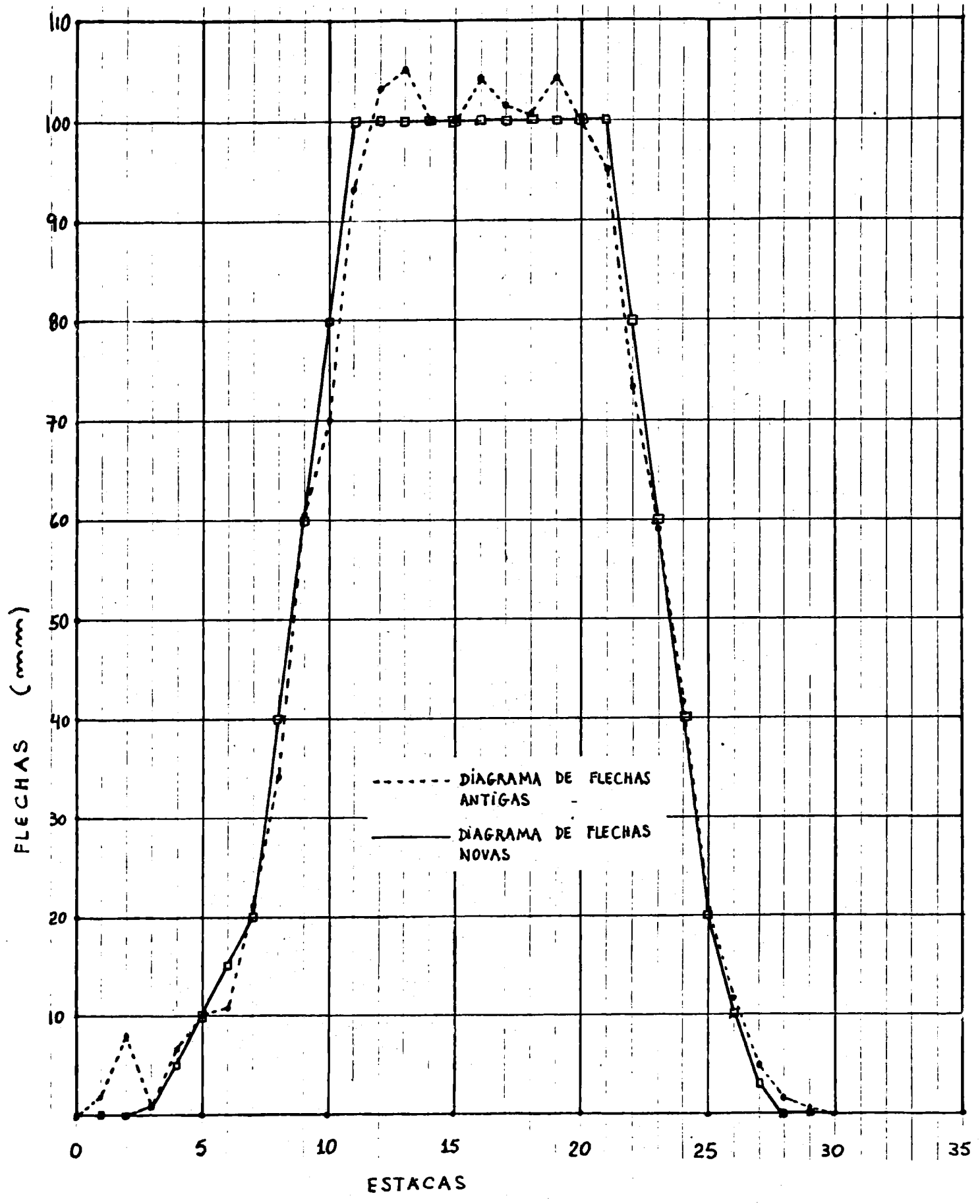
NOTA:  
 SOBRELEVAÇÃO PRÁTICA:  
 $\frac{2}{3} S_t$  ONDE  
 $S_t$  = SOBRELEVAÇÃO TEÓRICA

A.4.

