

CARACTERÍSTICAS PÓS-ROTURA DE ROCHAS EM COMPRESSÃO UNIAxIAL, OBTIDAS NUMA PRENSA COM AUMENTO ARTIFICIAL DE RIGIDEZ

Post-Failure Behavior of Rocks under Uniaxial Compression, Obtained through an Artificially Increased Stiffness Testing Machine

por
C. DINIS DA GAMA*

RESUMO – É um facto de observação corrente, considerado muitas vezes inevitável, que as escavações subterrâneas estão rodeadas por rocha fracturada, sem que isso conduza à respectiva ruína. O projecto desses trabalhos depende do conhecimento do comportamento mecânico de rochas fracturadas e a consideração de uma resistência inerente às mesmas tem grande interesse prático, pois convirá controlar sempre a correspondente segurança.

Justifica-se, portanto, uma mais perfeita compreensão do comportamento de rochas na rotura e após a rotura, o que implica o registo das características completas tensão-deformação unitária, só possível em sistemas de carga dotados de muita elevada rigidez. Para as prensas de laboratório clássicas haverá que dispor de processos artificiais para lhes incrementar a rigidez, de modo a tornar a aplicação de solicitações praticamente independente da reacção da amostra ensaiada.

Neste trabalho são descritos três dos processos que se podem utilizar para promover o aumento da rigidez de uma prensa convencional, em ensaios realizados à compressão uniaxial e sobre dois tipos de rochas. O registo do ramo descendente das curvas tensão-deformação unitária é obtido por meios directos e indirectos. Refere-se a construção, na Universidade de Luanda, de uma célula de rigidez destinada a padronizar de futuro as determinações desta natureza e analisam-se os resultados experimentais segundo os conceitos teóricos da rotura frágil.

SYNOPSIS: – Common observation shows that underground excavations are surrounded, sometimes inevitably, by fractured rock and yet those openings do not collapse. Safe and economic design of much underground structures depends on the fractured rock behavior and consideration of a strength of failed rock is of great practical importance, as increasing safety is allways desired.

* M. Sc., Doutor em Engenharia, Prof. Aux. da Universidade de Luanda

A better understanding of rock behavior in failure and in post-failure situations is recommended, but this study is only feasible through very high stiffness loading systems, in order to record the complete stress-strain characteristics. To obtain the same information out of conventional testing machines, artificial systems are available to increase their stiffness, so that applied strains be independent on rock behavior.

In this paper three mechanical systems allowing the possibility of rising the stiffness of a common testing machine are utilized in uniaxial compression tests performed with two common rock types. Recording the complete stress-strain curves is achieved through both direct and indirect methods. A specific stiffness cell was constructed at the University of Luanda to standardize such measurements in the future, and experimental results are analysed in terms of theoretical concepts of brittle failure criteria.

1 – INTRODUÇÃO E DEFINIÇÕES

A rotura dos materiais rochosos tem sido objecto de numerosas contribuições científicas, das quais se destacam [1] a [8]*, cujo conteúdo tem dependido em larga medida dos dispositivos experimentais existentes para esse estudo, já que as explicações teóricas da rotura das rochas são incompletas e pouco gerais, em face da natureza destes materiais.

Com o decorrer dos tempos e à medida que se dispõe de sistemas laboratoriais mais adequados, ou se registam com maior rigor os comportamentos na rotura das rochas *in situ*, a verdadeira essência dos fenómenos vai sendo posta em evidência.

Assim, não é de estranhar que só em 1965 tenha surgido pela primeira vez [4] a existência de um ramo descendente na curva tensão-deformação unitária de uma rocha sujeita à compressão uniaxial, pois provém dessa data a introdução de prensas de ensaio com elevada rigidez** no domínio da Mecânica das Rochas. Assinale-se que já em 1962 tinha sido projectada uma prensa com alta rigidez hidráulica, destinada a obter curvas completas tensão-deformação unitária para betões [9].

Anteriormente, os ensaios laboratoriais eram realizados em prensas convencionais, as quais se caracterizam por reduzida rigidez, relativamente à rigidez correspondente ao troço descendente das curvas de carga da grande maioria das rochas. Nessas circunstâncias, depois de ultrapassado o ponto de

* Referências bibliográficas apresentadas no fim

** Considera-se rigidez de um corpo elástico a força necessária para deformar o mesmo de uma unidade de comprimento.

resistência máxima ocorre a instabilidade do sistema formado pela prensa e o provete de rocha, devido à libertação súbita da energia de deformação armazenada na máquina, facto que conduz a uma rotura violenta de tipo explosivo.

É evidente que destas observações não seria possível distinguir entre os pontos de resistência máxima e de rotura franca, pelo que os mesmos eram confundidos e considerados equivalentes.

Com o objectivo de definir o significado dos conceitos mais importantes que hoje se aceitam como mais representativos da rotura das rochas e que serão utilizados neste trabalho, apresentam-se na Fig. 1 os diagramas típicos da variação tensão-deformação axial unitária de um provete de rocha submetida à compressão uniaxial. Este tipo de sollicitação é considerado mais representativo, visto que no seu ambiente geológico as rochas estão muito mais sujeitas a tensões de compressão que de tracção.

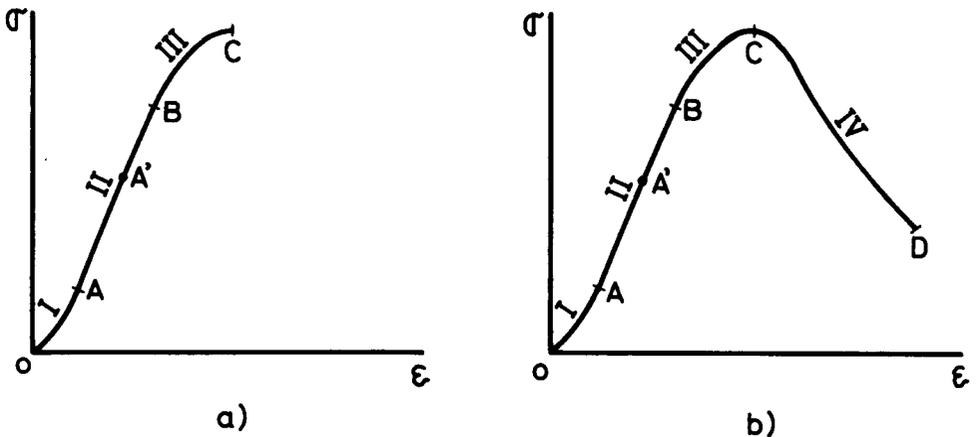


Fig. 1 - Curvas típicas tensão-deformação unitária de uma rocha sujeita à compressão uniaxial: a)-Ensaio em prensa não rígida; b)-Ensaio em prensa de elevada rigidez.

