



Barragens de concreto em abóbada com dupla curvatura.

Na década de 60, época do projeto e da construção da barragem do FUNIL no Rio de Janeiro, foram publicados vários artigos na revista ESTRUTURA pelos projetistas da obra.

Essa barragem do Funil é de concreto em abóbada com dupla curvatura.

O projeto foi feito por engenheiros portugueses, Manuel Rocha e Laginha Serafim, do LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Não havia computador disponível, nem elementos finitos que pudessem ser usados. Foram feitos modelos reduzidos, e as medições serviram de base para o projeto.

Portugal tem construído, desde 1950, muitas barragens de concreto em abóbada, a última em 2004.

Com o atual fácil acesso aos computadores e aos elementos finitos, a elaboração dos projetos avançou muito.

Os modelos reduzidos também continuam sendo muito usados.

Esses modelos reduzidos de hoje dispõem de novos materiais, de técnicas poderosas de aquisição de dados, de sensores em fibras óticas etc...

Com a atual tecnologia avançada do concreto, a construção produz concretos com baixo calor de hidratação, o que reduz os riscos de fissuração nas barragens.

Portugal continua na vanguarda dessas técnicas aplicadas às barragens em abóbadas com dupla curvatura.

Algumas recentes teses de pesquisa sobre esse tema estão citadas no texto, mostrando o atual estágio do desenvolvimento em Portugal.

...

A Barragem de Alqueva (520 megawatts) é a maior **barragem** da Europa Ocidental. Sua operação teve início em 2004.

Ver, a seguir, nos artigos publicados na revista ESTRUTURA, os conceitos usados na década de 60 no projeto da barragem do Funil / RJ.

Foram adicionadas algumas fotos para ilustrar o texto.



Barragens em abóbadas de concreto

Barragem do Funil - 1969 - RJ / Brasil -216 MW



Obra projetada com apoio em modelos reduzidos 1969

http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funil.asp

A Usina Hidrelétrica de Funil é diferente das demais usinas de FURNAS. Com uma abóbada de concreto, com dupla curvatura, ela foi construída no rio Paraíba do Sul, em Resende, no Estado do Rio de Janeiro. Sua operação teve início em 1969.



Foto Google 2012

O projeto foi feito pelo Eng. Joaquim Laginha Serafim, engenheiro da firma COBA e do LNEC. Também foi feito modelo reduzido : *Estudo experimental da barragem do Salto Funil e estudo em modelo reduzido dos órgãos hidráulicos do aproveitamento do Salto Funil.*

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Lisboa -1962-18 p. - Memória. 183 - Cota: APP-342|AHSTP



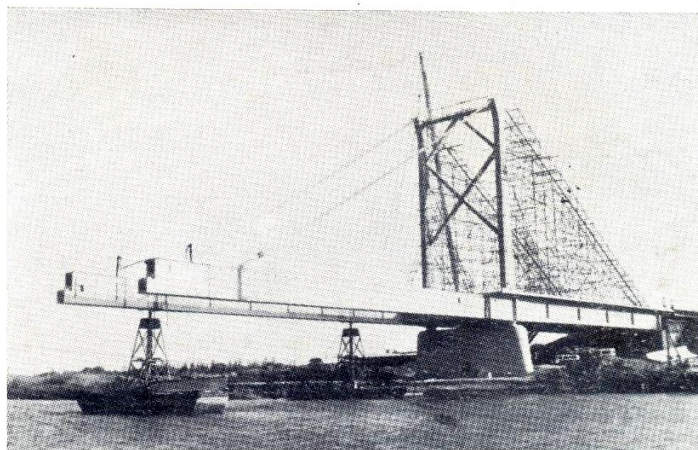
**Problema Físico das Barragens
em Abóbada de Concreto**
Prof. Manuel Rocha – LNEC

Prof. Eduardo C. S. Thomaz
Notas de aula

ESTRUTURA

REVISTA TÉCNICA

DAS CONSTRUÇÕES



FADIGA NAS PONTES
BARRAGENS ABÓBADAS
NORMA NB-2

1966 59

- Revista editada pelo Prof. Aderson Moreira da Rocha
- Prof. Manuel Rocha – Formulação do Problema Físico da Barragem Abóbada de Concreto : LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa



FORMULAÇÃO DO PROBLEMA FISICO DA BARRAGEM ABÓBODA*(¹)

MANUEL ROCHA (²)

1. Introdução

Tratando êste simpósio da teoria das barragens abóbada, compreende-se que os seus organizadores tivessem desejado que em primeiro lugar fôsse formulado o problema físico envolvido, dada a sua grande complexidade.

Vamos pois procurar nesta lição, por um lado, pôr em evidência os múltiplos parâmetros que influenciam o comportamento das barragens abóbada e, por outro lado, definir a idealização da realidade, isto é, o conjunto de hipóteses, a partir do qual devem ser desenvolvidas as teorias de cálculo dessas estruturas. Tal como em tôda a teoria física, essa idealização deve traduzir o que é relevante do ponto de vista da finalidade a atingir com a teoria, finalidade que, no caso presente, é o julgamento da segurança da barragem, a qual implica na determinação do estado de tensão desenvolvido.

Os parâmetros que influenciam o estado de tensão das barragens abóbada, assim como de qualquer outra estrutura, são:

- a forma da estrutura.

- as propriedades do material ou materiais constituintes
- as ligações exteriores, isto é, no caso em consideração, as fundações
- as solicitações actuantes, quer dizer, as ações de qualquer natureza que determinem deformações ou tensões.

Além dêstes parâmetros os valores das tensões calculadas dependem ainda das hipóteses simplificadoras introduzidas no estabelecimento das próprias teorias de cálculo.

Nos artigos seguintes vamos considerar sucessivamente todos os factores que acabam de ser mencionados.

2. As formas das barragens abóbada

As formas das barragens abóbada são muito variáveis, dependendo, por um lado, da forma do vale e das propriedades mecânicas das suas vertentes e por outro lado, das concepções dos projetistas sôbre o funcionamento estrutural e dos conhecimentos e meios de que êles dispõem para a elaboração dos projetos. Não há formas padrão,

(¹) Versão em português da lição inaugural do “Simpósio sôbre a teoria das barragens abóbada”, organizado pela Universidade de Southampton, Inglaterra.

(²) Diretor do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal.



verificando-se mesmo uma tendência para a diversificação, em consequência da preocupação de busca de soluções mais económicas e do progresso dos conhecimentos e dos meios analíticos e experimentais de previsão do comportamento, donde resulta a possibilidade de uma adequação cada vez mais perfeita entre a estrutura e as condições do local onde vai ser construída.

As concepções gerais sobre as formas e o funcionamento das barragens abóbada sofreram uma profunda evolução nas últimas décadas. Essa evolução ainda prossegue mas, segundo se nos afigura, de maneira mais atenuada, o que não é de estranhar se se atender a que as concepções cada vez mais se apóiam em conhecimentos de carácter científico e menos na intuição individual. Este factor está contribuindo para uma certa unidade de concepção geral que se sobrepõe à diversificação imposta pelas condições locais a considerar em cada caso.

Nas concepções que primeiro surgiram, as barragens abóbada eram assimiladas a uma série de arcos sobrepostos, cuja interação era desprezada, e ao paramento de montante era dada a forma cilíndrica, vertical, de diretriz circular. Os arcos eram calculados pela fórmula dos tubos, donde resultavam barragens com arcos de espessura constante. Reconhecida a necessidade de ter em consideração o encastramento nas fundações, daí resultou a adoção de arcos de espessura variável, crescendo para as nascenças, em cujo cálculo era possível ter em consideração a deformabilidade das fundações.

Um passo fundamental foi dado ao reconhecer-se o interesse, para a redução do volume da obra, de dar aos arcos raios decrescendo com a cota, de harmonia com a diminuição da abertura do vale. Daqui resultou uma modificação profunda da forma, pois que se foi obrigado a abandonar a forma cilíndrica vertical do paramento de montante, aparecendo assim a barragem de dupla curvatura. Calculados os arcos pela fórmula dos tubos, concluiu-se que, para um dado valor da tensão desenvolvida, σ , e da corda do arco, c , o volume mínimo de cada arco, V ,

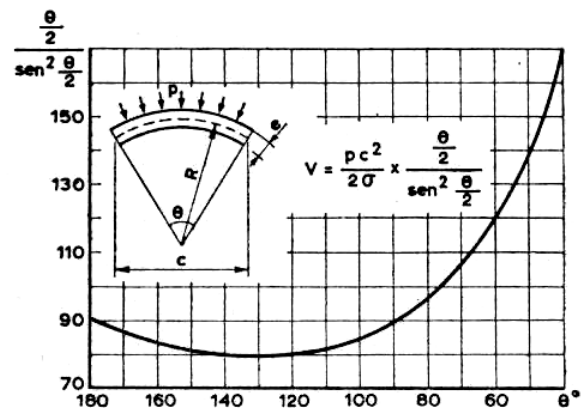


Fig. 1

e portanto da barragem, se obteria dando aos arcos um ângulo ao centro de cerca de 133° (fig. 1), conclusão que muito tem influenciado as formas das barragens. Porém, a preocupação, que por vezes ainda se verifica, de adotar tal valor não se justifica. De fato, a curva de variação do volume tem um mínimo muito pouco acentuado (fig. 1), de tal modo que, por exemplo, para um ângulo $\theta = 100^\circ$ o acréscimo de volume é somente de cerca de 7%, variação que não tem significado, dadas as grosseiras hipóteses em que se



apóia o cálculo do volume V . A tendência geral verificada nos últimos anos tem sido a de reduzir os ângulos ao centro, com vista não só a obter soluções com menor volume de betão, quando dimensionadas por critérios mais evoluídos, mas também a melhorar as condições de inserção da barragem, isto é, a aproximar da normal à vertente o impulso descarregado sobre a fundação. Se se atender a que a segurança das barragem abóbada depende essencialmente das suas fundações, esta preocupação reveste a maior importância, devendo mesmo aceitar-se muitas vês a sua satisfação à custa desenvolvidas na estrutura.

Na evolução das concepções sobre as formas e o funcionamento das barragens abóbada, outro marco fundamental é a consideração da real solidariedade que existe entre os arcos de uma barragem. Para dimensionar as barragens abóbada de harmonia com essa concepção desenvolveram-se os dois bem conhecidos tipos de métodos de cálculo, o designado por “trial-load” e os baseados na teoria das cascas, aos quais os computadores eletrônicos trouxeram nos últimos anos apoio precioso. Simultaneamente foram desenvolvidas técnicas de estudo sobre modelo que são hoje correntemente usadas, sobretudo no projeto de obras importantes.

