

Vof 1 3º C.F. G. E

# MODELOS GEOMECÂNICOS DAS FUNDAÇÕES DO VERTEDOURO DA UHE DE TUCURUI

SANTO BERTIN NETO  
ANTONIO CÉSAR BASTOS  
IVANO JOSÉ BASSO

Geólogos. ENGEVIX S/A - Estudos e Projetos de Engenharia - Brasília

## RESUMO

Descrive-se a metodologia desenvolvida para a elaboração dos modelos geomecânicos das fundações do Vertedouro da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, rio Tocantins, Estado do Pará, principalmente no que concerne à obtenção de parâmetros para análises de estabilidade ao escorregamento.

A metodologia em questão, à luz das publicações existentes sobre o assunto, pode ser considerada não convencional e se deve, basicamente, à complexidade geológico-estrutural das fundações da barragem.

## 1. INTRODUÇÃO

Define-se modelo geomecânico de maciços rochosos como sendo uma representação, bi ou tridimensional, que retrata convenientemente as feições geológicas e as características físicas e mecânicas do maciço rochoso (1).

Os modelos geomecânicos constituem elemento básico para análises do comportamento integrado estrutura-fundação, seja em análises de estabilidade ao escorregamento, seja em estudos de tensão-deformação. Nestes tipos litológicos, descontinuidades, contatos, zonas mais ou menos alteradas, etc, presentes no maciço rochoso, são representados através de parâmetros geomecânicos e de forma estilizada, isto é, dando-se a essas feições contornos geométricos definidos (2).

Em trabalhos precedentes, entre os quais citam-se os de Cruz et al (3) e Camargo et al (1), é proposta uma metodologia de elaboração de modelos que se resume, basicamente, em extrair dos mapeamentos e seções geológicas detalhadas, as feições, características e propriedades que realmente interfeririam no comportamento do conjunto estrutura-fundação, dando-se-lhes o "tratamento" de estilização já mencionado.

Para as fundações do Vertedouro de Tucuruí o processo adotado, em linhas gerais, é o mesmo. A obtenção dos parâmetros para as análises de estabilidade ao escorregamento, no entanto, face a complexidade e particularidades geológicas locais, exigiu o desenvolvimento de uma metodologia inédita, apresentada neste trabalho.

## 2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO VERTEDOURO

Sendo uma das unidades que compõem a Usina Hidrelétrica de Tucuruí, em construção pelas Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A, no rio Tocantins, próximo à cidade de Tucuruí, Estado do Pará, o Vertedouro se constituirá num dos maiores do mundo em capacidade de escoamento. As suas 23 comportas de 20x20 m, distribuídas ao longo de uma estrutura de quase 600 m de comprimento, estão dimensionadas para verteter 100.000 m<sup>3</sup>/s. Cada um dos blocos que o constituem têm, na base, 25x90 m e altura de 90 m, do ponto mais baixo das fundações, na cota -14,0m, até a crista, na cota 76,0 m. A Figura 1 apresenta o posicionamento do Vertedouro na barragem, bem como a sua planta e corte típico.

Por ser do tipo salto de esqui e apresentar vazão específica bastante elevada, exigiu a pré-escavação de uma bacia de dissipação a jusante até a cota -40,0 m. A presença de tal cavidade a jusante implicou em maiores cuidados com a estabilidade da estrutura, levando a se proceder levantamento detalhado das descontinuidades presentes, em especial as falhas, e à elaboração de modelos geomecânicos para se efetuar as análises de estabilidade ao escoamento.

## 3. GEOLOGIA LOCAL

O Vertedouro e as demais estruturas de concreto da barragem situam-se sobre metassedimentos pertencentes à Formação Tucuruí, do Pré-Cambriano Superior e Cambriano. São rochas sedimentares relativamente homogêneas quanto à composição mineralógica sendo constituídas, basicamente, de grãos detritícos de feldspatos, quartzo e fragmentos de rochas básicas, litificados pela ação de metamorfismo de baixo grau que lhes conferiu uma xistosidade incipiente, concordante com os planos de estratificação, e elevada resistência mecânica.

Os planos de estratificação-xistosidade apresentam-se inclinados, com mergulhos em geral baixos (entre 10° e 35°), predominantemente voltados para o quadrante NE, porém com muitas variações e inversões localizadas devidas a deformações posteriores.

A inter-relação da Formação Tucuruí com as demais unidades ocorrentes na área da barragem e outros aspectos relativos aos metassedimentos já foram abordados em trabalhos anteriores (2) (3) (4), sendo dispensáveis maiores considerações a respeito.

Estas rochas foram afetadas por eventos de diversas idades que as deformaram resultando em dobramentos e falhamentos. Com relação a estes últimos foram identificados três sistemas, correspondentes a três fases de deformação, ilustrados esquematicamente na Figura 2:

- numa primeira fase formaram-se falhas inversas ou de empurrão que se aproveitaram dos planos de estratificação-xistosidade pré-existent para se desenvolver. Compõem o sistema denominado de F1;
- numa segunda fase desenvolveram-se falhas normais, discordantes dos planos de estratificação e que, por isso, truncam as falhas F1. Apresentam direções variadas com predomínio para as voltadas para leste (85°/40°), para oeste (270°/50°) e para sudoeste (225° a 250°/45°). Foram denominadas de Sistema F2;
- a terceira fase corresponde a falhas mais recentes associadas a falhas de rochas muito fraturadas. São falhas transcorrentes com mergulhos subverticais e direções nordeste ou noroeste. Interceptam e truncam todas as demais falhas e constituem o Sistema F3.

Como resultado do seccionamento do maciço rochoso pelos falhamentos, formaram-se setores (compartimentos) entre os quais os planos de

estratificação, originalmente com atitudes mais ou menos constantes, são bastante deslocados observando-se, inclusive, inversões entre setores vizinhos. Este fato, como se verá adiante, teve uma influência decisiva no estabelecimento da metodologia de elaboração dos modelos e nos parâmetros geomecânicos adotados nas análises de estabilidade.