A fase inicial de sollicitação é caracterizada por um troço curvo I, com declive $\frac{d\sigma}{d\epsilon}$ crescente, que se considera corresponder ao fecho das fendas e fissuras naturais do material. A partir do ponto A a rocha entra em deformação praticamente elástica de modo que a secção II do diagrama é sensivelmente linear. Se antes do termo dessa secção se proceder à descarga,

a correspondente trajectória é aproximadamente coincidente com a de carga (área de histeresis desprezável) e a rocha não adquire deformações residuais permanentes.

Na terceira região, BC, o declive da curva decresce progressivamente com o aumento da tensão aplicada, até se anular no ponto C. Nesta zona já se introduzem modificações estruturais (escorregamentos entre grãos ou cristais) importantes no material, que se detectam pelas deformações residuais que subsistem após fases de descarga. A área de histeresis é então significativa e isso traduz a dissipação de parte da energia de deformação cedida ao espécime, sob a forma de energia mecânica utilizada nos referidos escorregamentos.

A partir do ponto B, que Jaeger [5] considera tensão de cedência (ou limite elástico), a rocha passa do comportamento elástico a uma fase dúctil (plástica) em regra de pequena duração*, que irá terminar no ponto C. A tensão que a rocha pode suportar ao atingir este último ponto assume um valor máximo, pelo que se designa por *tensão máxima de resistência à compressão*; no caso particular de uma prensa não rígida (ver Fig. 1-a), coincide com a *tensão de rotura à compressão*.

O progresso de rotura propriamente dito, detectável em curvas tensão-deformação axial que se começa a manifestar no ponto C, vai prosseguir pelo ramo descendente IV, até se atingir um ponto D, de rotura franca. Esse ramo IV, que só é susceptível de ser registado em sistemas de carga (artificiais ou naturais) em que a aplicação de deformações é independente do comportamento da amostra ensaiada, é constituído por um verdadeiro lugar geométrico (*loci*) de pontos de rotura, cada um dos quais representa uma resistência, inferior à máxima, que o material continua a oferecer às solicitações exteriores. Essa capacidade de resistir a tais solicitações decresce com o aumento de deformação e anula-se quando o sistema constituído pela prensa e rocha o determinar, em função das energias de deformação em jogo, conforme adiante se detalhará.

Por consequência, e como salienta Bieniawski [6], enquanto a tensão máxima de resistência à compressão é exclusivamente uma propriedade do

* Como aponta Brace [3] a ausência de escoamento plástico caracteriza a fractura de muitos materiais geológicos, sob condições que interessam à engenharia.

material rochoso*, a tensão de rotura franca é uma propriedade do sistema rocha-estrutura de carga.

Este facto é da maior importância pois explica a resistência que possuem as rochas em condições de rotura parcial, ou após o início da mesma, quando o sistema que as solicita é rígido (caso de numerosos trabalhos subterrâneos tais como pilares de mina, por exemplo).

Nestas condições, o significado atribuído aos conceitos em análise será o seguinte:

Rotura no sentido lato (*failure*) – é o processo pelo qual uma rocha vê decrescer as suas condições naturais de resistência, sob a acção de solicitações exteriores.

Fractura (*fracture*) – é um estado caracterizado pelo aparecimento de novas fendas ou pela propagação de fissuras pré-existentes no seio do material rochoso. Segundo Bieniawski [6] há três fases de fractura: iniciação, propagação (estável e instável) e quebra de resistência (correspondente ao ponto C no diagrama da Fig. 1).

Rotura propriamente dita (*rupture*) – processo pelo qual um sólido se vai dividindo em fragmentos individualizados e que conduz à rotura franca representada pelo ponto D no citado diagrama, em que o volume de rocha perde a capacidade de transmitir qualquer carga.

A região IV do diagrama da Fig. 1-b, que está limitada pelos pontos C e D, convencionou-se chamar *zona de pós-rotura*, visto ocorrer depois do início da fase de rotura e daquilo que tradicionalmente se considera como tal.

2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA ROTURA FRÁGIL

Dada a variabilidade de propriedades dos materiais rochosos, que em regra se apresentam dotados de anelasticidade, anisotropia, heterogeneidade e descontinuidade, os seus mecanismos de deformação e de rotura não são suficientemente bem conhecidos para que exista uma teoria universalmente aceite. As explicações no sentido de interpretar os fenómenos de rotura deverão ser consideradas, por isso, como *critérios* e não como teorias.

* Note-se que não se considera a influência conjunta do factor tempo, o qual afecta o comportamento das rochas, especialmente as caracterizadas por propriedades viscosas e visco-elásticas. Por tal motivo, considera-se que o raciocínio é válido para velocidade constante de aplicação de tensões às rochas.

Os dois critérios mais genéricamente reconhecidos são os de Mohr-Coulomb e o de Griffith, este com as modificações aplicáveis a rochas sob acções de compressão. O primeiro critério tem a vantagem de ser de origem empírica, de forma que se adapta geralmente bem às variações de propriedades das rochas, podendo mesmo ser considerado a solução para que tendem outros critérios mais sofisticados [2]. Tem por base o conceito de Coulomb, pelo qual a rotura ocorre por corte em planos segundo os quais a diferença ($\tau - \mu\sigma$) é igual a uma constante do material, conhecida por coesão; μ e σ são, respectivamente, as tensões de corte e normal actuantes naqueles planos e μ um outro parâmetro do material, designado por coeficiente de atrito interno por analogia com o escorregamento de dois sólidos em contacto.

À coesão, que mede a resistência da rocha ao corte puro, pode dar-se também o nome de tensão mobilizável de corte [10].

O critério inicial de Coulomb, que tem sido verificado em numerosas situações de rotura por corte e de compressão uniaxial (que implicam roturas também por corte), foi aproveitado e ampliado por Mohr com a consideração de uma envolvente curva também no plano (σ, τ), servindo de fronteira para os pontos em regime elástico. Tal envolvente é obtida a partir do conhecimento dos sucessivos círculos de Mohr representativos de estados de rotura, aproveitando os conceitos de coesão e ângulo de atrito interno característicos da teoria de Coulomb, mas considerando estas grandezas como funções da tensão de confinamento; para tensões de confinamento baixas (caso por exemplo da compressão uniaxial) a envolvente de Mohr pode em geral ser substituída por uma recta de Coulomb.