A consideração da solidariedade entre os arcos tem permitido aproveitar melhor o material, isto é, obter soluções mais delgadas e mais econômicas. Verifica-se um progressivo refinamento das formas, guiado pelo desejo de

aquela para a qual a barragem funcionasse como uma membrana submetida a uma compressão uniforme. O método experimental da membrana fornece sugestões preciosas sobre as formas mais convenientes a adotar para cada forma do vale. ⁽¹⁾

Para melhorar a distribuição das tensões constata-se a tendência nos últimos anos para adotar arcos com raio de curvatura variável, crescendo para as nascenças tendo sido usado arcos circulares de três, ou mesmo mais, centros, arcos parabólicos e arcos elípticos, em geral com espessura variável. Acresce que estas formas apresentam a vantagem de melhorar a inserção da barragem nas vertentes do vale. Deve notar-se que para vales muito estreitos, nos quais o efeito consola, isto é, o efeito da solidariedade entre os arcos, não é relevante, a adoção de arcos não circulares tem menos interêsse. Também para vales com grande abertura parece ter pouco interêsse a adoção de arcos não circulares, uma vez que o comportamento dos arcos é sobretudo comandado pela deformabilidade das consolas. ⁽²⁾

É importante referir que a solidariedade entre os arcos acarreta, em certas zonas, o desenvolvimento de trações sob a ação da pressão hidrostática, em especial na base a montante, na direção vertical, σ_{pm} (fig. 2), efeito êste que é tanto mais acentuado quanto mais aberto é o vale. A preocupação de anular, ou pelo menos reduzir substancialmente, estas trações à custa do aproximação da forma ideal, que seria pêso próprio constitui um fator deter-

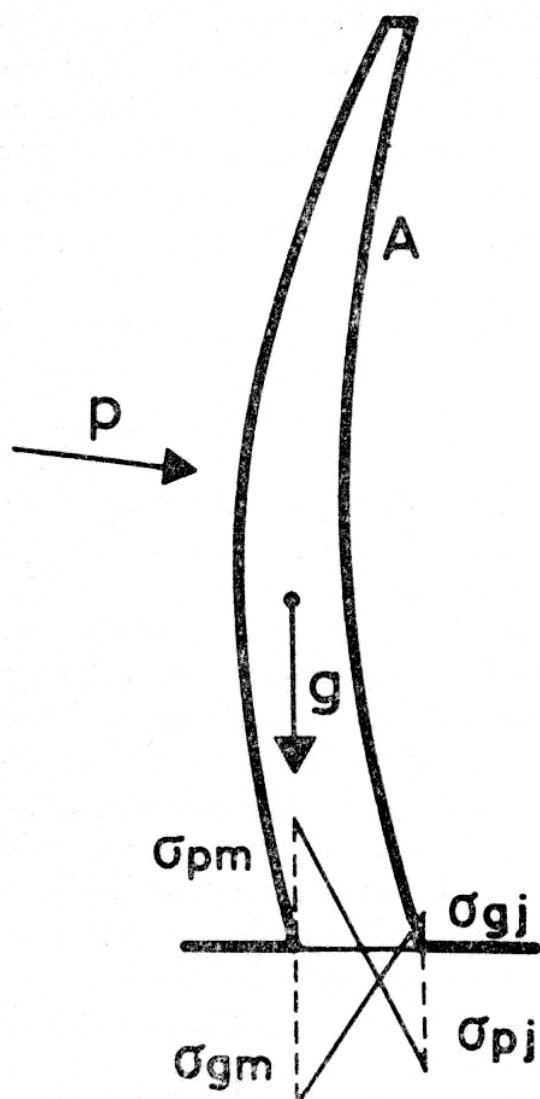


Fig. 2

minante da tendência referida para uma certa unidade de concepção geral de formas. De fato, para conseguir tal resultado é atualmente muito corrente dar à consola central uma forma análoga à indicada na fig. 2, com um desaprumo para montante tal que o pêso próprio instala uma compressão σ_{gm} suficientemente elevada para compensar a tração devida à pressão hidrostática, sem que a jusante o pêso instale uma tração σ_{gj} importante. Além disso, é por vezes necessário dar um desaprumo para jusante na parte superior, a fim do pêso próprio podem tam-

bém compensar tensões de tração verticais na zona A, instaladas pela pressão hidrostática. É oportuno referir que, apesar da concepção das barragens abóbada ser muito influenciada, sobretudo no caso de vales largos, pela preocupação da limitar o valor das trações na base a montante, o fato é que a repercussão na segurança da estrutura da eventual fendilhação nesta zona está longe de estar esclarecida.

Quanto às formas das barragens abóbada, é ainda digna de nota a tendência para aceitar vales assimétricos, renunciando-se aos trabalhos de escavação necessários para assegurar a simetria. Tal é possível em virtude do desenvolvimento dos conhecimentos gerais sôbre o funcionamento estrutural das barragens abóbada e da capacidade dos meios de previsão do seu comportamento. No caso de vales com uma assimetria muito marcada é mesmo aconselhável que os próprios arcos da barragem sejam assimétricos e com curvatura mais acentuada na vizinhança da encosta mais inclinada, tal como é sugerido pelo método da membrana.

Ao referir as formas das barragens abóbada a considerar nas teorias de previsão do seu comportamento, não pode deixar de se mencionar as aberturas destinadas a descarregadores de superfície, a descargas de meio fundo e de fundo, a condutas para alimentação de turbinas, etc. Numerosos ensaios sôbre modelo de barragens abóbada com aberturas de variadas formas, dimensões e localização têm-nos mostrado que, dentro da precisão com interêsse na prática, mesmo aberturas



com dimensões importantes em face da barragem, somente influenciam localmente o estado de tensão. ⁽³⁾ Isto é, quando há aberturas em jogo elas podem ser ignoradas na determinação do estado geral de tensão da barragem, e o estado de tensão na vizinhança de uma abertura pode ser determinado isolando uma zona de barragem que a contenha e considerando as superfícies cortadas submetidas às tensões do estado geral. Porém, as concentrações de tensões em torno das aberturas constituem em regra equilíbrios tridimensionais complexos cuja determinação só pode ser feita com a conveniente precisão, na maior parte dos casos, por via experimental. Quanto às tensões de compressão desenvolvidas nestas concentrações, elas não levantam qualquer problema, o que é consequência dos valores relativamente baixos das tensões de compressão adotadas no projeto das barragens abóbada, os quais permitem assim o desenvolvimento de elevados fatores de concentração. Quanto às tensões de tração, estudos diversos sobre modelo têm-nos evidenciado que as fissuras que poderão ocorrer não são em regra progressivas, limitando-se à zona onde se desenvolve a perturbação causada pela abertura, o que é compreensível, uma vez que o estado geral de tensão de uma barragem abóbada é de compressão. Portanto, as fendas que possam ocorrer não comprometerão a segurança da estrutura mas podem comprometer a estanquidade da obra.

Outro aspecto a considerar é a frequente existência de encontros gravidade. Quando os encontros têm uma altura importante em face da Barra-

gem digamos superior a $1/5$ como ordem de grandeza, eles podem influenciar o estado geral de tensão da estrutura e portanto deve procurar-se dispor de métodos de cálculo com capacidade para os considerar. Mesmo para encontros com menor altura é necessário poder prever o estado de tensão na sua vizinhança nos próprios encontros.

Um problema que por vezes se levanta é o da averiguação da influência no estado de tensão da estrutura, de eventuais fendas que possam ocorrer em zonas onde se desenvolvam tensões de tração ou mesmo de juntas que se prevejam nessas zonas para nelas ter lugar a libertação das trações. É por isso conveniente que os métodos de cálculo tenham possibilidade de tratar tal problema. Tal como já se referiu em relação às aberturas, também diversos estudos sobre modelo nos têm mostrado que em geral a influência de fendas se faz sentir somente na sua vizinhança. ⁽³⁾

Uma questão de ordem geral que se põe ao definir o sólido barragem abóbada é a da eventual descontinuidade introduzida pelas juntas verticais entre blocos. De fato, em virtude da retração do betão, devida essencialmente à libertação do calor de hidratação, e por vezes, também, de assentamentos diferenciais das fundações, essas juntas abrem, de tal modo que, apesar da cuidada injeção de que são objeto, se pode levantar a dúvida sobre a legitimidade de considerar uma barragem abóbada como um sólido contínuo, tanto mais que são raras as oportunidades de observar diretamente a maneira como as caldas de injeção preenchem as juntas.



A observação do comportamento das barragens abóbada, em especial as leituras de extensômetros colocados na vizinhança das juntas, revela porém que em regra as juntas não introduzem descontinuidade no campo de tensões. Um caso convincente que tivemos ocasião de estudar foi o de uma obra com cerca de 35 m de altura, com espessuras bastante reduzidas, cujas juntas, por se tratar de uma ensecadeira, foram injetadas com pouco cuidado, além de que também existiam juntas horizontais de betonagem fissuradas, conforme evidenciam os repasses que

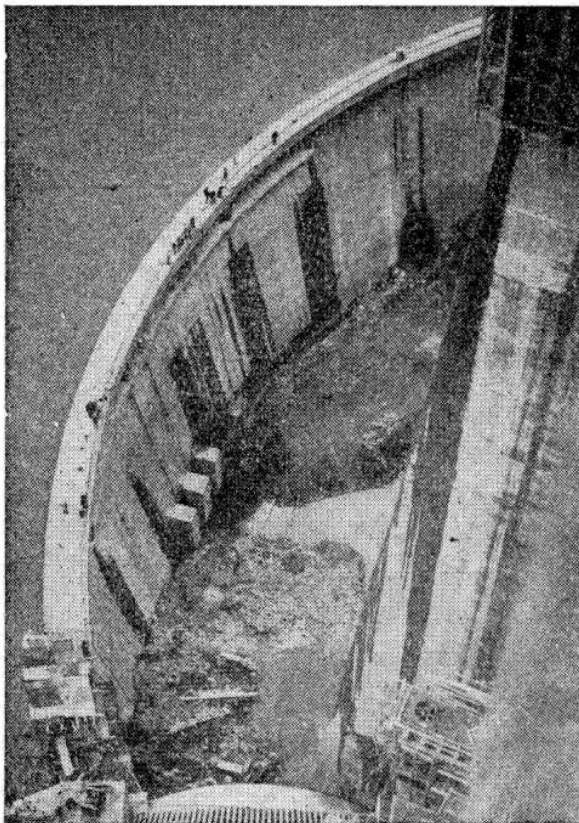


Fig. 3

que se observam na fig. 3. Apesar da barragem mais se afigurar como um conjunto de blocos ajustados, a medição de tensões e o seu confronto com resultados de estudos sobre modelos e

de cálculos mostraram que a obra se comportava como um sólido contínuo (4).