- Tabela em branco utilizada para o cálculo de arredondamento de curvas ferroviárias através do Princípio dos Deslocamentos Proporcionais :





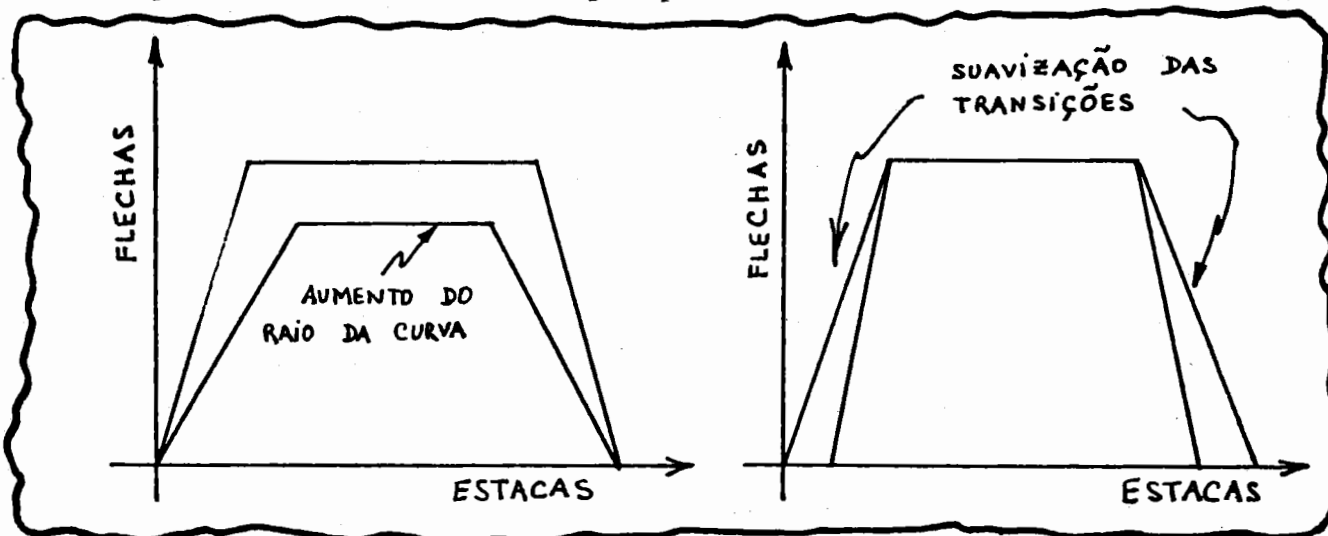


NOTAS :

a) A superelevação , no exercício mostrado , é dada em tres colunas :

- superelevação medida no local ( antigas )
- superelevação teórica (  $S_t$  )
- superelevação prática (  $2/3 S_t$  )

b) Quando no cálculo da superelevação prática a diferença entre duas delas , consecutivas , der maior que um valor determinado ( vide por exemplo a tabela usada neste cálculo : A.4. ) , para uma certa velocidade , deve-se recalcular as flechas , aumentando o raio da curva ou suavizando a curva de transição , conforme esquemas abaixo e desde que possível :



c) Se , no caso anterior citado , a diferença de superelevação entre estacas consecutivas for pequena , pode-se aumentar ou diminuir uma delas , desde que a diferença entre as estacas consecutivas a essas mudanças também estejam nos limites previstos para a velocidade em questão .

A.5.2. - Dado o trecho abaixo de uma linha ferroviária em planta, calcular o necessário para um deslizamento suave das composições. Pede-se:

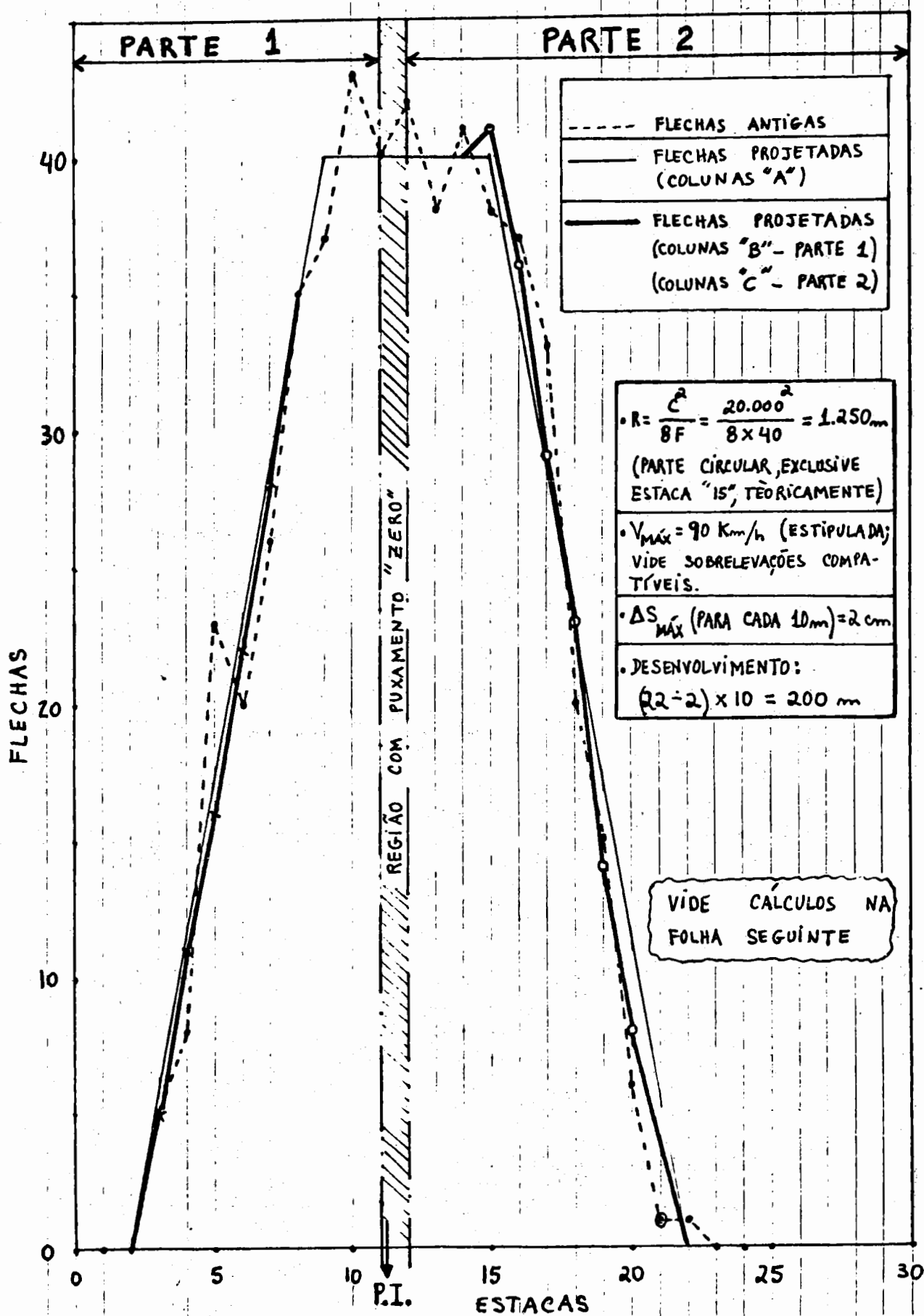
- 1 - Diagrama das flechas medidas
- 2 - Diagrama das flechas projetadas
- 3 - Diagrama das flechas novas
- 4 - Raio mínimo
- 5 - Velocidade máxima da curva
- 6 - Variação máxima de superelevação e superelevação na parte circular
- 7 - Desenvolvimento

Levantamento em Campo:

ESTACAS	FLECHAS (mm)	ESTACAS	FLECHAS (mm)
1	0	14	41
2	0	15	38
3	5	16	37
4	8	17	33
5	23	18	20
6	20	19	15
7	26	20	6
8	35	21	1
9	37	22	1
10	43	23	0
* 11	40	24	0
12	42	25	0
13	38		

\* P.I. = PASSAGEM INFERIOR , PORTANTO, PUXAMENTO "ZERO" =  
 = EST. 11 + 03  
 = EST. 11 + 03 .

Conforme se nota no diagrama abaixo, o cálculo de arredondamento deverá ser feito em duas partes já que entre as estações "11" e "12" existe uma passagem inferior e os trilhos, aí, não podem ser puxados; portanto entre essas estações, o puxamento deverá ser nulo ou ter valer "zero".







A.6. - Dados para estimativas preliminares  
 ( Pacheco de Carvalho , M. - " Curso de Estradas - Es-  
 tudos , Projetos e Locação de Ferrovias e Rodevias " -  
 Editôra Científica - Rio de Janeiro - 1967 -  
 Volume 11 )

Bitola de 1,60 m

$$R_{\text{mín.}} = 0,079 \cdot v^2$$

V km/h	50	60	70	80	100	120
R <sub>mín.</sub> (m)	200	280	390	500	800	1140

Comprimento normal de transição ( espiral ) :

$$l_e = 3,2 \sqrt{R}$$

Comprimento mínimo de transição :

$$l_e = 0,07 \frac{v^3}{R} ; l_e(\text{mín}) = 40 \text{ m}$$

Bitola de 1,00 m

$$R_{\text{mín}} = 0,063 \cdot v^2$$

V km/h	50	60	80	100
R <sub>mín</sub> (m)	160	220	400	630

Comprimento normal de transição :

$$l_e = 3,2 \sqrt{R}$$

Comprimento mínimo de transição :

$$l_e = 0,05 \frac{v^3}{R} ; l_e(\text{mín}) = 40 \text{ m}$$

A.7 - Aparelhos " manuais " para levantamentos de flechas e sobrelevação da ex- C.P.E.F.