#### 4. OS MODELOS GEOMECÂNICOS

Os modelos geomecânicos do Vertedouro foram elaborados com a finalidade de possibilitar o desenvolvimento de estudos de estabilidade ao escorregamento pelas suas fundações. Tais estudos, obviamente, pressupõem que o maciço rochoso contenha planos ou superfícies potenciais de escorregamento sobre as quais a estrutura possa deslizar. No caso os únicos planos com tais características são os planos de estratificação-xistosidade e descontinuidades associadas (falhas F1 principalmente), visto que as falhas F2 e F3, pela sua disposição e não poderiam se constituir nessas superfícies. atitudes,

##### 4.1 Mecanismo de Ruptura

O mecanismo de ruptura foi estabelecido com base nas seguintes considerações e hipóteses:

- os planos de estratificação-xistosidade - falhas F1 apresentam mergulhos oblíquos em relação à direção de escorregamento (montante-jusante). Um determinado bloco da estrutura, apoiado sobre tais planos, tenderia a deslizar segundo a direção de mergulho (maior declividade) sendo tal movimento, obviamente, impedido pelos blocos vizinhos;
- admitiu-se então, que a ruptura se desse através de uma "cunha" hipotética, constituída de um lado, pelos próprios planos de estratificação e, do outro, por planos hipotéticos que se desenvolveriam através da rocha e que fossem simétrico-opostos aos primeiros em relação à direção montante-jusante. A aresta interseção desses planos também, a direção montante-jusante e seu mergulho é igual ao mergulho aparente dos planos de estratificação nessa mesma direção;
- a ruptura, dessa forma, seria possível e no escorregamento seriam mobilizadas resistências ao longo dos planos de estratificação - falhas F1 pré-existentes e da própria rocha, muito maiores que as primeiras, ao longo dos planos hipotéticos.

Configurou-se, portanto, um problema a três dimensões (cunha). Para reduzi-lo ao plano bidimensional aplicou-se a formulação proposta por Kovari & Fritiz(6) que permite determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento para um plano, dito "equivalente", coincidente com a aresta interseção da cunha, a partir dos parâmetros dos planos que a constituem e do ângulo de abertura da cunha, conforme ilustrado na Figura 3. No presente caso o conceito do plano equivalente, ou "efeito de cunha", foi aplicado apenas para a determinação do ângulo de atrito, sendo a coesão estabelecida segundo outros critérios.

##### 4.2 Elaboração do Modelo

O primeiro passo na elaboração dos modelos geomecânicos consiste em identificar e delimitar os setores para cada bloco, individualmente, a partir dos mapeamentos geológico-geotécnicos das fundações, exemplificados na Figura 4.

Para cada setor são determinadas as atitudes médias dos planos de estratificação, utilizando-se redes equiáreas de Schimdt-Lambert, e a área proporcional em relação à área do bloco. Plotando-se os grandes

círculos correspondentes a esses planos em redes de Wulff, conforme 1 ilustrado na Figura 5, obtém-se, da interseção destes com a direção mon tante-jusante, os ângulos de mergulho das arestas interseção das cunhas hipotéticas, cuja média fornece, como será visto adiante, o ângulo de mergulho do plano de análise.

O modelo geomecânico, em resumo, consiste, portanto, numa seção transversal ao eixo da estrutura com a indicação do traço correspondente ao plano de escorregamento e os respectivos valores de coesão e atrito.

#### 4.3 Determinação dos Parâmetros Geomecânicos

Segundo Kovari et al. o ângulo de atrito,  $\varphi$ , no plano equivalente, (veja Figura 3) será dado pela relação:

$$\varphi = \arctg \frac{\cos \omega_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 + \cos \omega_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{sen} (\omega_1 + \omega_2)}$$

onde,  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  são os ângulos de atrito dos planos constituintes da cunha;

$\omega_1$  o ângulo entre o plano vertical que contém a interseção e um dos planos da cunha, medido no plano normal à linha de interseção;  $\omega_2$  o mesmo que  $\omega_1$  para o outro plano da cunha.

No cálculo de  $\varphi$  tomou-se  $\varphi_1$ , para os planos de estratificação-faixas  $F_1$ , igual a  $38^\circ$  e,  $\varphi_2$ , para a rocha, igual a  $45^\circ$ . O primeiro foi obtido a partir de ensaios de cisalhamento in situ devidamente corrigidos para compensar o fato de que os ensaios foram executados nos locais menos favoráveis do ponto de vista de resistência ao cisalhamento; o segundo foi assumido por hipótese.

Os valores de  $\omega_1$  e  $\omega_2$  são facilmente obteníveis através de redes de Wulff para projeção estereográfica, sendo necessário apenas conhecer-se a atitude do plano de estratificação.

Para o caso de um determinado bloco de estrutura apoiar-se sobre mais de um setor do maciço rochoso, o conceito do "efeito de cunha" foi aplicado a cada setor, individualmente, sendo os valores de  $\varphi$ , assim obtidos, ponderados em função das áreas dos setores, relativamente à área total do bloco, fornecendo o valor de  $\varphi$  para o plano de análise, conforme ilustrado na Figura 6.

O ângulo de mergulho,  $\alpha$ , deste plano, é igual ao mergulho aparente dos planos de estratificação na direção montante-jusante sendo, também, facilmente determinado, como já dito, através de redes de Wulff. No caso de ocorrerem dois ou mais setores no mesmo bloco, adotou-se para o plano de análise um mergulho que corresponde à média ponderada dos mergulhos dos setores. Os setores de pequena expressão foram desprezados, principalmente quando constituíam enclaves em setores maiores. No caso do Bloco VI0, por exemplo, a área do setor III foi computada juntamente com a do setor II.

Genericamente o valor de  $\alpha$  é dado pela expressão:

$$\alpha = \alpha^I \cdot A^I + \alpha^{II} \cdot A^{II} + \dots + \alpha^n \cdot A^n$$

onde,  $\alpha^I, \alpha^{II}, \dots$  são os ângulos de mergulho dos setores I, II, ...;  $A^I, A^{II}, \dots$  as áreas relativas dos setores I, II, ...