O critério de Griffith [1] foi inicialmente estabelecido para materiais frágeis, como o vidro, e mais tarde adaptado às rochas. Postula que a fractura tem início a partir dos extremos de fendas pré-existentes no material, onde depois de aplicação de uma solicitação exterior se concentram tensões de tracção suficientemente elevadas para provocarem a referida propagação. Por simplificação, destinada a admitir um tratamento matemático mais acessível, Griffith considerou tais fendas como elípticas e planas, tendo mais tarde Sack feito a generalização para o caso tri-dimensional.

Em solicitações uniaxiais provou Griffith analiticamente que a tensão de resistência à compressão nos materiais frágeis era, em valor absoluto, da ordem de 8 vezes superior a sua resistência à tracção. A envolvente de Griffith no plano (σ_1, σ_3) fornece uma curva parabólica semelhante à de Mohr,

mas em que a ordenada na origem é igual ao dobro da tensão de resistência do material à tracção.

Para obviar à condição de Griffith que impunha a manutenção da forma das fracturas até ao momento de propagação da rotura, McClintock e Walsh [2] introduziram a condição de os bordos das fendas se encostarem quando a rocha estiver sujeita à compressão, de modo que o atrito aí desenvolvido se opõe ao prolongamento das fracturas. Designando o coeficiente de atrito entre tais bordos por q , aqueles autores determinaram uma envolvente do tipo:

$$\tau = q \sigma - 2\sigma_t$$

em que σ_t é a tensão de resistência do material à tracção. Esta equação é do tipo da recta de Coulomb e parece estar mais de acordo com as determinações experimentais, sob solicitações de compressão, que não retirem às rochas as suas características de material essencialmente frágil.

Também com base na modificação de McClintock e Walsh é possível prever que a tensão de resistência das rochas à compressão uniaxial é da ordem de $10\sigma_t$, o que está mais de acordo com a realidade que $8\sigma_t$.

Os critérios de rotura servem pois para fazer previsões quanto à oposição das rochas a determinados tipos de solicitação, indicando quando as mesmas estão ou não em condições de lhes resistir. Todavia, embora as previsões sobre a rotura das rochas possam ser feitas sem conhecer em pormenor como a mesma ocorre, sob o ponto de vista fenomenológico, interessa mais analisar o *mecanismo* do que o *critério* de roturas das rochas, isto é, a sucessão de fases por que passa a estrutura rochosa até à ruína sob o efeito de forças de forças exteriores.

Examinando de novo a Fig. 1, poderão ligar-se as várias fases e pontos notáveis da curva tensão-deformação unitária em compressão uniaxial ao mecanismo provável do desenvolvimento da rotura. De acordo com Bieniawski [6], e como então se referiu, a região I do diagrama corresponde ao período de fecho das fendas naturais da estrutura rochosa, concluindo-se praticamente sobre o ponto A, a partir do qual ocorre um comportamento linear significando que o material reage elásticamente às solicitações aplicadas. Ainda dentro da zona II, aquele autor reconhece a existência de um ponto A' (não detectável através de registo das deformações longitudinais, mas observável no das deformações laterais e dilatações volumétricas) que seria o verdadeiro

início da rotura, visto que se daria a partir dessa altura a propagação das fendas pré-existentes na rocha, embora inicialmente em regime estável (recuperável). Esse ponto A' marca o momento em que o coeficiente de Poisson da rocha começa a aumentar. Aceita-se que o início da rotura assim concebida fica bem definida pelo critério de Griffith modificado por McClintock e Walsh.

Ao atingir-se o ponto B do diagrama (ver ainda Fig. 1) a proporcionalidade entre tensões e deformações deixa de ser linear e o módulo de elasticidade do material diminui. A propagação de fracturas passa a ter lugar em regime instável em virtude de as fendas terem atingido um comprimento crítico, que corresponde a um aumento súbito na velocidade de propagação da fenda através do material. Nestas condições, a partir de B o equilíbrio energético é estabelecido não só entre a energia de deformação elástica e a energia de superfície nos bordos das fendas, como ainda entrando em consideração com uma parcela aditiva da segunda, que é a energia cinética associada ao movimento dos bordos da fenda em causa.

Assim, na zona III do diagrama apresentado, o prosseguimento da rotura não depende apenas do crescimento da tensão aplicada (como na fase anterior de propagação estável das fendas) mas também da energia cinética presente no fenómeno, que se desencadeia inevitavelmente nessa altura, até ser atingido o ponto C, o qual corresponde à resistência máxima que a rocha pode oferecer.

A zona IV traduz o fenómeno de ramificação das fendas, dado que o material perdeu toda a capacidade de armazenar energia elástica de deformação e como o acréscimo energia cinética é concumitante, as fendas terão de se ramificar a fim de ser consumida mais energia de superfície, o que só se dá através de novas áreas de fracturas formadas à custa do prolongamento ou ramificação das pré-existentes. Num certo estágio desse processo ocorre a individualização de um ou mais fragmentos da rocha inicial, facto que conduz à rotura franca, representável pelo ponto D, onde tem lugar a perda total de coerência do material rochoso.

Assinale-se que nem todas as rochas apresentam a rotura franca caracterizada por uma deformação longitudinal máxima. De facto, Wawersik [7] registou curvas tensão-deformação longitudinal em compressão uniaxial tais que o ramo descendente se caracteriza pela diminuição da deformação, antes de atingir a rotura franca (Fig. 2). Para tais rochas (que aquele autor

designou por rochas do tipo II) a rotura até final é mantida por si própria, isto é, a ramificação de fendas é obtida apenas à custa da energia de deformação armazenada no espécime, não havendo necessidade de fornecer energia para aquele fim.

Nas rochas do tipo II a rotura só pode ser interrompida ao retirar energia de deformação da própria rocha.

A mesma variedade de rocha pode pertencer ao tipo I ou ao tipo II, bastando para tal apenas diferenças na sua textura interna, por exemplo no tamanho do grão, ou no grau de alteração.