Refiramos finalmente o problema das formas das barragens abóbada no que respeita à determinação das tensões devidas ao peso próprio, solicitação esta que tem a particularidade de se instalar à medida que prossegue a construção da barragem, isto é, trata-se de uma solicitação que atua num sólido cuja forma varia continuamente. No caso dos blocos da barragem serem desaprumados para montante, tal como na fig. 2, à medida que prossegue a construção eles tendem a deslocar-se para montante e a afastarem-se, podendo, portanto, o estado de tensão devido ao peso ser calculado por blocos verticais independentes. Quanto a barragem é desaprumada para jusante, em toda a altura ou somente na parte superior, há a tendência para os blocos se encostarem e assim constituírem uma abóbada que irá transferir lateralmente parte do efeito do peso, dependendo essa transferência do maior ou menor desaprumo da barragem, da abertura do vale e da maneira como cresce a construção. Estudos recentes sobre modelo, (5) mostraram que este efeito pode ser importante, sobretudo no estado de tensão na parte inferior da barragem.

Do que dissemos até agora sobre as formas das barragens abóbada, a conclusão do caráter geral a tirar é que os métodos do cálculo, para terem interesse para o projeto, têm de ser extremamente versáteis no que respeita à possibilidade de consideração de

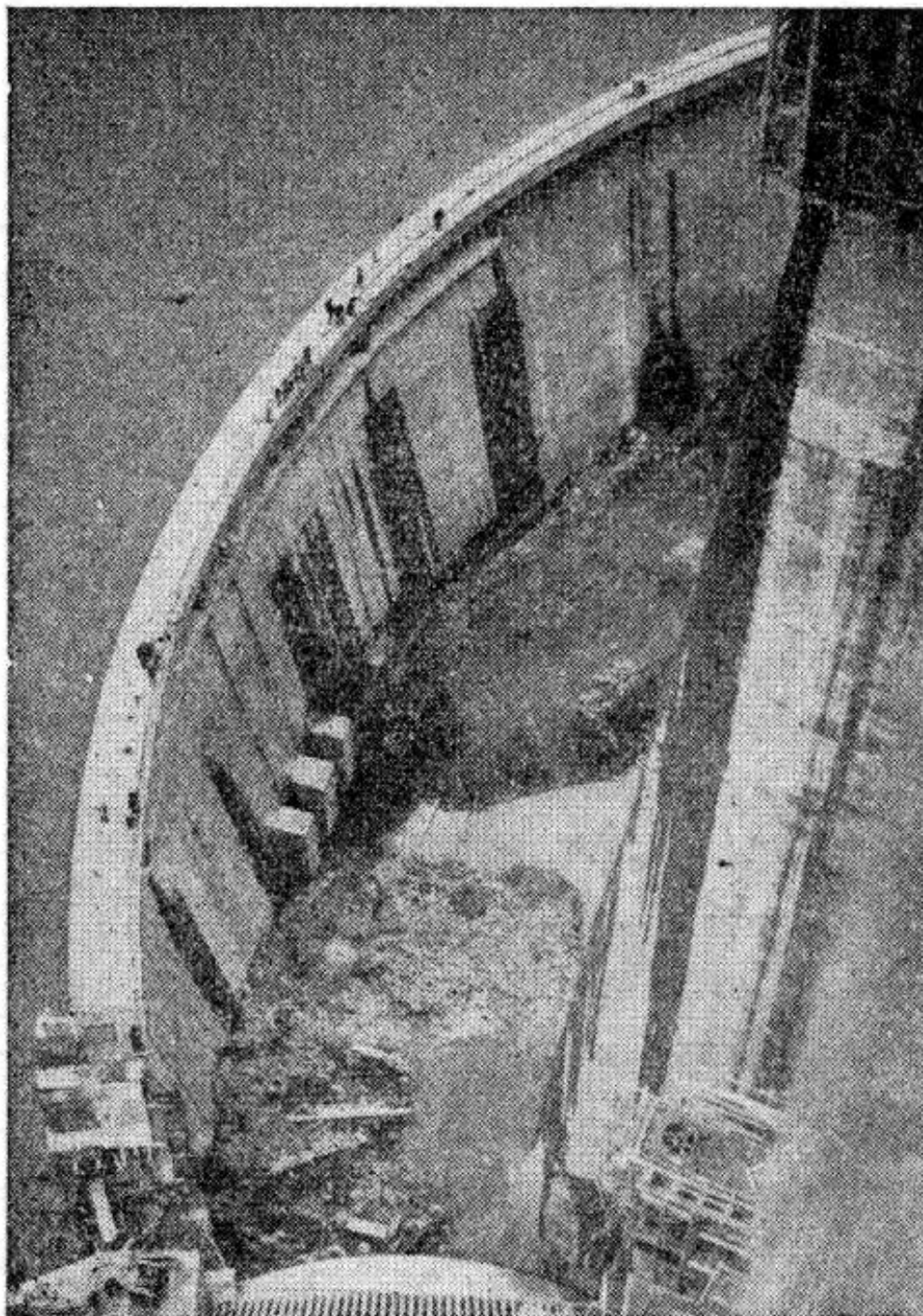


Figura 3 Ampliada
Juntas injetadas com poucos cuidados.



formas. De fato, uma barragem abóbada é em geral um sólido com raios de curvatura e espessuras variáveis de ponto para ponto e ainda com singularidades diversas, tais como aberturas, encontros gravidade, fendas e juntas. Além disso, na determinação do efeito do peso é por vêzes necessário considerar a sua instalação progressiva numa abóbada de forma variável.

É oportuno frizar a carência que se verifica de estudos sistemático sobre a influência dos numerosos parâmetros característicos das formas das barragens abóbada.

3. Propriedades do betão

Trataremos em primeiro lugar o problema das propriedades do betão a considerarmos métodos de cálculo destinados à previsão do estado de tensão sob a ação das solicitações previstas no projeto. Vamos pois analisar em que medida é legítimo considerar o betão como um material homogêneo e obedecendo à lei de Hooke. Depois afloraremos o problema das propriedades do betão a considerar nos métodos de cálculo em relação à rotura.

É bem sabido que, mesmo para valores muito baixos das tensões, o betão exhibe deformações função do tempo. No entanto pode considerar-se, com suficiente aproximação, que até aos valores das tensões que se desenvolvem habitualmente nas barragens abóbada, o betão é um material visco-elástico e que as deformações devidas a sucessivas fôrças aplicadas são sobreponíveis. ⁽⁶⁾

Sendo assim, pode demonstrar-se que se verifica uma conseqüência com grande importância prática: o estado de tensão de uma barragem de betão devido à aplicação de fôrças quaisquer pode ser calculado admitindo que o material obedece à lei de Hooke. ⁽⁷⁾ Isto desde que se admita que existe um coeficiente de Poisson para as deformações visco-elásticas, o que pode ser admitido com suficiente aproximação. É oportuno referir a inconveniência de considerar nulo o coeficiente de Poisson, como é feito em certos métodos de cálculo, pois o seu valor tem uma influência apreciável no estado de tensão, sobretudo no valor das segundas tensões principais. ⁽⁸⁾

Observa-se que, em rigor, o cálculo admitindo a elasticidade perfeita exige que as fundações exibam deformações função do tempo e que a relação entre os módulos de elasticidade do betão e da rocha se mantenha constante e igual à relação dos módulos de elasticidade instantâneos. Deve contudo notar-se que tal exigência não tem relevância, dado que, mesmo em rochas com um módulo de elasticidade bastante baixo — sômente as que influenciam apreciavelmente o estado de tensão — a influência não é em regra importante, como se verá no artigo seguinte, sendo diminuta a sua repercussão no estado de tensão.

Outra observação a fazer diz respeito à heterogeneidade da barragem resultante da diminuição da idade do betão da parte inferior para a superior e portanto da conseqüente variação das suas propriedades visco-elásticas. Da-



qui resulta um incremento da deformabilidade do material de baixo para cima da barragem, que equivale de certo modo a uma redução progressiva de espessura. Esta sòmente poderá influenciar o dimensionamento da estrutura quando o betão da parte superior fôr ainda muito jovem na altura em que é atingida pela água do reservatório uma cota vizinha da máxima, o que não é corrente, pelo menos em obras importantes.

Um problema que se põe é o das propriedades do betão a considerar na previsão do efeito das variações de temperatura, as quais correspondem a uma imposição de deformações e não de fôrças. Então, a fluência do betão influencia em geral as tensões desenvolvidas, reduzindo-as, e tanto mais quanto mais lentamente se processar a variação de temperatura. Discutiremos adiante (art. 5) a legitimidade de substituir, como é prática corrente, a distribuição real de temperaturas ao longo da espessura das barragens abóbada por uma distribuição linear, desprezando o que é por vêzes designado por efeito pele. Quer o efeito da distribuição linear de temperatura, quer o efeito pele serão influenciados pela fluência. No entanto, como as tensões desenvolvidas pelo primeiro são em regra pouco importantes em face das devidas à pressão hidrostática, o problema dêsse efeito não assume relevância. Porém, as importantes tensões instaladas pelo efeito pele podem ser substancialmente reduzidas pela fluência, para a onda anual de temperatura, como foi evidenciado por cálculos de

comportamento visco-elástico, ⁽⁹⁾ mesmo no caso de betão com bastante idade.

Em relação aos efeitos da temperatura, outro problema que se levanta é o da influência do calor de hidratação. Dada a elevada taxa de crescimento do módulo de elasticidade instantâneo e de decrescimento das deformações de fluência nas primeiras idades do betão, o efeito da fluência no estado de tensão provocado pelo calor de hidratação ainda é mais importante. Cálculos ⁽¹⁰⁾ e observações têm mostrado que se dá mesmo a inversão do sinal das tensões que se desenvolveriam em regime elástico, podendo instalar-se tensões de valor bastante elevado.

No cálculo do efeito do pêso próprio o betão pode considerar-se elástico, uma vez que se trata da ação de uma fôrça exterior. No entanto, no caso de se desenvolver durante a construção um efeito abóbada apreciável, pode acontecer que seja relevante a influência da heterogeneidade resultante da diferença de idades do betão, o que se traduzirá por uma transferência de tensões para a zona inferior da estrutura.

Outra questão que se pode levantar é a da influência da heterogeneidade do betão no estado de tensão, em virtude da variação do seu módulo de elasticidade de ponto para ponto. Mesmo que se verifique um desvio quadrático médio de 20% na resistência do betão — valor que não é provável ser excedido — a êle corresponderá um desvio inferior a 10% no módulo de elasticidade o que significa



ser improvável a ocorrência de desvios superiores a 20% ou 30% em relação ao módulo de elasticidade médio. Estudos em modelos heterogêneos mostraram que, mesmo variações do módulo de elasticidade como as que se acabam de referir, têm uma reduzida repercussão no estado geral da tensão. Se atentarmos a que os desvios considerados se referem aos ensaios correntes, sobre peças com volumes do poucos litros, e que, portanto, os desvios respeitantes a volumes significativos da estrutura serão muito mais pequenos, podemos concluir que não haverá necessidade de considerar a dispersão das propriedades no caso de toda a barragem ser construída com um mesmo tipo de betão.