A coesão, por sua vez, foi atribuída a cada bloco considerando: o grau de persistência das descontinuidades associadas aos planos de es

tratificação e, o grau de variação das atitudes dos planos de estratificação entre os setores.

O grãu de persistência é definido como sendo a porcentagem da área do plano potencial de escorregamento constituída por descontínuidades contidas nesse plano ou, em outras palavras, determina a porcentagem de rocha ("pontes de rocha") a ser cisalhada para que a ruptura possa ocorrer (7). Este conceito é aplicável aos blocos apoiados em fundações com um único setor.

Nas análises de estabilidade adotou-se os seguintes valores de graus de persistência obtidos em função do levantamento das extensões das descontinuidades associadas aos planos de estratificação, notadamente as falhas Fl:

Extensão dos Planos de Análise (m)	Grau de Persistência (%)	Coesão (kgf/cm <sup>2</sup> )
20	100	0
40	90	0,5
60 *	80 *	1,0
80	70	1,5
100	60	2,0
150	50	2,5

\* Significa que o plano de análise coincide com descontinuidades em 60% da sua extensão, ou seja, tm. Vale dizer, portanto, que tm de "pontes de rocha" (20%) deverão ser rompidos.

Os valores de coesão constantes da tabela foram obtidos com base nas seguintes hipóteses:

- a ruptura através da rocha, ou "pontes de rocha", mobilizaria uma coesão de 5 kgf/cm<sup>2</sup>;
- a ruptura através de descontinuidades pré-existentes não mobilizaria coesão, isto é, c = 0;
- a ruptura através de planos compostos por "pontes de rocha" e descontinuidades pré-existentes, mobilizaria uma coesão média dada pela expressão,

$$c = \frac{Cr \cdot (100-P)}{100}$$

onde, c é a coesão média;

Cr a coesão da rocha;

P o grãu de persistência.

No Vertedouro os planos de análise apresentavam extensões de 100 a 150 metros.

No caso de blocos com dois ou mais setores, a variação das atitudes dos planos de estratificação acarreta um certo imbricamento entre os setores (Figura 5) levando esta condição a prevalecer sobre o conceito de persistência. O valor mínimo de coesão adotado para estes blocos foi de 3,0 kgf/cm<sup>2</sup>.

## 4.2 Análises de Estabilidade

Nestas análises consideraram-se diversos casos de carregamento, resultantes da conjugação de diferentes níveis d'água a montante e a jusante, hipóteses de subpressões, efeitos de sísmos, etc. Definiu-se, então, como caso normal aquele representado pelos níveis d'água máximo normal a montante (72,0 m) e normal a jusante (6,80m), com subpressões correspondentes à condição de sistema de drenagem operante. Definiram-se, também, outros casos de carregamento que conjugam situações desfavoráveis de níveis d'água, galerias de drenagem inundadas e efeitos de sísmos (8).

Os fatores de segurança foram determinados através da expressão:

$$FS = \frac{(N-U) \frac{tg\phi}{F\phi} + L \frac{c}{Fc}}{T}$$

onde, N é a resultante dos esforços normais no plano de análise;

T a resultante dos esforços tangenciais;

U a subpressão;

L o comprimento do plano;

c e  $\phi$  a coesão e ângulo de atrito;

$\phi$  e Fc os fatores de segurança para o atrito e coesão, respectivamente, cujos valores são pré-fixados em função dos casos de carregamento.

Para que a estrutura atenda aos critérios de projeto, quanto à estabilidade ao escorregamento, basta que FS seja igual à unidade.

Os valores de FS obtidos para o caso normal, que corresponde à quase totalidade do tempo de operação da usina, para os blocos V9, V10 e V11, considerando os valores de  $\alpha$ , c e  $\phi$  constantes da Figura 5, foram os seguintes:

BLOCO	FS*
V 9	1,53
V10	1,47
V11	1,44

\*Para  $\phi = 1,5$  e  $Fc = 3,0$

## 5. CONCLUSÕES

Não se pretende que a metodologia adotada na elaboração dos modelos geomecânicos para análises de estabilidade ao escorregamento, seja considerada como a única plausível para fundações em condições ou, pelo menos, complexidade semelhante às do Vertedouro de Tucuruí. Acreditamos, no entanto, ser essencial estabelecer criteriosamente, e sempre que possível com algum suporte teórico, os planos e os parâmetros para tais análises.

É comum ver-se, por exemplo, modelos extremamente simplistas e, via de regra, extremamente conservadores, em que ao longo de planos com extensões de dezenas de metros se adotam, como parâmetros, valores obtidos de ensaios realizados em blocos de pequenas dimensões, localizados

em trechos em que a descontinuidade apresenta as piores condições. Os contatos rocha-rocha; as "pontes de rocha" a serem rompidas caso a jun- ta tenha extensão inferior à do plano de análise; a resistência late- ral ao movimento proporcionada pelo maciço rochoso, visto que nem pre se tem descontinuidades desconfinantes, entre outros fatores, sem geralmente ignorados. A eventual interseção entre sistemas de juntas são formando cunhas cujo efeito, como visto, é benéfico em relação ao plano de mergulho igual ao da interseção, também raramente é considerada.

Evidentemente a consideração ou não de alguns destes fatores tem relação direta com o nível de conhecimento da geologia, estando a geologia estrutural e a tectônica em primeiro plano, e dos aspectos geo- técnicos e geomecânicos do maciço rochoso de fundação, com ênfase à con- tinuidade e parâmetros de resistência ao cisalhamento das suas desconti- nuidades.