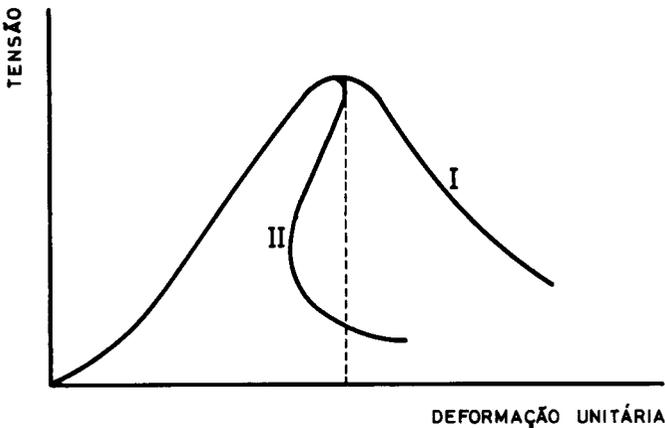


Fig. 2 – A classificação de rochas de acordo com a sua característica pós-rotura, segundo Wawersik [7].

Em exemplos apresentados na citada obra [7], constata-se que para determinada variedade de mármore, o grão graúdo fá-la cair dentro do tipo I, ao passo que um grão mais fino lhe impõe um comportamento dentro do tipo II. Em certa variedade de rocha granítica, a meteorização do seu feldspacto modificou a reacção da rocha do tipo I para o II.

A análise de Wawersik, fazendo uso de equipamento especial para o registo de comportamento pós-rotura das rochas, abriu novas perspectivas à maneira de tratar este problema. De facto, ficou experimentalmente comprovado que quer em compressão quer em tracção a iniciação das fracturas é distinta da sua propagação, o que assim contraria um dos aspectos fundamentais da rotura frágil. Pondo em controvérsia vários pontos da teoria de Griffith,

nomeadamente que em certas rochas a instabilidade das microfendas não é necessariamente o melhor critério de previsão da rotura. Wawersik deduziu matematicamente a condição de instabilidade de uma fenda real, em termos de um conjunto de parâmetros da rocha, obtidos por via experimental. O critério de Wawersik sugere ainda que se deve analisar o fenómeno da formação de fendas em vez da propagação de fendas pré-existentes, cuja existência e forma elíptica é muito discutível.

É possível que esta maneira de encarar o problema abra caminho para o estabelecimento de uma verdadeira teoria representativa do comportamento real das rochas submetidas à rotura, sem fazer uso de critérios pouco representativos da realidade física.

3 - AUMENTO ARTIFICIAL DA RIGIDEZ DA PRENSA

Em ensaios correntes de compressão uniaxial realizados sobre materiais frágeis, ou mais particularmente, sobre rochas, a fase de rotura é caracterizada por destruição violenta do espécime após a aplicação crescente de carga por parte da prensa. Essa instabilidade do sistema é motivada pelo acréscimo de energia de deformação que a prensa comunica ao provete e que a partir do ponto de resistência máxima da rocha é excessiva para ser suportada por esta. O facto é claramente explicável pela observação da Fig. 3.

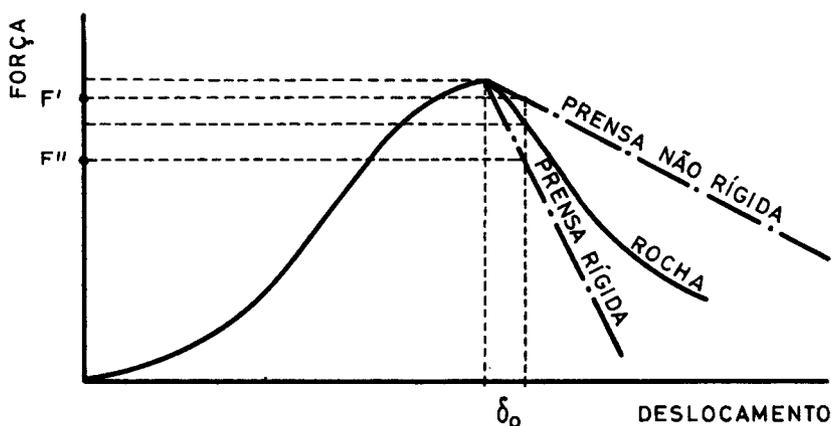


Fig. 3 - Diagrama força-deslocamento de um provete de rocha submetido à compressão uniaxial, com características típicas de prensas rígida e não rígida.

Qualquer prensa possui uma rigidez, em regra rectilínea, que caracteriza a sua gama de cargas. Em prensas comuns, a rigidez é da ordem de 10^6 kg/cm, o que traduz a rigidez composta dos seus montantes e pratos, do sistema hidráulico, êmbolos, etc.*.

Se tal rigidez da prensa for inferior à correspondente ao ramo descendente da curva da rocha, a ruptura é de tipo explosivo, não sendo possível detectar este último ramo. É o caso correspondente ao acréscimo de deformação δ_0 (Fig. 3) impondo a prensa uma força F' que é superior à que pode ser suportada pela rocha, o que motiva a instabilidade do conjunto. O mesmo já não aconteceria com uma prensa possuindo uma característica dotada de maior rigidez, dado que então a força aplicável seria F'' , suportável pela rocha. Às mesmas conclusões se chegaria por consideração das energias de deformação postas em jogo, visto estas corresponderem às áreas entre as curvas e o eixo dos deslocamentos, no diagrama da Fig. 3.

Um processo simples de evitar as roturas violentas e permitir por consequência, o registo dos ramos descendentes das curvas tensão-deformação unitária das rochas consiste em fazer passar artificialmente a carga aplicada pela prensa de F' para F'' , quando se impõe um acréscimo de deslocamento δ_0 . Para tal, instalar-se-á em paralelo com o espécime de rocha e, portanto, em série com os pratos da prensa, um elemento elástico E de rigidez apropriada K_E (Fig. 4).

A existência do elemento de rigidez conduz à modificação da rigidez do novo sistema de carga constituído pela prensa (de rigidez K_P) e o elemento em série (ver Fig. 4-1). Atendendo a que neste primeiro caso

será

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{K_P} + \frac{1}{K_E}$$

$$K_1 = \frac{K_P K_E}{K_P + K_E}$$

Quando a rocha se encontra instalada em paralelo com o elemento de rigidez - Fig. 4-2) - a rigidez do conjunto passará a ser

$$K_2 = \frac{K_P (K_E + K_R)}{K_P + E + K_R}$$

* Para a prensa Losenhausen BP-200 usada na experimentação, a rigidez foi objecto de determinação pormenorizada, sendo igual a $1,03 \times 10^6$ kg/cm.

em que K_R representa a rigidez do provete de rocha ensaiado*.