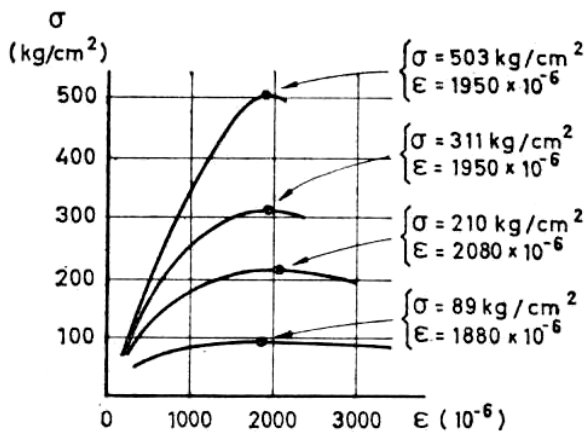


Fig. 4

Finalmente consideremos o problema das propriedades do betão a ter em conta no cálculo das barragens abóbada em relação à rotura, limitar-nos-emos a chamar a atenção para a influência da qualidade do betão nas deformações de rotura, as quais têm um papel relexante no processo de redistribuição de tensões fora da fase elástica, como tivemos ocasião de verificar

experimentalmente. Na fig. 4 apresentam-se curvas obtidas em ensaios de ocompressão de betões com diversas resistências. (11). Como se vê, a extensão correspondente à tensão máxima é aproximadamente a mesma para todos os betões, mas a extensão de rotura aumenta substancialmente quando decresce a resistência do betão.

Em resumo, quanto às propriedades do betão a considerar no projeto das barragens abóbada, pode afirmar-se ser legítima, nas condições habituais, a hipótese do betão ser um material homogêneo e obedecendo à lei de Hooke, no que respeita ao cálculo do efeito das forças exteriores. Quanto aos efeitos da temperatura, há necessidade, em certos casos, de considerar o comportamento visco-elástico do betão.

4. Condições de ligação exterior: fundações

A previsão do comportamento das barragens abóbada, como de qualquer outra estrutura, exige o conhecimento das condições de ligação exterior do sólido, isto é, no caso em consideração, das relações entre as forças e os deslocamentos das fundações. Dada a acentuada heterogeneidade que em regra exibem os maciços rochosos, há em geral necessidade de considerar a deformabilidade como variável ao longo da fundação. Além disso, em cada ponto, as deformações são, na maior parte dos casos, funções do tempo, da direção de atuação das forças — consequência da anisotropia — e são muito influenciadas pela ocorrência de diaclases, falhas e outros acidentes geoló-



gicos. Dêste modo, a caracterização da deformabilidade das fundações constitui, muitas vezes, uma das maiores dificuldades que se apresentam ao projetista de uma barragem abóbada.

Procuramos analisar qual o grau de influência da deformabilidade das fundações no comportamento das barragens abóbada, a fim de colher uma ideia geral sobre a “finesse” com que é necessário tratar o problema. Certamente que não é possível estabelecer regras rígidas, uma vez que essa influência dependem de numerosos parâmetros, entre os quais citamos a extensão das zonas em que se verificam dados valores da deformabilidade, a forma do vale, especialmente a sua abertura e simetria, e a rigidez da barragem. Apesar destas limitações, procurámos num trabalho recente⁽¹²⁾ sintetizar os resultados de numerosos estudos sobre modelos empreendidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia, Civil, de Lisboa, sobre a influência da deformabilidade das fundações. Tomando como situação de referência o estado de tensão de uma barragem abóbada quando a relação entre os módulos de elasticidade da fundação e do betão, $\frac{E_f}{E_b}$, é tomada igual à unidade, concluímos, necessariamente em termos muito gerais, que a variação do estado de tensão com a relação dos módulos se dá conforme indicado na fig. 5.

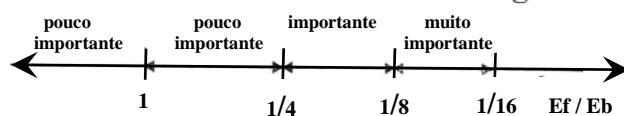


Fig. 5

Como se vê, para valores de $\frac{E_f}{E_b}$ supe-

riores à unidade, os quais são pouco frequentes na prática, e para os compreendidos entre a unidade e $\frac{1}{4}$, a influência de $\frac{E_f}{E_b}$ é pouco importante, torna-se muito importante para valores inferiores a $\frac{1}{8}$ e para valores menores que $\frac{1}{16}$ o funcionamento, e mesmo a concepção, da estrutura dependem fundamentalmente das fundações.

Uma primeira conclusão de ordem geral que se pode tirar da fig. 5 é que as barragens abóbadas não são tão sensíveis à deformabilidade das fundações como por vezes se pensa, podendo ser construídas sobre fundações com módulos de elasticidade muito baixos. Os resultados de estudos sobre modelo apresentados na fig. 6 confirmam a pequena influência da deformabilidade das fundações. Apesar da redução de $\frac{E_f}{E_b}$ para $\frac{1}{3}$ e $\frac{1}{7}$, nas zonas indicadas, o estado de tensão sofreu uma pequena variação em relação ao