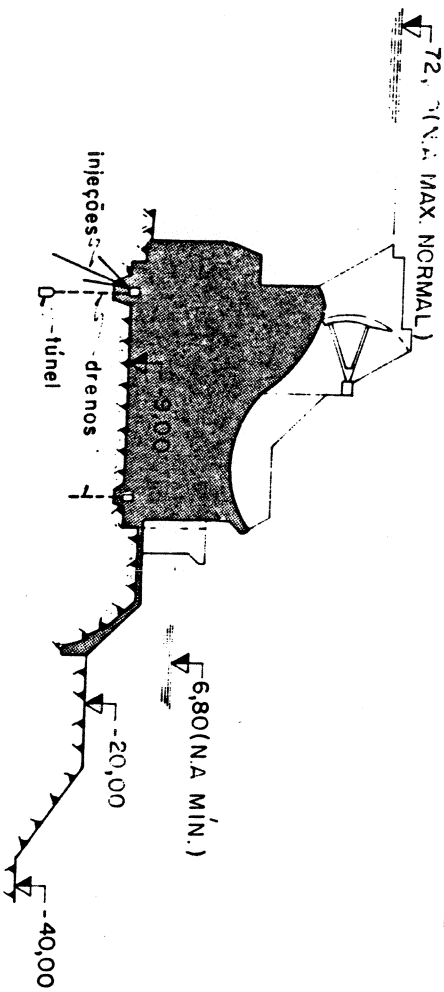
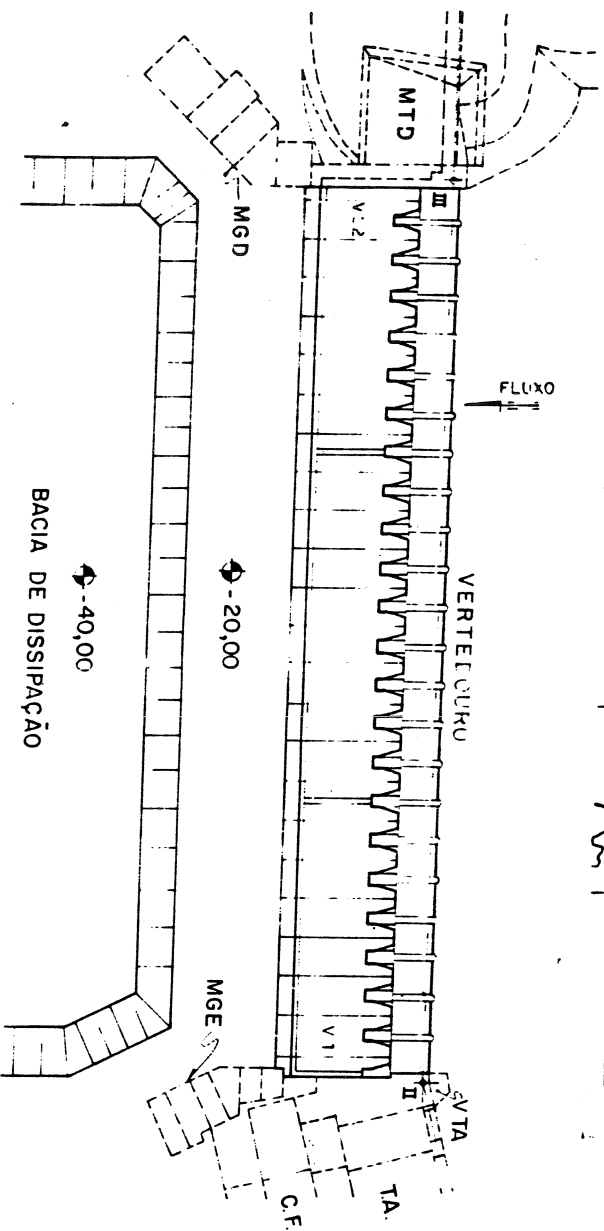
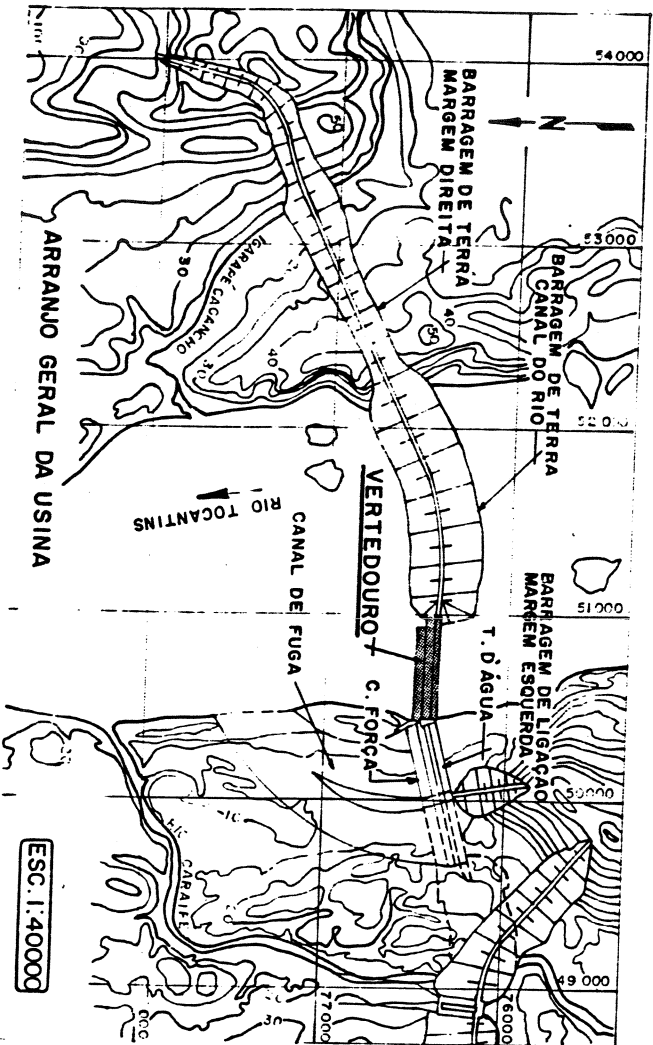
#### 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - ELETRONORTE, a autorização para a publicação do presente trabalho; à Engevix S/A - Estudos e Projetos de Engenharia pelas facilidades outor- gadas para a sua elaboração e aos técnicos da Engevix e Eletronorte que, com seus comentários, muito o enriqueceram.