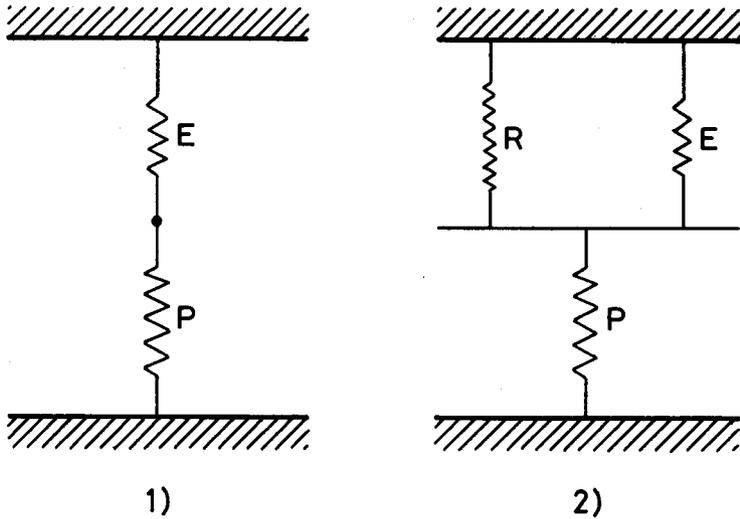


Fig. 4 - Representação esquemática do aumento artificial de rigidez da prensa; 1)-sem rocha e 2)-com rocha.

Não é possível, a partir do conhecimento de K_1 e K_2 obter univocamente o valor pretendido de K_R , visto as duas situações corresponderem a ter sempre a prensa associada ao dispositivo que se deseja estudar, de maneira que os deslocamentos provenientes da deformação da prensa lidos no deflectómetro mascaram sempre os correspondentes ao provete em estudo. Como para elementos em série a força exterior aplicada é a mesma para os dois elementos, cujos deslocamentos são aditivos, ao passo que, em paralelo, as forças são aditivas e os deslocamentos são idênticos nos dois elementos, o melhor processo de individualizar a característica força-deslocamento da rocha consiste em partir apenas das características do elemento de rigidez,

* De acordo com a lei de Hooke e por definição de rigidez será:

$$K = \frac{A}{L} E$$

onde E é o módulo de elasticidade do material da amostra, A e L a sua área transversal e a sua altura, respectivamente.

sem considerar as deformações a que a prensa é submetida. A situação está esquematizada na Fig. 5-a, onde pode observar-se que o registo das curvas P + E (prensa com elemento de rigidez) e P + E + R (prensa com elemento de rigidez e provete de rocha instalado) permitir obter por diferença uma característica do conjunto P + R.

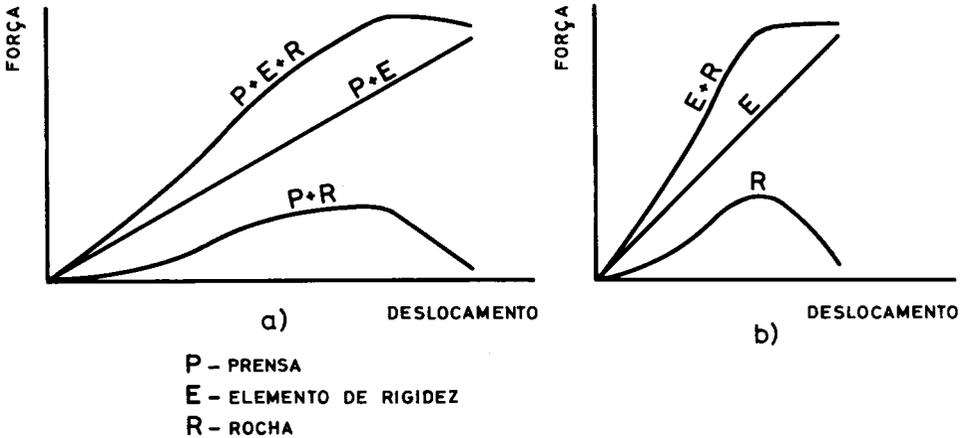


Fig. 5 - Diagramas força-deslocamento do sistema total (a) e do elemento de rigidez (b), com e sem rocha instalada em paralelo.

Por outro lado, se for possível registar antes e depois de introduzir o provete de rocha, quais as características do elemento de rigidez separadamente das da prensa, pode, por diferença, obter-se a curva característica $F -$ para a rocha, que é o objectivo do ensaio. Essa informação, que se apresenta na Fig. 5-b, revela que em virtude da associação E + R ser em paralelo, se tem, para a força total F aplicada pela prensa,

$$F = F_E + F_R$$

e um deslocamento no elemento de rigidez igual ao da rocha

$$\delta_E = \delta_R$$

Designando a rigidez pelo coeficiente angular das curvas representadas, será:

$$K_E = \frac{d F_E}{d \delta}$$

e

$$K_{E+R} = \frac{d F}{d \delta}$$

pelo que a rigidez da rocha virá

$$K_R = \frac{d F_R}{d \delta} = \frac{d (F - F_E)}{d \delta} = K_{E+R} - K_E$$

Nestas condições, ter-se-á, para o ramo ascendente da curva $F - \delta$ da rocha, um coeficiente angular

$$K_R > 0 \text{ quando } K_{E+R} > K_E$$

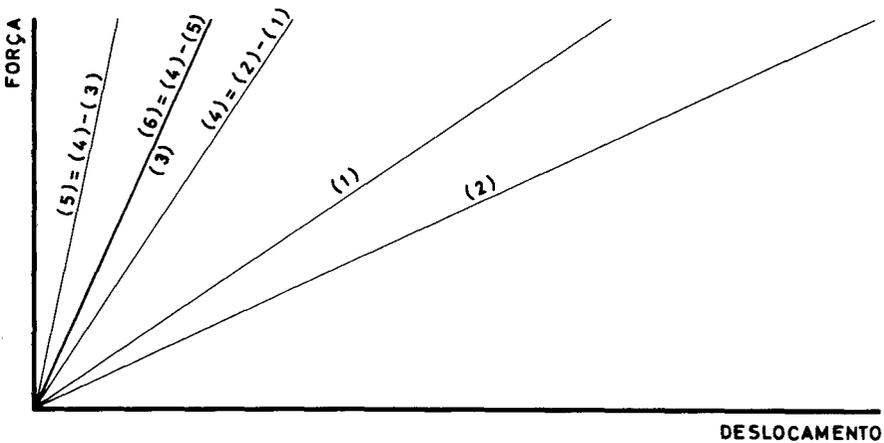
e para o correspondente ramo descendente