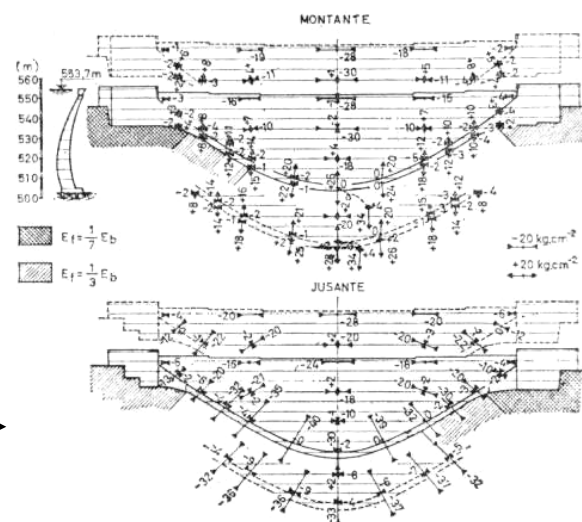


Fig. 6



MONTANTE

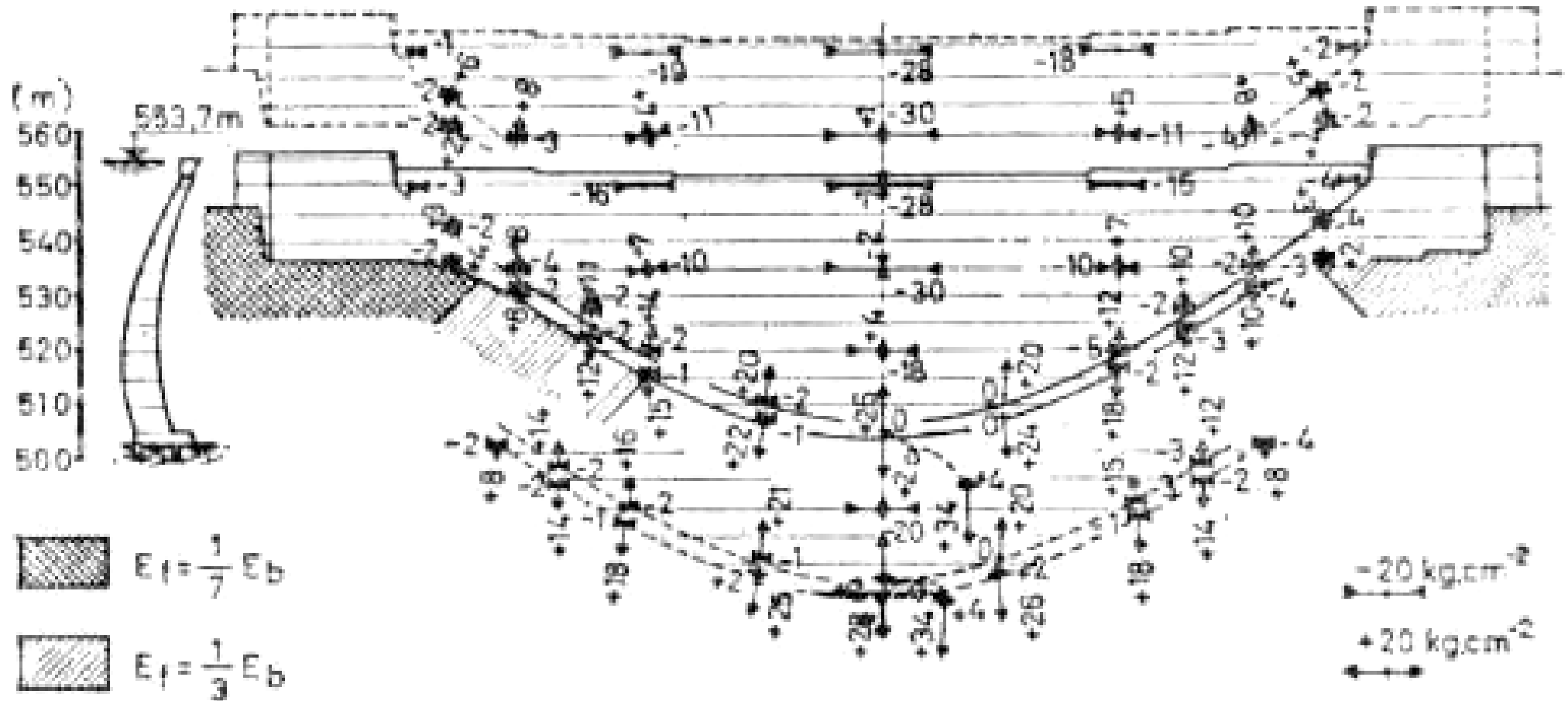


Figura 6 ampliada - MONTANTE



JUSANTE

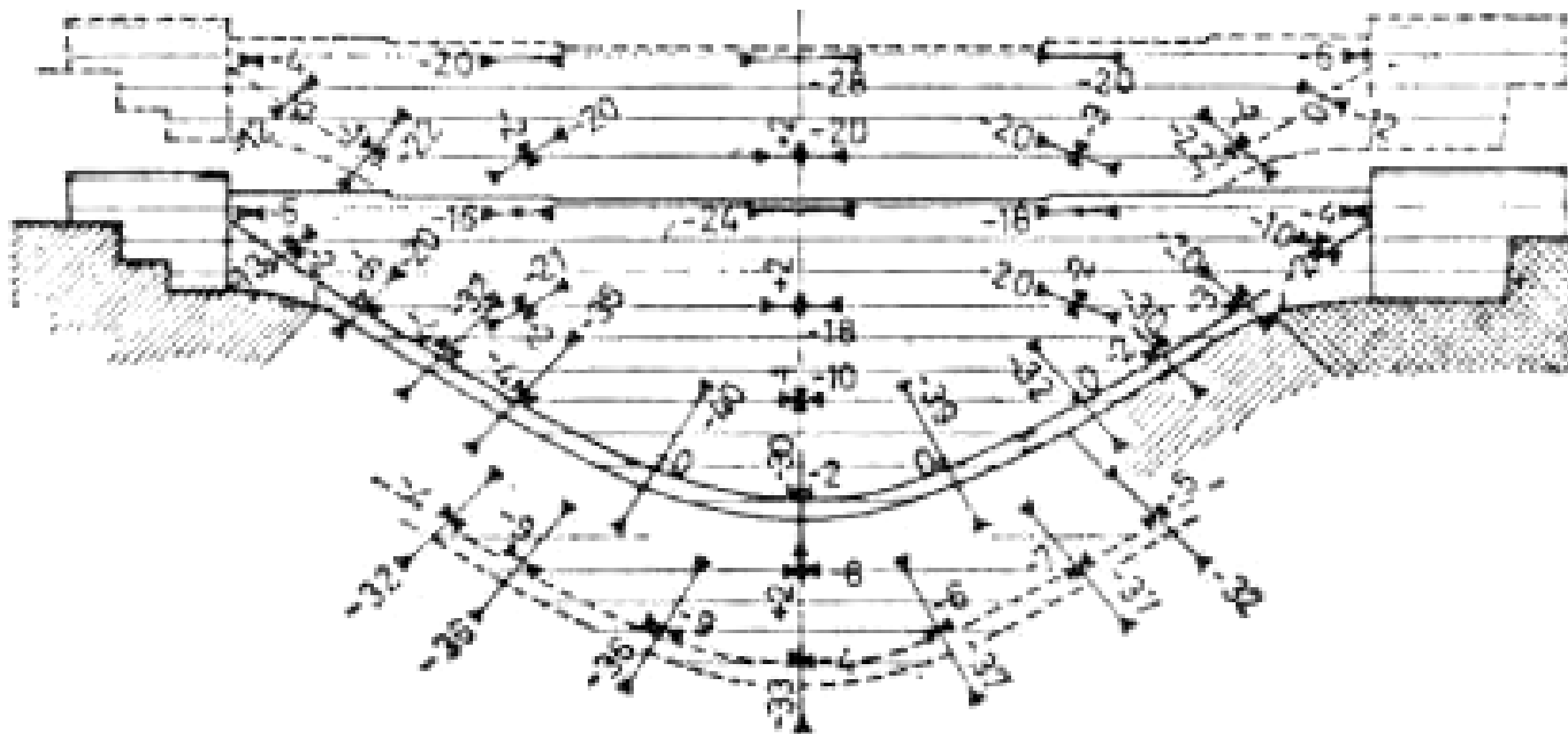


Figura 6 ampliada - JUSANTE



correspondente à condição $\frac{E_f}{E_b} = 1$, o qual está indicado nas partes da figura a traço interrompido.

Para valores de $\frac{E_f}{E_b}$ até cerca de $\frac{1}{4}$, que são muito correntes, basta entrar nos cálculos com a sua ordem de grandeza. A medida que decresce $\frac{E_f}{E_b}$ é necessário conhecer cada vez com maior precisão os valores de E_f , mas, por exemplo, mesmo para $\frac{E_f}{E_b} = \frac{1}{16}$, que é uma situação rara dadas as condições de fundação correntemente exigidas, variações de E_f de 20% não têm em regra influência apreciável, isto é, bastará distinguir no cálculo da estrutura as zonas cujo módulo de elasticidade médio difere mais de 20%.

Acérrca da heterogeneidade das fundações não pode deixar de se frizar que em regra se podem observar deformabilidades muito diferentes em pontos próximos. É o que mostra a fig. 7 na qual, à esquerda, cada ponto tem por coordenadas os valores dos módulos de elasticidade determinados nas faces opostas, verticais, de galerias de ensaio, e à direita os valores no teto

e no pavimento. Os resultados referem-se a ensaios sôbre uma superfície de carga de 1 m², sendo de cêrca de 4 m a distância média entre os bolbos de pressão interessados no par de ensaios correspondentes a cada ponto. Verifica-se que, para esta pequena distância, os módulos de elasticidade chegam a estar numa relação superior a 3. Porém, estas variações da deformabilidade têm uma influência muito localizada no estado de tensão da barragem e, dada a irregularidade da sua distribuição nunca poderão ser consideradas no projeto. No caso de tais variações serem muito acentuadas poderá ser necessário dispor de armaduras ao longo da fundação, para absorção das trações resultantes do efeito ponte sôbre as zonas mais deformáveis, e assim evitar fendas, localizadas junto das fundações. Em conclusão, na prática só é possível considerar valores médios da deformabilidade de zonas de extensão apreciável da fundação.

Não deve deixar de se frizar que na prática, mesmo com programas de ensaio "in situ" bastante desenvolvidos, é elevado o êrro com que se pode garantir o valor do módulo de elasticidade de uma dada zona, excedendo na maioria dos casos 30%. Dêste modo, é-se obrigado em geral a considerar valores de segurança, por defeito, para os módulos de elasticidade. O precário conhecimento dos valores reais dos módulos de elasticidade das fundações pode constituir, no caso de deformabilidades elevadas, uma causa de erro relevante na previsão do estado de tensão das barragens abóbada.