#### 7. REFERÊNCIAS

- (1) CAMARGO F.P.; LEITE C.A.G.; BERTIN NETO S.; MALDONADO F.; CRUZ P.T. - "Modelos Geomecânicos de Fundações de Barragens - Metodo- logia de Elaboração Aplicada a Três Projetos" - XI Sem. Metodo- Gdes. Barragens, Fortaleza - 1976.
- (2) BERTIN NETO S.; BASTOS A.C. - "Fundações das Estruturas de Concre- to da UHE de Tucuruí" - Simpósio sobre as Características Geo- lógico-Geotécnicas da Região Amazônica, Brasília - 1980.
- (3) CRUZ P.T.; CAMARGO F.P.; BARROS F.P. - "Uso de Modelos Geomecâ- nicos na Análise de Fundações de Estruturas de Concreto" - V Cong. Panamericano de Mec. Solos e Eng. de Fundações, Buenos Aires - 1975.
- (4) TROUW R.J.; VAZ L.F.; SLOGO T.; NAKASATO N. - "Geologia da Re- gião do Baixo Tocantins, Pará" - 29º Cong. de Geologia, Vol. II, Belo Horizonte - 1976.
- (5) SATHLER G. - "Aspectos Geológico-Geotécnicos do Maciço Rochoso de Fundação das Estruturas de Concreto da Barragem de Tucuruí"-Te- se de Mestrado - UFRJ, Inst. de Geociências - 1977.
- (6) KOVARI K.; FRITZ P. - "Stabilitätsberechnung Ebener und Räumlicher Felbdschungen" - Rock Mech. Journal, Vol. 8, nº 2 - 1976.
- (7) BARTON N. - "Suggested Methods for the Description of Rock Masses, Joints and Discontinuities" - 2nd Draft of ISRM Working Party, Categories I 9 e I 10 - 1975.
- (8) CONSÓRCIO ENGEVIX-THEMAG - "Rel. nº TUC-10-4976-RE - Análises de Estabilidade ao Escorregamento do Vertedouro" - Eletronorte - 1980.