$$K_R < 0 \text{ quando } K_{E+R} < K_E.$$

Existe a possibilidade de confirmar as características da rocha obtidas por diferença das duas curvas $E + R$ e E , com a que se obtém a partir de $P + E$ (ver Fig. 5-a). De facto, quando se subtraem aos deslocamentos lidos no sistema que assinala os movimentos do prato da prensa em relação ao seu barramento fixo*, os deslocamentos correspondentes à deformação da própria prensa sob a acção da carga aplicada, pode obter-se a curva que apenas diz respeito à rocha. Esse processo é todavia complicado, pois as características em consideração são variadas e diferentes entre si, como é observável a partir da Fig. 6, que traduz esquemáticamente o resultado de determinações experimentais obtidas com um tubo de aço a servir de elemento de rigidez.

* Embora a prensa utilizada não viesse dotada de origem com tal sistema de leitura, este foi instalado posteriormente utilizando um deflectómetro de milésimos de milímetro.

Partindo do registo directo das características [1], [2] e [3] é possível determinar (antes de instalar a rocha em paralelo com o elemento de rigidez) que são coincidentes, salvo erros próprios dos sistemas de medição utilizados, as curvas características do deslocamento real do elemento de rigidez e a do sistema conjunto, retirando o deslocamento *adicional* da prensa quando tem aquele elemento instalado em série.



- (1) - DIAGRAMA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA A PRENSA COM OS SEUS PRATOS ENCOSTADOS
- (2) - DIAGRAMA FORÇA-DESLOCAMENTO PARA A PRENSA COM O ELEMENTO DE RIGIDEZ INSTALADO
- (3) - DIAGRAMA FORÇA-DESLOCAMENTO REAL DO ELEMENTO DE RIGIDEZ
- (4) - DIAGRAMA FORÇA-DESLOCAMENTO APARENTE DO ELEMENTO DE RIGIDEZ
- (5) - DIAGRAMA FORÇA-DESLOCAMENTO ADICIONAL DA PRENSA, QUANDO TEM O ELEMENTO DE RIGIDEZ INSTALADO
- (6) = (3) - DIAGRAMA FORÇA-DESLOCAMENTO DO SISTEMA RETIRANDO O DESLOCAMENTO ADICIONAL DA PRENSA

Fig. 6 - Diagramas força-deslocamento aparente e real da prensa e elemento de rigidez, sem provete de rocha instalado.

Em face do exposto e por questões de simplicidade é mais conveniente proceder ao registo das deformações do elemento de rigidez, antes e depois do provete de rocha lhe ser associado em paralelo.

Utilizando esta técnica operatória é indispensável dimensionar os sistemas de rigidez utilizados, sendo para tal necessário conhecer o limite de aplicação de carga da prensa (no caso presente 200 toneladas), a rigidez do elemento rígido e a previsível tensão máxima de resistência da rocha à compressão. Com estes dados é possível estabelecer como se distribui a força aplicada pelos dois elementos em paralelo, de modo a garantir que se registre a zona pós-rotura. De facto, atendendo a que os seus deslocamentos são iguais, a força F aplicada pela prensa será

$$F = F_E + F_R = (K_E + K_R) \delta ,$$

e como F e δ são obtidos por leitura directa e K_E é conhecido previamente, determina-se qual a força máxima F_R que passa para a rocha durante o ensaio. Note-se que se for conhecido o módulo de elasticidade da rocha E_R , pode ter-se uma ideia da ordem de grandeza de K_R por ser

$$K_R = \frac{A}{L} E_R$$

onde A e L representam, respectivamente, a área transversal e a altura do provete de rocha ensaiado.

A distribuição de forças far-se-á na razão directa do quociente K_E/K_R , pelo que se conclui que quanto maior é a rigidez da rocha relativamente à do elemento rígido (sendo sempre $K_R < K_E$), mais baixa é a carga total F que faz levar o provete à rotura.

Foram de três tipos os elementos de rigidez utilizados na experimentação:

a) Um tubo de aço de alta resistência com 67 mm de diâmetro interior e 12,5 mm de espessura de parede. Este tubo de aço envolvia por completo o provete de rocha a ensaiar, permitindo por dois pequenos rasgos abertos junto a um dos topos a saída dos condutores eléctricos de ligação aos extensómetros de resistência solidários com a rocha.

b) Os anéis dinamométricos com que a prensa está equipada, nomeadamente os de 100 t e 180 t de capacidade.

c) Uma célula de rigidez especialmente construída para o efeito.

Na Fig. 7 apresentam-se os elementos de rigidez referidos.

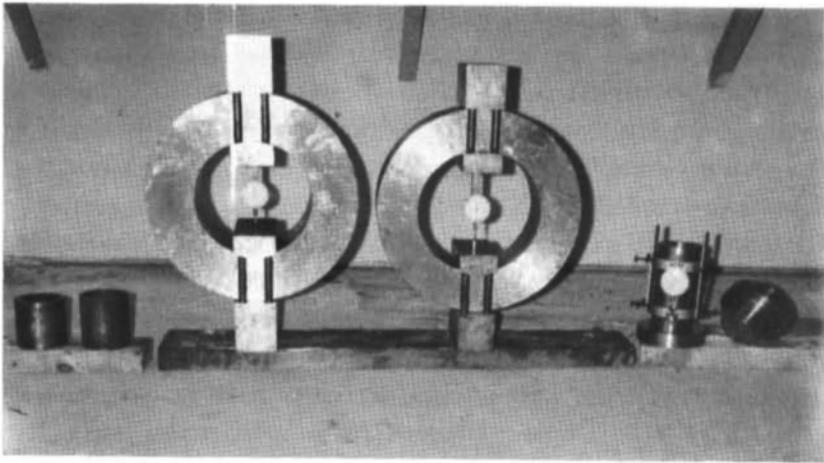


Fig. 7 – Elementos de rigidez utilizados na experimentação

4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios laboratoriais destinados ao registo das curvas completas de deformação e rotura de provetes de rocha foram utilizados com o equipamento existente na Universidade de Luanda, utilizando-se para o efeito dois tipos comuns de rochas, o calcário margoso orgânico do Cacucaco e o grés quartzomoscovítico de Cambambe. Os provetes eram obtidos a partir de blocos, por perfuração com sonda dotada de coroas diamantadas, sendo seleccionados os diâmetros de 41 e 45 mm. A altura dos provetes foi fixada no dobro do respectivo diâmetro, em todos os ensaios, visto tal relação conduzir à distribuição uniforme de tensões no centro das amostras, evitando a perturbação do estado de tensão no contacto com os pratos da prensa e não sendo tão elevada que ocasionasse roturas por encurvadura [11]. Para cada tipo de elemento de rigidez empregue na experimentação foram registadas as curvas respeitantes a ambas as rochas. O acordo de resultados foi bastante satisfatório revelando-se em todos os testes realizados, que o módulo de elasticidade e a tensão máxima de resistência à compressão uniaxial do calcário eram inferiores aos correspondentes valores do grés.