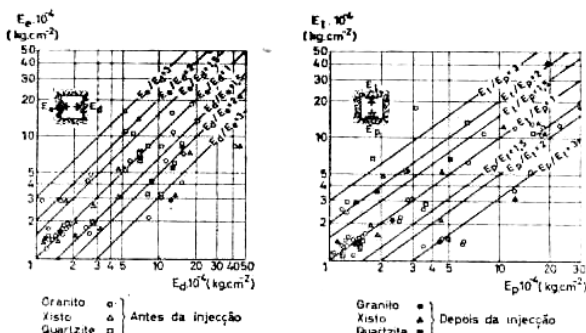


Fig. 7

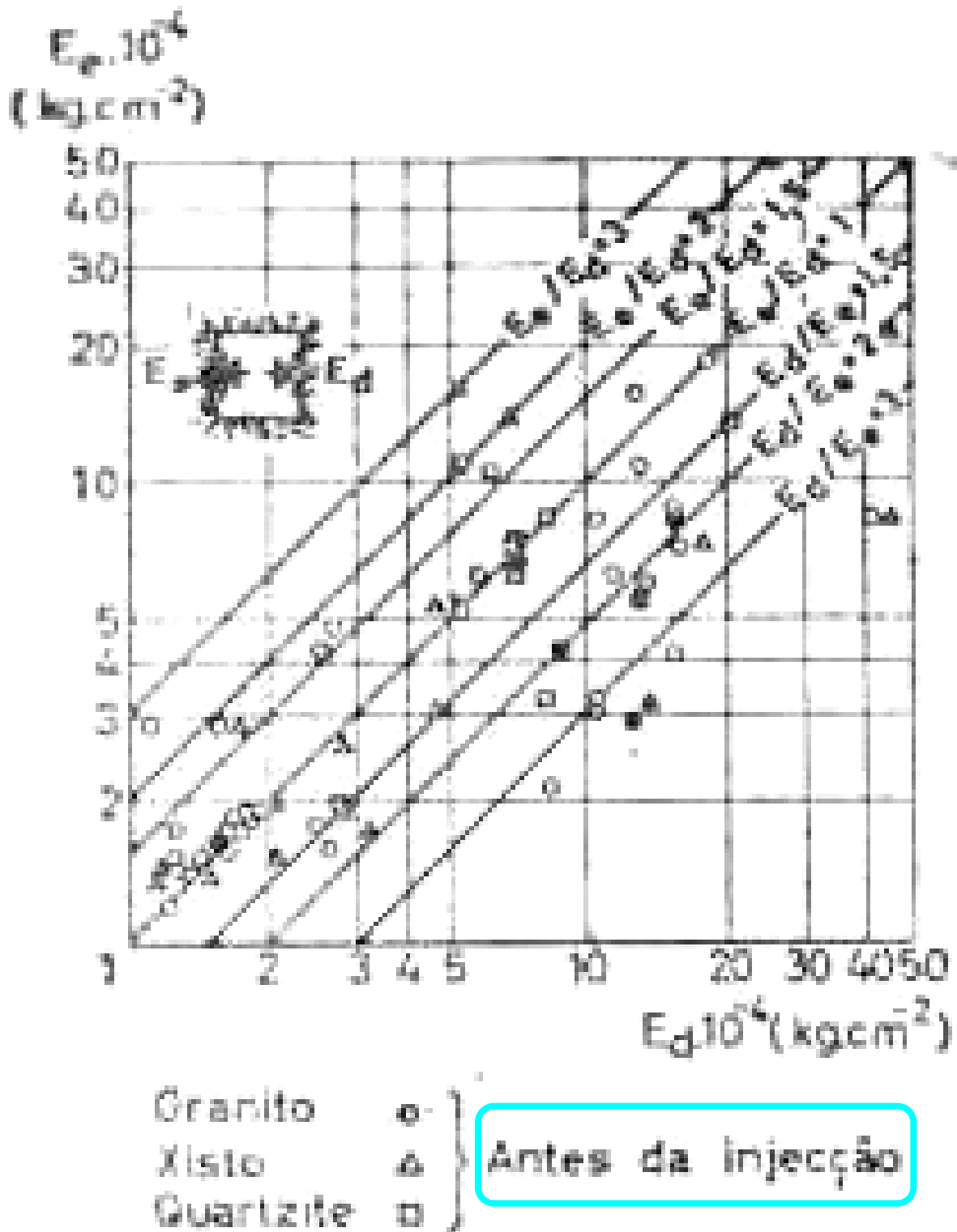


Fig . 7a Ampliada
Fig . 7 Ampliada

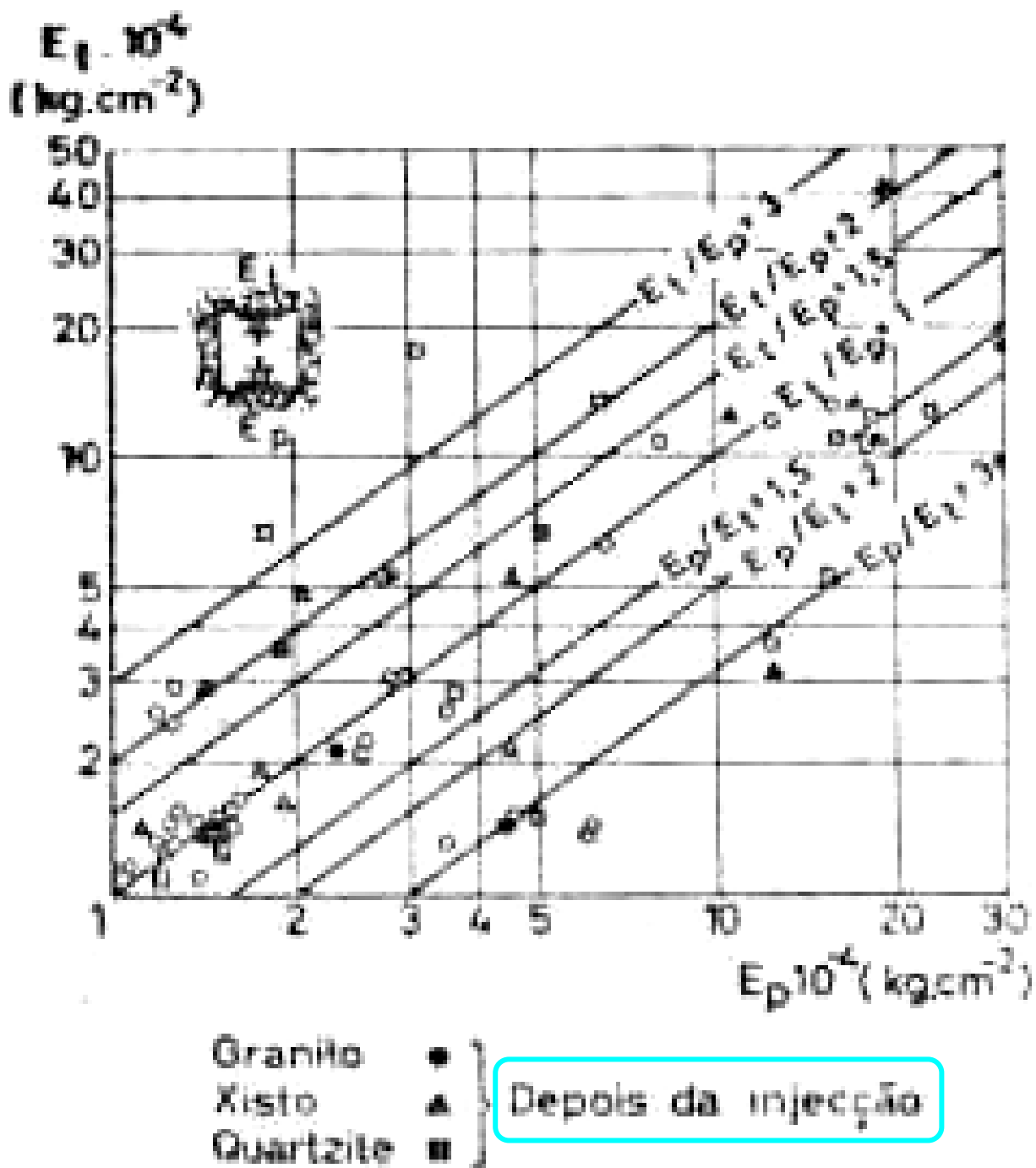


Fig . 7b Ampliada



Quanto à anisotropia das fundações, atrás referida, compreende-se, após o panorama que acaba de ser apresentado, que basta na prática considerar, em cada zona, a deformabilidade na direção da força descarregada pela estrutura.

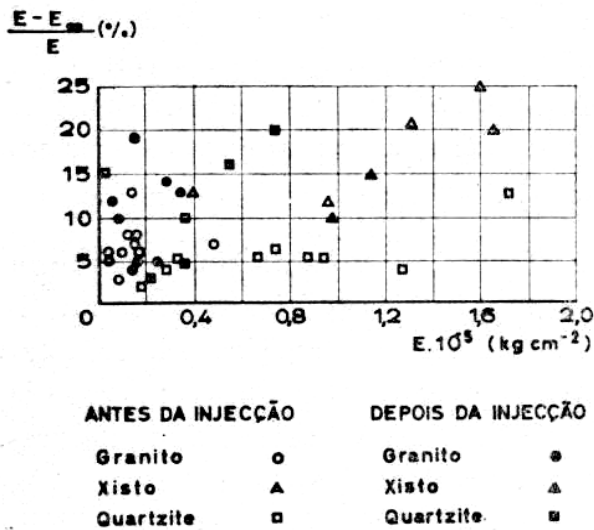
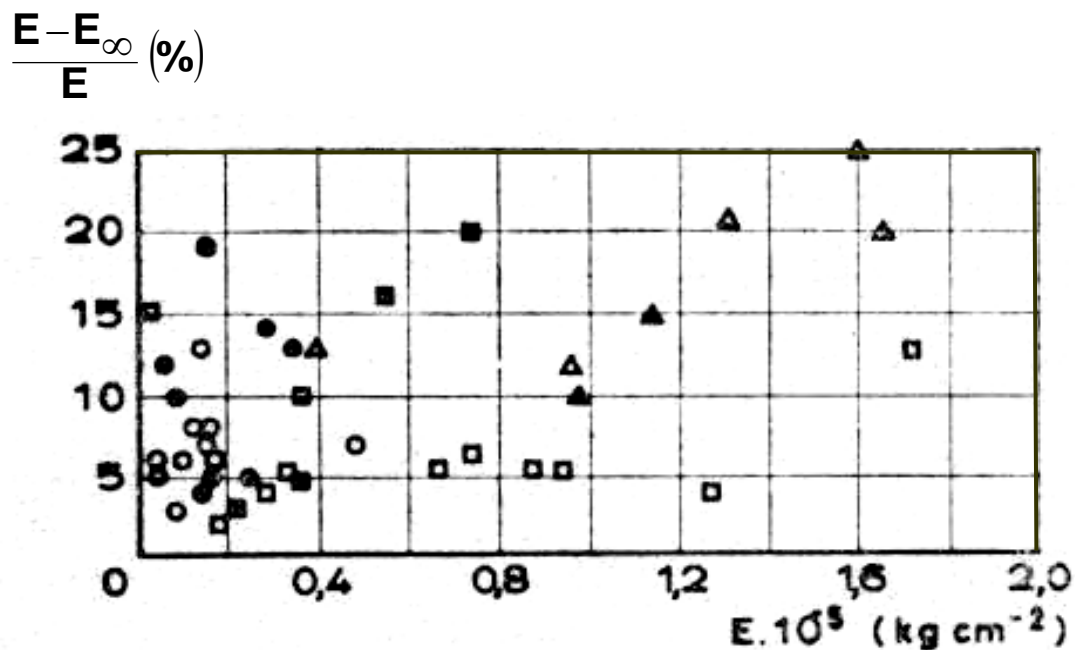


Fig. 8

Em relação ao efeito tempo na deformação dos maciços rochosos, a nossa experiência mostra-nos que em regra não é relevante.¹²⁾ Na fig. 8 apresentam-se resultados de ensaios “in situ”, conduzidos nas mesmas condições já atrás referidas, designando-se por E e E_{∞} , respectivamente, os módulos de elasticidade correspondentes a uma duração de aplicação de carga de 30 minutos e infinita. Como se vê, a diminuição relativa do valor de E é pequena, raras vezes ultrapassando 20%. Conclui-se, em face do que foi dito sobre o grau de influência da deformabilidade no estado de tensão das barragens abóbada, que em geral não é necessário ter em consideração o efeito tempo.

Acêrca de falhas que atravessassem a fundação, elas devem ser simplesmente encaradas como uma heterogeneidade do maciço rochoso. Dêste modo, e pondo de parte eventuais movimentos tectônicos, mesmo falhas com vários metros de caixa sòmente terão uma influência local. O mesmo se diz em relação às diaclases do maciço que pela sua importância devam ser consideradas à parte, isto é, cujo efeito não esteja integrado na deformabilidade atribuída às diferentes zonas da fundação.

Consideramos até agora o problema da influência da deformabilidade das fundações pondo de parte a eventualidade da sua rotura. Porém, um problema de importância fundamental é o da averiguação de segurança das fundações em relação à rutura tanto mais que, dentro das atuais concepções de projeto, a rutura de uma barragem abóbada só é concebível que possa ocorrer como consequência da rutura das fundações. Teria o maior interêsse que se desenvolvessem métodos de cálculo em relação à rutura que tivessem em consideração o funcionamento de conjunto da barragem e sua fundação, pois que na realidade elas constituem uma unidade estrutural. Presentemente, a previsão da segurança das fundações tem de ser feita a partir das forças descarregadas em regime elástico pela barragem, isto é, desprezando a redistribuição de tensões que ocorrerá no processo que conduz à rutura. Estudos sobre modelo mostraram que esta redistribuição é muito importante,⁽¹³⁾ sendo oportuno salientar que o método experimental



ANTES DA INJECCÃO

Granito o
Xisto △
Quartzite □

DEPOIS DA INJECCÃO

Granito ●
Xisto ▲
Quartzite ■

E = Módulo de Elasticidade para carregamento de curta duração (30 minutos)

E_{∞} = Módulo de Elasticidade para carregamento de longa duração

Fig. 8 Ampliada



tem possibilidade de ter em consideração as diaclases e falhas do maciço rochoso, ⁽¹⁴⁾ as quais têm em regra uma importância decisiva na rutura.

Acérca das fundações das barragens abóbada é oportuno frisar o contraste surpreendente que se verifica entre o cuidado exaustivo pôsto na previsão do comportamento e na execução da barragem pròpriamente dita e a pouca atenção dada à determinação das propriedades dos maciços de fundação, à consideração dessas propriedades no comportamento da estrutura e ao tratamento das fundações com vista a garantir as propriedades previstas no projeto. ⁽¹²⁾

Para terminar êste artigo queríamos destacar os seguintes pontos:

- a deformabilidade das fundações tem em regra uma influência com interêsse prático no estado de tensão para valores relativamente baixos do módulo de elasticidade das fundações;
- quando êstes valores ocorrem, a precária precisão do seu conhecimento pode comprometer a precisão de previsão do estado de tensão;
- a heterogeneidade local que correntemente exibem os maciços rochosos a qual não pode ser considerada nos cálculos, tem sòmente uma influência local no estado de tensão;
- interêsse em que sejam desenvolvidos métodos de previsão do comportamento até à rotura da unidade estrutural barragem-fundação.

5. *Solicitações: conceito de segurança em relação à rotura*

Quanto à definição das solicitações a ter em conta no cálculo das barragens abóbada, vamos considerar em primeiro lugar o caso do cálculo sob a ação das solicitações de projeto e depois o caso do cálculo em relação à rotura, observando-se que, atualmente, só é possível fazer o dimensionamento em relação à rotura por via experimental.

O pêso próprio de uma barragem e a pressão hidrostática, uma vez definido o nível da albufeira, são solicitações sempre conhecidas com grande precisão. Quando se prevê o assoreamento da albufeira, já a definição da respectiva solicitação encontra a dificuldade de previsão do nível que será atingido pelo assoreamento e mesmo da distribuição das pressões correspondentes a um certo nível. Daqui podem resultar, em certos casos, indeterminações importantes para o estado de tensão da estrutura.

Quanto à temperatura, são em regra conhecidas com a necessária aproximação as temperaturas do ar, e também existem hoje elementos de informação satisfatórios sòbre as temperaturas da água das albufeiras. Dêste modo, e considerando a irradiação solar, pode ser calculada a distribuição de temperaturas, variável no tempo, ao longo da espessura das barragens abóbada.