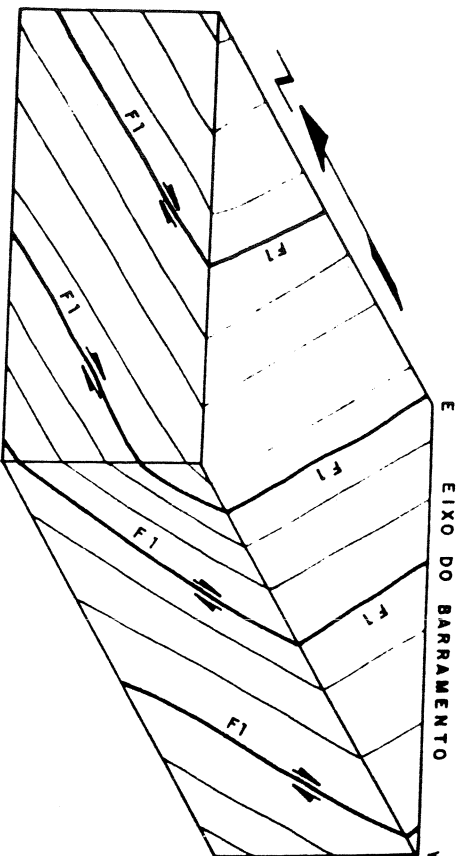




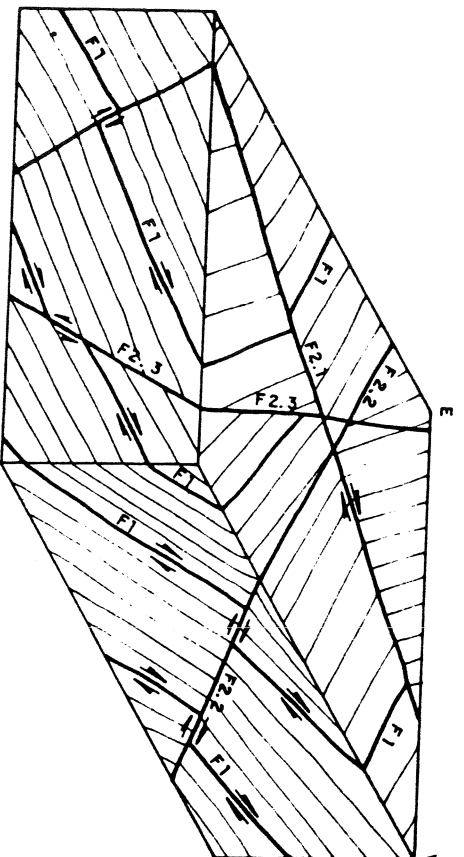
UHE DE TUCURUI  
**VERTEDOURO**  
 LOCALIZAÇÃO, PLANTA E CORTE TÍPICO

FIGURA 1

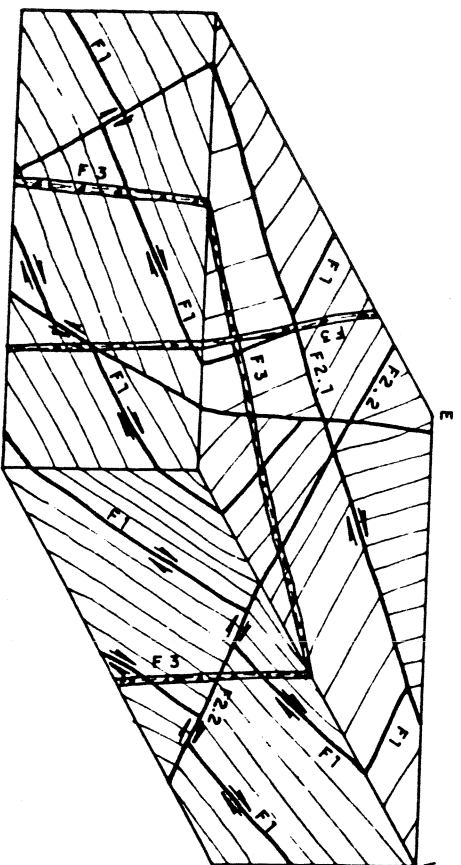




1ª FASE - ESTRATIFICAÇÃO + F1



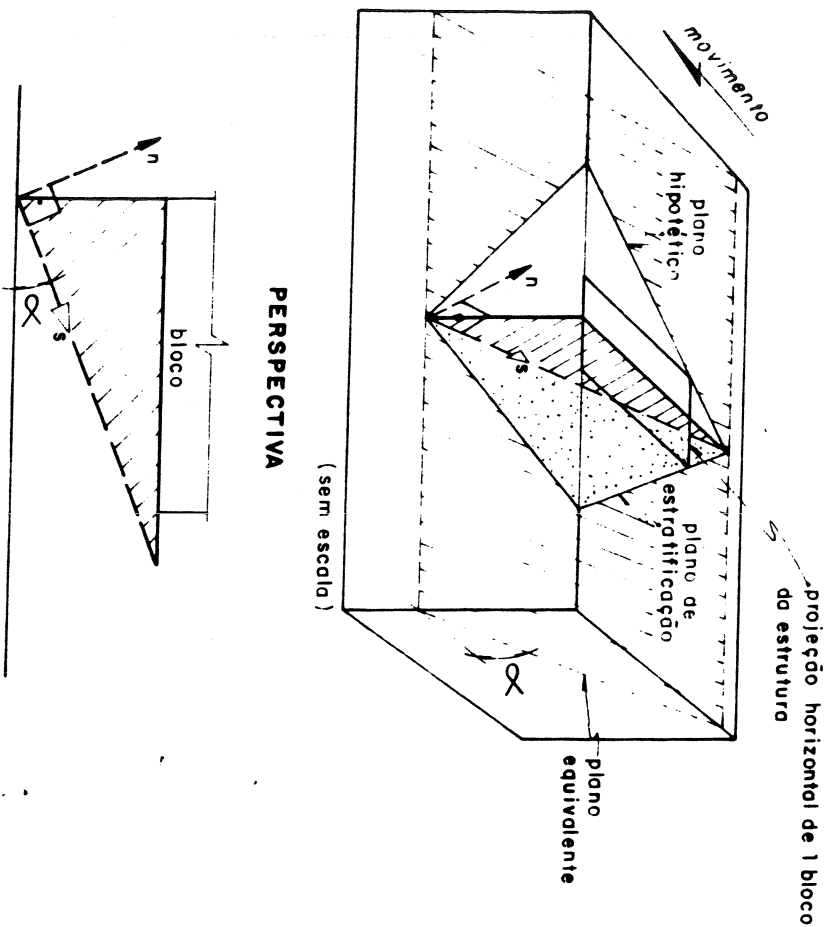
2ª FASE - F2



3ª FASE - F3

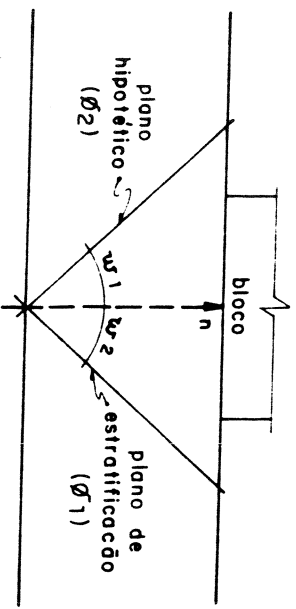
**FASES DE FORMAÇÃO DAS  
FALHAS NOS METASSEDIMENTOS**

**FIGURA 2**



PERSPECTIVA  
(sem escala)