O primeiro processo utilizado foi o de envolver o provete de rocha com um tubo de aço e, para tal, procedeu-se por tentativas à selecção das dimensões mais convenientes do mesmo, atendendo ao tipo de informação pretendido.

Para o mesmo diâmetro interior do tubo houve que escolher uma espessura de parede não tão elevada que ao atingir as 200 t de capacidade de carga da prensa se não conseguisse a rotura do provete de rocha, nem tão estreita que o aço do tubo entrasse em deformação plástica antes de ter lugar a rotura da rocha. Assim se acabou por seleccionar um elemento de rigidez com as dimensões indicadas em 3.

Na face exterior do tubo de aço foram colocados, em geratrizes opostas, dois extensómetros eléctricos de resistência ligados em série. As leituras dos mesmos em função da força aplicada pela prensa foram registadas, primeiramente sem o provete de rocha e, posteriormente, com o provete de rocha instalado em paralelo com o tubo. Tais registos têm andamentos como os que estão patentes na Fig. 8, relativa a um exemplo concreto.

Em virtude de o provete de rocha ter a mesma altura do tubo de aço, as suas deformações unitárias são iguais às do tubo, que, por sua vez, são as registadas pelo extensómetros eléctricos. Assim, é possível obter, por diferença entre as ordenadas das curvas b) e a) da Fig. 8, a força que transitou para

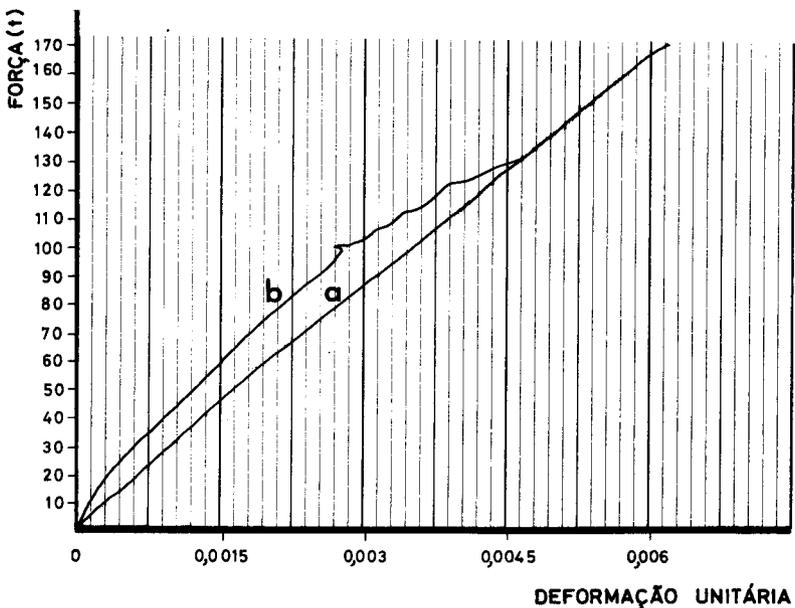


Fig. 8 - Curvas força-deformação unitária para o tubo de aço: a)-sem rocha, b)-com rocha em paralelo (calcário margoso).

a rocha ao longo do ensaio, força essa que dividida pela área transversal do provete (no caso em referência o diâmetro do mesmo era de 51 mm) permite calcular os sucessivos valores da tensão de compressão durante a experiência. A Fig. 9 traduz a variação da tensão com a deformação unitária de um dos provetes de rocha calcária ensaiados, revelando que a sua tensão máxima de resistência à compressão é de 1120 kg/cm^2 e o seu módulo de elasticidade médio (ou secante) é da ordem de $4,15 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$.

Do exame da Fig. 9 pode resultar a definição de um segundo módulo de elasticidade da rocha, relativo ao ramo descendente da sua curva $\sigma - \epsilon$. Este parâmetro, que é negativo, é no caso referido igual a $-5,75 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, tendo por consequência um valor absoluto superior ao verdadeiro módulo de elasticidade do material.