Já atrás foi referido que, segundo o critério correntemente adotado, se

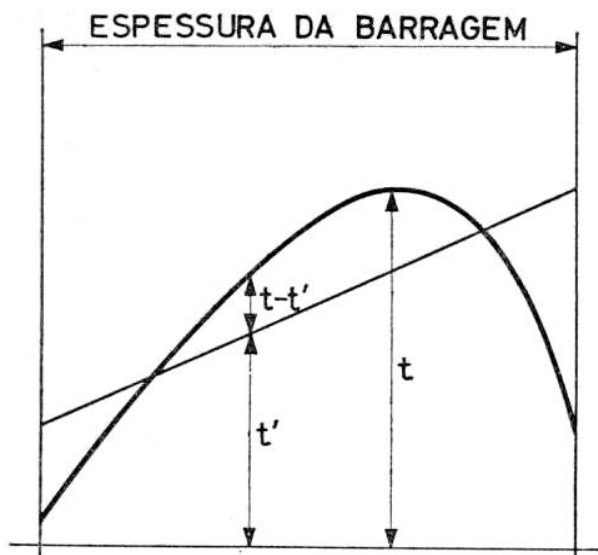


Fig. 9

substitui a distribuição real de temperaturas, t , ao longo da espessura da barragem pela chamada distribuição linear equivalente, t' (fig. 9). Esta é tal que as deformações da estrutura são as mesmas que na distribuição real, uma vez admitida a hipótese da distribuição linear das extensões ao longo da espessura da barragem. No projeto das barragens abóbada desprezam-se pois as tensões devidas às variações de temperatura $t-t'$, as quais não determinam senão um estado local de tensão, por véses designado por efeito pele em virtude do campo de tensões assumir em geral somente relevância junto da superfície. Ora acontece que estas tensões, atingem correntemente valores elevados, ⁽⁸⁾ por véses mesmo superiores aos das tensões devidas à pressão hidrostática, quer de tração quer até de compressão. Dêste modo, não será de estranhar que não seja legítimo desprezar o efeito pele, mesmo contando com a plasticidade do betão. Ensaio realizados no nosso Laboratório sobre peças prismáticas de betão, com

gradientes térmicos ao longo da espessura, revelaram uma queda substancial de resistência à compressão ⁽¹⁵⁾ (fig. 10). É de esperar que essa quebra de resistência se acentue quando cresce a resistência do betão, em virtude da concomitante redução da plasticidade.

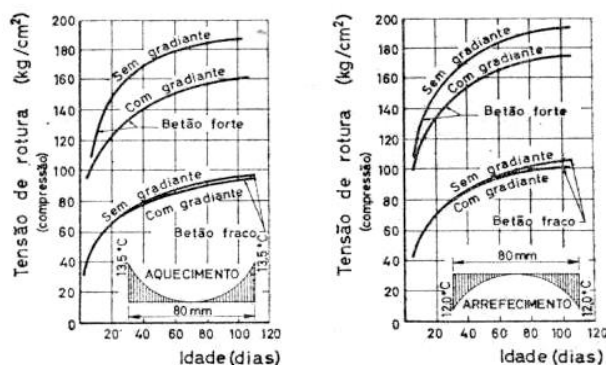


Fig. 10

O problema ainda não está esclarecido, sendo possível que as tensões de pele influenciem a segurança das barragens abóbada em relação à rotura. A nosso ver trata-se de um dos problemas mais importantes a investigar sobre o comportamento das barragens abóbada, sobretudo se se deseja aumentar o valor das tensões de segurança, como parece impor-se. A incerteza existente sobre o significado das tensões de origem térmica constitui uma das mais fortes razões para não ter interesse procurar-se determinar com elevada precisão as tensões devidas a outras solicitações.

Uma questão que por véses se põe é a da necessidade da consideração da retração higrométrica do betão no cálculo do campo de tensões das barragens. Dada a extrema lentidão com que se processa a secagem dos betões, ⁽¹⁶⁾



Efeito do Gradiente Térmico na Resistência do Concreto

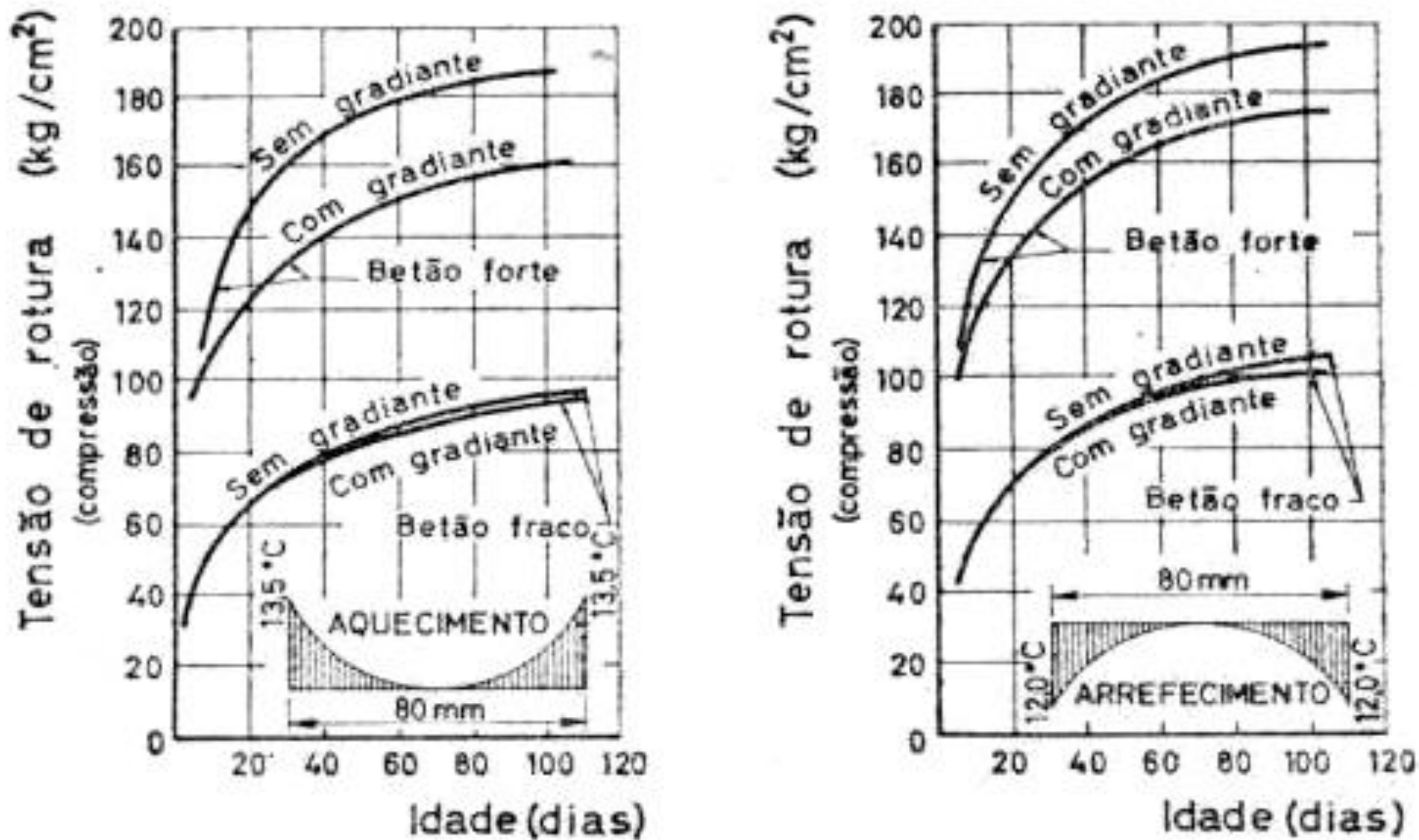


Figura 10 Ampliada



para as espessuras correntes das barragens abóbada poderá, quando muito, verificar-se a secagem de uma camada superficial, dando origem a um efeito pele. Para as condições climáticas mais comuns êste efeito poucas vêzes interessará uma dezena de centímetros. Acresce que a molhagem dos paramentos, a qual se propaga ràpidamente ao interior do betão, pode eliminar o efeito pele em prazo muito mais curto do que o necessário à sua instalação. Dêste modo, salvo casos muito especiais, não há que considerar a retração higrométrica do betão.

Uma solicitação cuja consideração assume por vêzes importância é a ação dos sismos, a qual tem sido assimilada à de fôrças estáticas definidas por critérios empíricos. Está hoje, porém, bem estabelecido o caráter de vibração aleatória que têm os sismos, impondo-se que sejam desenvolvidos métodos de cálculo que o tenham em consideração. No entanto, uma das dificuldades com que ainda se luta é a própria definição, em termos de mecânica aleatória, da sismicidade de uma dada região, dada a carência de registros dos sismos de alta intensidade que interessam ao cálculo das estruturas.

Considerámos até agora, as solicitações atuantes na barragem própria dita, mas põe-se também o problema das solicitações atuantes diretamente nas fundações. Entre estas a percolação da água da albufeira através do maciço rochoso pode ter particular importância na segurança das fundações em relação à rotura, em virtude não só das subpressões instaladas

mas também da morificação das propriedades do maciço rochoso. ⁽¹⁷⁾ Quanto às deformações das margens e do fundo do vale devidas à pressão exercida pela água do reservatório, parece poder ter influência apreciável no estado de tensão das barragens abóbada a rotação sofrida pelas fundações. ⁽¹⁸⁾

Quanto à determinação da segurança de uma barragem abóbada, como de qualquer outra estrutura, em relação à rotura levanta-se uma questão básica: como se deve supor que evoluem as diversas solicitações atuantes até se verificar a rotura? Êste problema, de natureza muito complexa, apenas pode ser aqui aflorado.