PLANO NORMAL QUE CONTÉM A INTERSECÇÃO



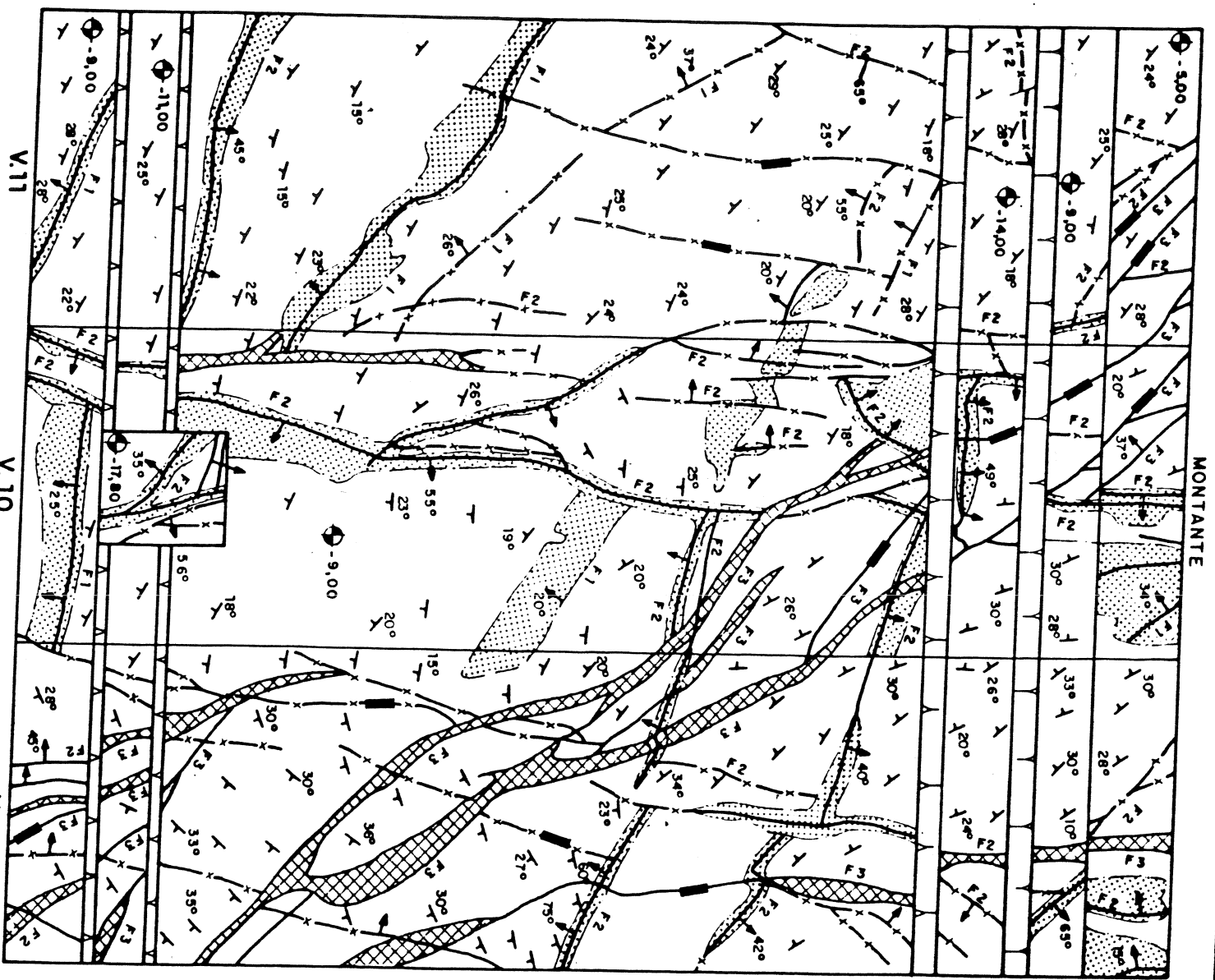
PLANO NORMAL À INTERSECÇÃO

$$\theta = \arctg \frac{\cos w_2 \cdot \operatorname{tg} \theta_1 + \cos w_1 \cdot \operatorname{tg} \theta_2}{\operatorname{sen} (w_1 + w_2)}$$

opud Kovari & Fritz (6)

EFEITO DE CUNHA

FIGURA 3



**LEGENDA**

- Falha Selada
- Falha aberta com preenchimento de material incoerente.
- Coixa de falha F3.
- Zonas mineralizadas
- Merquenho de falha
- Falha Subvertical
- Estratificação ou xistosidade
- F3 - Falhas F3
- Cotas
- F1 - Folhas F1
- F2 - Folhas F2

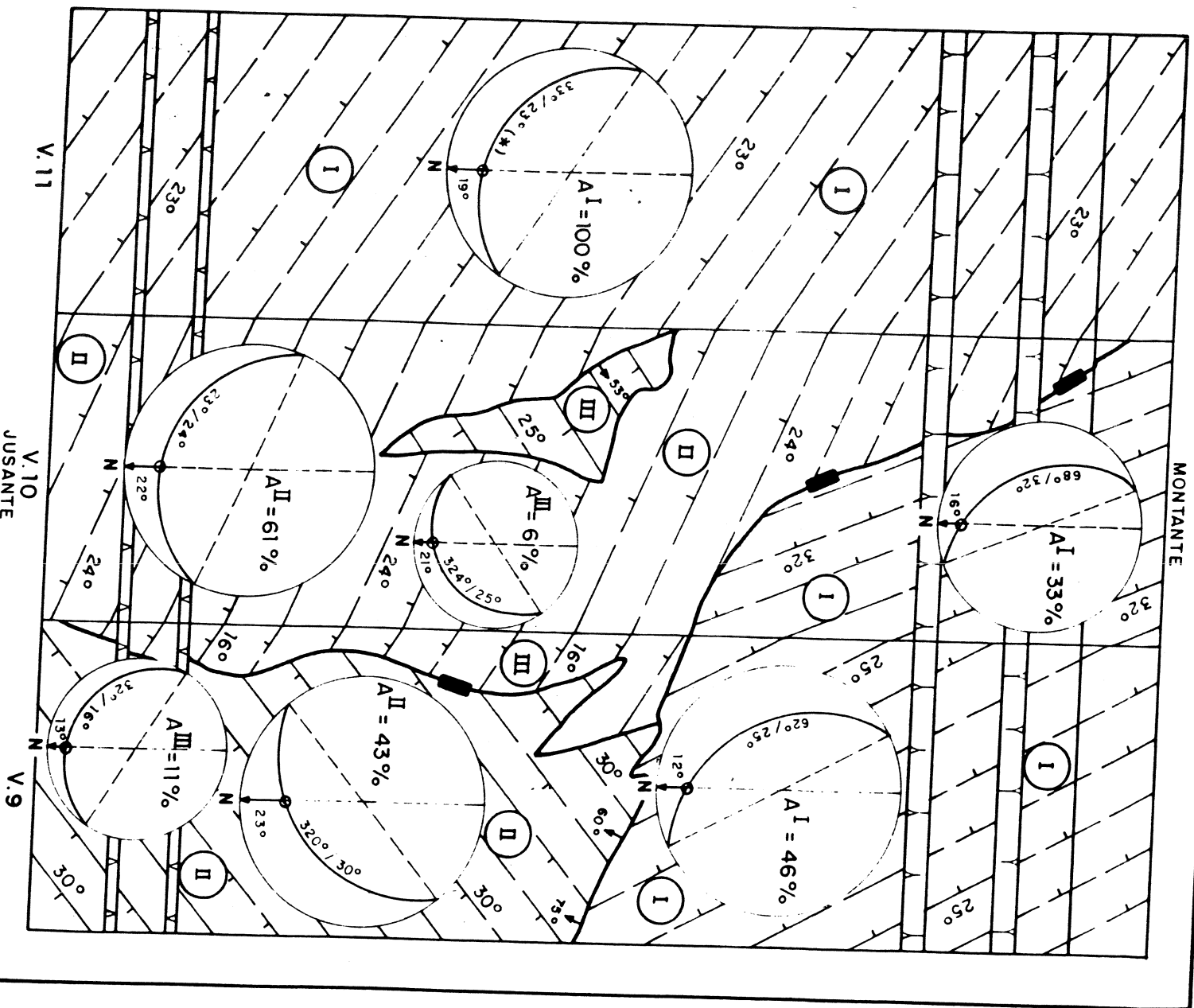
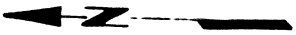
**VERTEDEURO**

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO**

BLOCOS V.9, V.10 e V.11

ESC 1:500

FIGURA 4



$\alpha = 19^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 16^\circ$
$C = 2,0 \text{ kgf/cm}^2$	$C = 3,0 \text{ kgf/cm}^2$	$C = 3,0 \text{ kgf/cm}^2$
$\varnothing = 42,30^\circ$	$\varnothing = 40,85^\circ$	$\varnothing = 43,40^\circ$

$\alpha$  = mergulho do plano de análise  
 $C$  = coesão no plano de análise.  
 $\varnothing$  = ângulo de atrito no plano de análise.

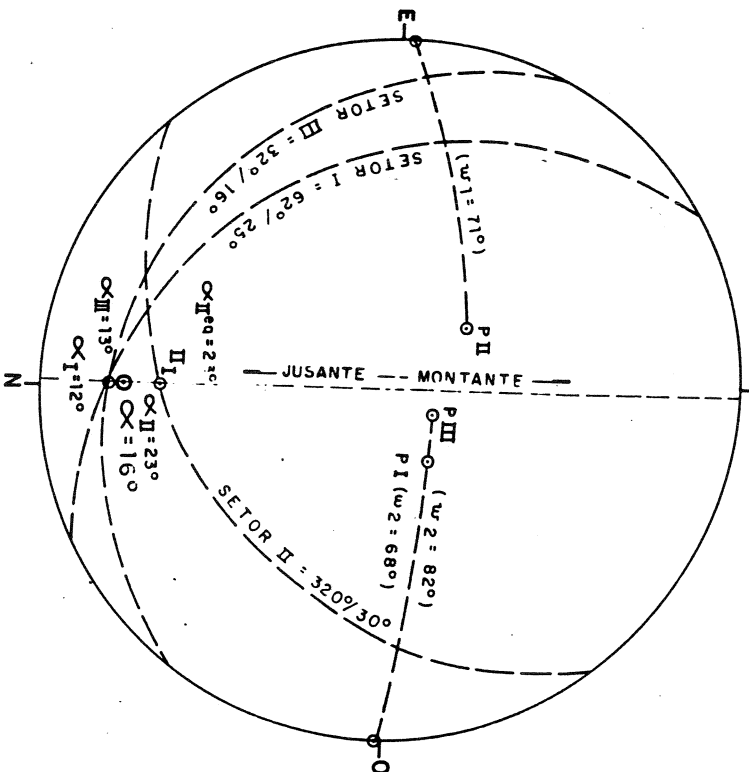
(\*)  $33\frac{1}{2}^\circ$  ← ângulo de mergulho  
 ↑ direção do mergulho

VERTEDEURO  
**SETORIZAÇÃO DA FUNDAÇÃO  
 E VALORES DE  $\alpha$ ,  $C$  e  $\varnothing$**   
 BLOCOS V.9, V.10 e V.11

ESC. 1:500

FIGURA 5

REDE DE WULFF PARA  
PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA



ÂNGULOS DE ATRITO DOS SETORES

SETOR I

$$\phi^I = \arctg \frac{\cos w_2 \cdot \lg \phi^I + \cos w_1 \cdot \lg \phi^2}{\sin (w_1 + w_2)}$$

$$w_1 = w_2 = 68^\circ$$

$$\phi^1 = 38^\circ$$

$$\phi^2 = 45^\circ$$

$$\phi^I = \arctg \frac{0,3746 \times 0,7812 + 0,3746 \times 1}{0,6946}$$

$$\phi^I = \arctg 0,9605 \quad \phi^I = 43,84^\circ$$

SETOR II

$$w_1 = w_2 = 71^\circ$$

$$\phi^1 = 38^\circ$$

$$\phi^2 = 45^\circ$$

$$\phi^II = \arctg 0,9419 \quad \phi^II = 43,28^\circ$$

SETOR III

$$w_1 = w_2 = 82^\circ$$

$$\phi^1 = 38^\circ$$

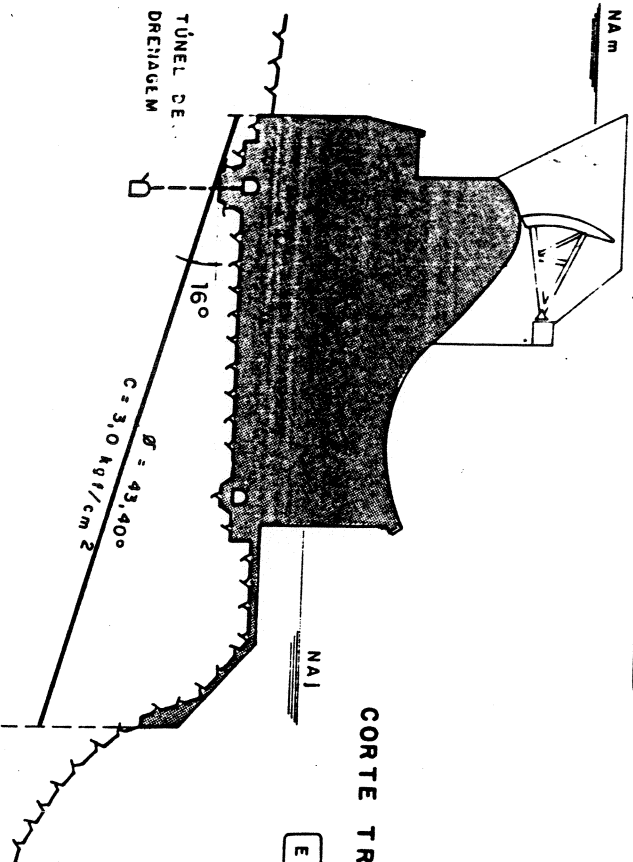
$$\phi^2 = 45^\circ$$

$$\phi^III = \arctg 0,8993 \quad \phi^III = 41,96^\circ$$

$\phi = \arctg \lg \phi^I \cdot A^I + \lg \phi^II \cdot A^II + \lg \phi^III \cdot A^III$   
 $A^I, A^II, A^III = \text{Áreas relativas dos setores (ver figura 5)}$

$$\phi = \arctg 0,9605 \times 0,46 + 0,9419 \times 0,43 + 0,8993 \times 0,11 = \arctg 0,9457$$

$$\phi = 43,40^\circ$$



CORTE TRANSVERSAL DO V.9

ESCALA 1:2000

VERTE DOURO  
CÁLCULO DO ÂNGULO DE ATRITO  
NO PLANO DE ANÁLISE

BLOCO V.9

FIGURA 6