Em regra, uma estrutura está submetida a solicitações de diversa natureza física e, portanto, surge o problema de escolher as solicitações que vão variar e, para cada uma delas, se a sua intensidade variará uniformemente ao longo da estrutura ou não. O caso de uma barragem abóbada é muito representativo. ⁽¹³⁾ As solicitações principais a considerar são o pêso próprio e a pressão hidrostática. Conhece-se o pêso próprio com muita precisão, isto é, o desvio em relação ao valor previsto nos cálculos é muito pequeno e assim não é pertinente considerar um coeficiente de segurança relativo a uma variação de pêso. No que diz respeito à pressão hidrostática, não se justifica também em regra, prever um aumento para além dos valores do projeto. No caso de uma albufeira em que as encostas não sejam estáveis pode ser necessário considerar a possibili-



lidade de escorregamentos para a albufeira os quais provoquem vagas que galguem a barragem, aumentando assim substancialmente a pressão hidrostática. Foi o que aconteceu recentemente na barragem de Vajont. Portanto se houver que reecar tal acidente, será conveniente determinar um coeficiente de segurança à rotura por aumento da pressão hidrostática definindo-se o valor dêsse coeficiente, por

exemplo, como a razão $\frac{h_r}{h}$ entre a pressão hidrostática máxima atuando na barragem quando ocorrer a rotura e a pressão hidrostática máxima prevista, h , (fig. 11). Por vêzes a segurança à rotura é avaliada supondo que a pressão hidrostática aumenta man-

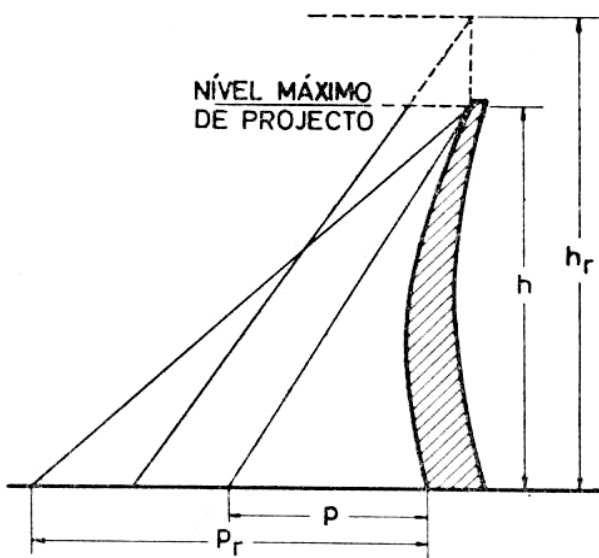


Fig. 11

tendo-se constante o nível de água na albufeira, definindo-se então o coeficiente de segurança como a relação

$$\frac{p_r}{p}$$

entre a pressão que determina a rotura, p_r , e a pressão hidrostática prevista, p (fig. 11). Deve notar-se, contudo, que êste aumento da pressão hidrostática não tem contrapartida na realidade porque o pêso específico da água não pode aumentar. Mesmo quando se prevê o assoreamento da albufeira, é ainda assim improvável um aumento muito substancial da pressão para além dos valores do projeto.

Outra possibilidade de rotura que não tem sido considerada ⁽¹³⁾ é consequência da resistência insuficiente dos materiais utilizados, que são, no presente caso, o betão e a rocha da fundação. Quando a consideração de um aumento das solicitações não tiver sentido, como acontece geralmente no caso das barragens, essa possibilidade é a única a considerar ao formular o problema de segurança à rotura. Então é possível definir um coeficiente de segurança à rotura como a relação entre resistência prevista para o material de estrutura, σ , e o valor, σ_r , que deverá ter para se dar a rotura permanecendo constantes as solicitações aplicadas. No caso das fundações em que a resistência é em regra atrítica, pode tomar-se para coeficiente de segurança a relação entre o coeficiente de atrito esperado para o maciço rochoso, $\text{tg } \phi$, e o valor do coeficiente para o qual se dará a rotura, $\text{tg } \phi_r$.

Em resumo, na averiguação da segurança em relação à rotura devem ser definidos coeficientes de segurança de acôrdo com as condições físicas reais do funcionamento da barragem.



6. Hipóteses sôbre a distribuição de tensões

Uma questão fundamental que se põe é a legitimidade da hipótese, admitida correntemente, da distribuição linear das deformações ao longo da espessura das barragens abóbada, hipótese que conduz a simplificações substanciais dos métodos de cálculo. Ou, por outras palavras, em que medida é necessário considerar as equações gerais a 3 dimensões da teoria da elasticidade.

É de esperar que na vizinhança das fundações, muito especialmente na parte inferior das barragens e em encontros gravidade que eventualmente existam, a distribuição das deformações não seja linear, o mesmo acontecendo, certamente, nas zonas singulares da estrutura, tais como aberturas para descarregadores de superfície e para outros órgãos de descarga. O esclarecimento do problema luta com a dificuldade de medição de deformação em pontos do interior de modelos. Alguns resultados de estudos fotoelásticos a 3 dimensões, pelo método da congelação das tensões, confirmam a suposição da distribuição das tensões se afastar substancialmente da linear⁽¹⁸⁾ na vizinhança das fundações (fig. 12). Na figura estão indicados os valores das tensões normais, devidas à pressão hidrostática, atuantes em seções horizontais da consola central de uma barragem com uma relação entre o desenvolvimento do coroamento e a altura de cêrca de dois.

A não linearidade das deformações, ao longo da espessura, junto das fun-

dações deve ser particularmente acentuada no que respeita ao efeito da temperatura, pois há então ainda a contar com o fluxo tridimensional de calor.

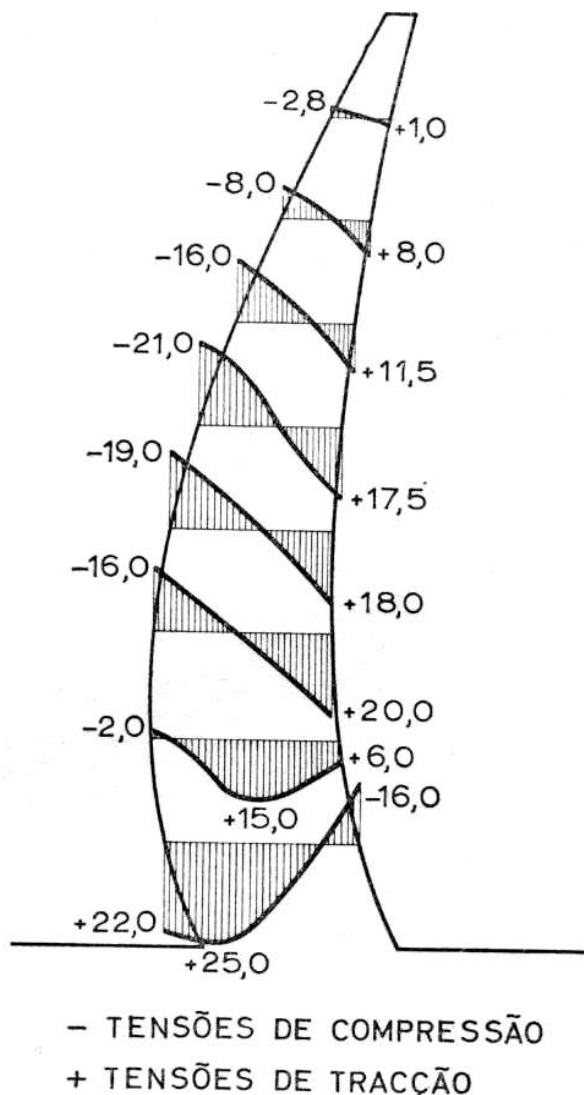


Fig. 12

Dado o fato dos valores mais elevados das tensões nas barragens abóbada, quer de compressão quer de tração, se desenvolverem a maior parte das vezes junto das fundações, ressalta bem claro o interêsse da investigação do problema da distribuição das deformações ao longo da espessura nessa zona da estrutura. No que respeita à



ação da pressão hidrostática, como se verifica um acôrdo satisfatório, para fins práticos, entre os valores das tensões fornecidas pelos métodos de cálculo mais evoluídos e as medidas em pontos da superfície de modelos conclui-se que a hipótese da linearidade não é muito grosseira, pelo menos no respeitante ao campo de tensões na superfície. Excetamos desta afirmação a zona inferior das barragens, sobretudo com maiores espessuras, onde temos observado discrepâncias importantes, os encontros gravidade e as zonas singulares, atrás mencionadas. O comportamento da zona inferior é particularmente importante pois, como já foi referido, é freqüente desenvolverem-se nela trações que condicionam a própria concepção da estrutura.

7. Conclusão

Apesar de nos têmos limitado a referir sumariamente os parâmetros que influenciam o comportamento das barragens arco, julga-se ter ficado bem marcada a extrema complexidade que pode assumir o problema da previsão do estado de tensão destas estruturas quando se queira considerar todos êsses parâmetros. Põe-se porém uma questão de base, a saber, a precisão com que tem sentido na prática fazer essa previsão, dadas as incertezas envolvidas e as elevadas margens de segurança exigidas. Apesar de se reconhecer a dificuldade desta questão, mesmo de a analisar, vai-se procurar dar-lhe uma resposta, tanto mais que só assim será possível fazer um julgamento de valor das teorias de cálculo à disposição dos projetistas.

Os erros de que vêm eivados os valores das tensões — isto é, os desvios entre os valores realmente desenvolvidos na estrutura em serviço e os valores calculados — dependem, por um lado, do esquema da realidade adotado, quer dizer, das hipóteses definidoras do sistema físico em consideração e, por outro lado, dos erros introduzidos pelos métodos usados para o cálculo das tensões, incluídos nestes erros os resultados preliminares sôbre a distribuição de deformações ou tensões.

Do que foi dito nesta lição depreende-se que os erros resultantes da esquematização da realidade que tem de se adotar na prática podem ser bastante elevados, sobretudo os provenientes da definição das fundações e das solicitações térmicas. Sendo assim não se justifica procurar métodos de cálculo de elevada precisão. O que é muito importante é dispor de métodos com grande versatilidade, isto é, que permitam tratar a extrema diversidade de situações que ocorrem na prática, em especial no que respeita às formas das barragens abóbada e às condições de fundação. Quanto à precisão a exigir aos métodos de cálculo, acresce ainda que, por razões complexas que não serão analisadas, se exigem margens de segurança muito elevadas e definidas de maneira pouco precisa, mesmo arbitrária, o que também favorece a aceitação de métodos de menor precisão.

Deve no entanto notar-se que os valores das tensões calculadas têm sobretudo um significado relativo, para confronto de diversas situações que se encarem para um mesmo local e mesmo



de obras diferenciais. Dêste modo, e uma vez que se admita que os erros introduzidos pela esquematização da realidade são da mesma ordem — o que se verificará em especial no caso do confronto de soluções para um mesmo local — já se justifica uma maior exigência para a precisão dos métodos de cálculo. Tudo considerado, julga-se que, no estado atual dos conhecimentos sôbre o comportamento das barragens abóbada, é aconselhável exigir, no caso de obras de certa importância, que os métodos de cálculo introduzam erros que não excedam cêrca de 10 e 20%, respectivamente, nos valores das maiores tensões de compressão e de tração devidas à atuação de tôdas as solicitações. A apreciação da precisão de um método de cálculo exige estudos sôbre modelos reproduzindo diversas situações típicas, sendo oportuno referir o grande interêsse do programa de

investigação lançado pela Civil Engineering Research Association com vista a apreciar os métodos de cálculo. Deve frizar-se que sòmente em situações simples conseguem os métodos de cálculo correntemente usados alcançar o nível de precisão que acabamos de sugerir.

Para terminar desejamos sòmente acentuar o grande interêsse que têm as barragens abóbada do ponto de vista da economia e da segurança dos aproveitamentos hidráulicos e a possibilidade da sua utilização em vales muito largos, sob a forma de obras de abóbadas múltiplas de grandes vãos, ⁽¹⁹⁾ o que justifica todos os esforços para serem desenvolvidas teorias de previsão do seu comportamento que permitam considerar todos os parâmetros relevantes e forneçam os resultados com a precisão conveniente.