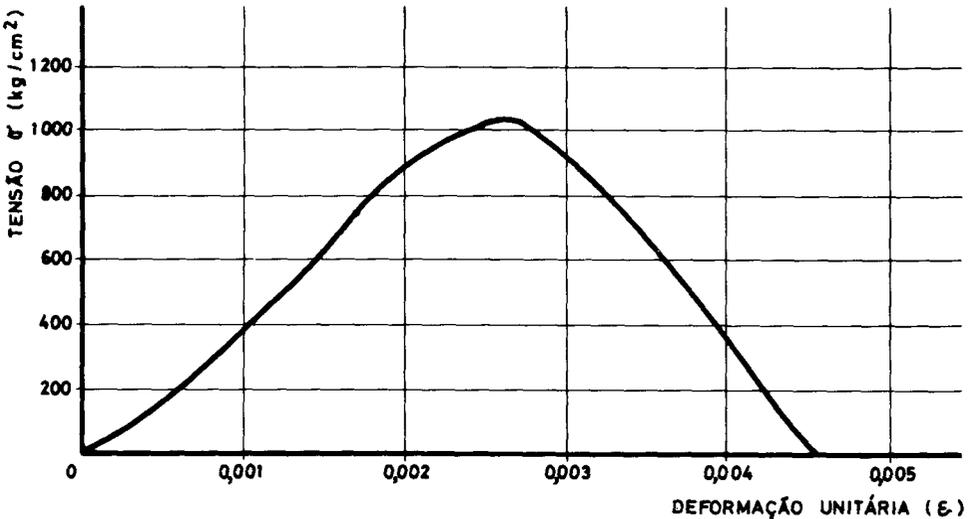


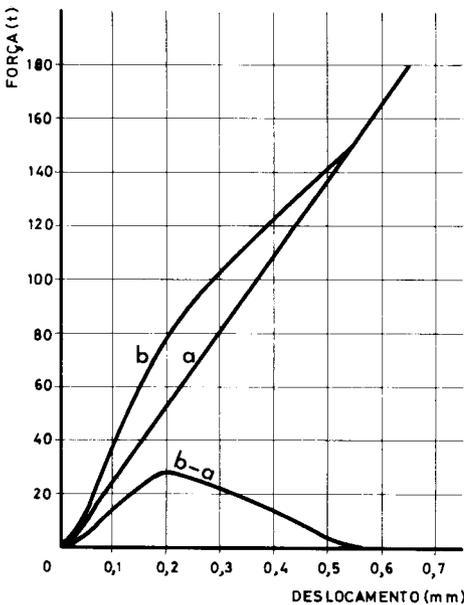
Fig. 9 – Curva completa tensão-deformação unitária para a rocha calcária margosa submetida à compressão uniaxial.

Bieniawski e Vogler [12] definem para cada rocha os módulos de elasticidade ascendente e descendente, assinalando a importância do respectivo quociente, que parece ser uma grandeza característica de cada tipo de rocha, variando com a natureza da mesma. O conhecimento desse quociente pode ser essencial para a previsão do comportamento da rocha fracturada, na zona de

pós-rotura, como acontece em muitos pilares de minas subterrâneas. No entanto, os mesmos autores [12] apontam a necessidade de realização de mais trabalhos de investigação sobre este tema, essencialmente baseados em experimentação *in situ*, dado o seu grande interesse nas aplicações práticas.

Ainda em relação à utilização de tubos de aço como elementos de rigidez pode referir-se que foram também estabelecidas as características pós-rotura do grés quartzo-moscovítico por este método.

O segundo processo usado para incrementar a rigidez da prensa em que se realizaram os ensaios foi, como já se referiu, o que previa o emprego de anéis dinamométricos. A respectiva curva de rigidez é bem conhecida (servindo até para testar a precisão das leituras na prensa) de modo que depois de se instalar em paralelo com o anel um provete de rocha, se regista uma curva sempre diferente daquela. Por diferença entre as duas curvas obtém-se a que traduz a variação da força aplicada com o deslocamento sofrido pela rocha, da qual se deduz a característica tensão-deformação unitária pretendida. Todavia, o cálculo das deformações unitárias relativas à rocha não é tão directo como no processo anterior, em virtude de o provete de rocha não possuir uma altura



FORÇA (t)	LEITURAS NO DEFLECTÓMETRO DO ANEL (mm)	
	A-Sem Rocha	B-Com Rocha
10	0,045	0,038
20	0,080	0,058
30	0,100	0,082
40	0,135	0,105
50	0,172	0,128
60	0,205	0,150
70	0,245	0,168
80	0,280	0,200
90	0,325	0,242
100	0,352	0,295
110	0,388	0,332
120	0,420	0,372
130	0,462	0,440
140	0,502	0,485
150	0,540	0,545
160	0,575	0,582
170	0,612	0,618
180	0,648	0,650

Fig. 10 - Variação força-deslocamento num ensaio com grés quartzo-moscovítico feito com anel dinamométrico de 180 t: a)-sem rocha; b)-com rocha.

igual ao espaço livre de carga existente dentro do anel. Com efeito, partindo das curvas força-deslocamento (por exemplo, as representadas na Fig. 10, para um ensaio com a rocha gresosa) não pode afirmar-se que a curva da diferença se refere exclusivamente à rocha, visto a mesma estar a ser carregada em série com um pequeno cilindro de aço, provido de rótula, destinado a garantir altura conveniente e axialidade de carga.

A montagem experimental está esquematizada na Fig. 11, onde pode observar-se a posição relativa do provete de rocha e da rótula de aço.

Cada deslocamento δ referente às abcissas do diagrama da Fig. 10 é decomposto em duas partes aditivas: δ_R , relativamente ao provete de rocha, e δ_A , do pequeno cilindro de aço. Em virtude de sobre estes dois elementos se instalar uma força idêntica, teremos

$$F_R = K_A \delta_A = K_R \delta_R$$

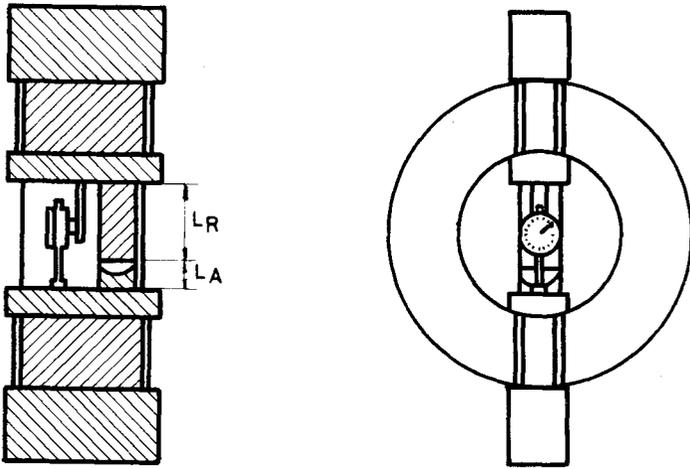


Fig. 11 - O anel dinamométrico de 180 t com o provete de rocha e rótula de aço instalados.

onde K_A e K_R representam a rigidez das peças de aço e de rocha, respectivamente. Atendendo a que estes últimos podem exprimir-se, como já se indicou, por

$$K_A = \frac{A_A}{L_A}$$

$$K_R = E_R \frac{A_R}{L_R}$$

sendo, respectivamente, E, A e L o módulo de elasticidade, a área transversal (igual nas duas peças, $A_A = A_R$) e a altura das mesmas, o deslocamento que afecta a rocha pode ser obtido em função do deslocamento registado δ . Com efeito, deduz-se fàcilmente que

$$\delta_R = \delta - \delta_A = \delta \left(1 - \frac{E_R L_A}{E_A L_R + E_R L_A} \right) = \delta \frac{E_A L_R}{E_A L_R + E_R L_A}$$

e assim, substituindo os valores utilizados na experimentação e prèviamente determinados* obteve-se:

$$\delta_R = 0,89 \delta$$

relação que permite traçar a curva tensão-deformação unitária respeitante à rocha. Tal curva está patente na Fig. 12, para o exemplo mencionado.

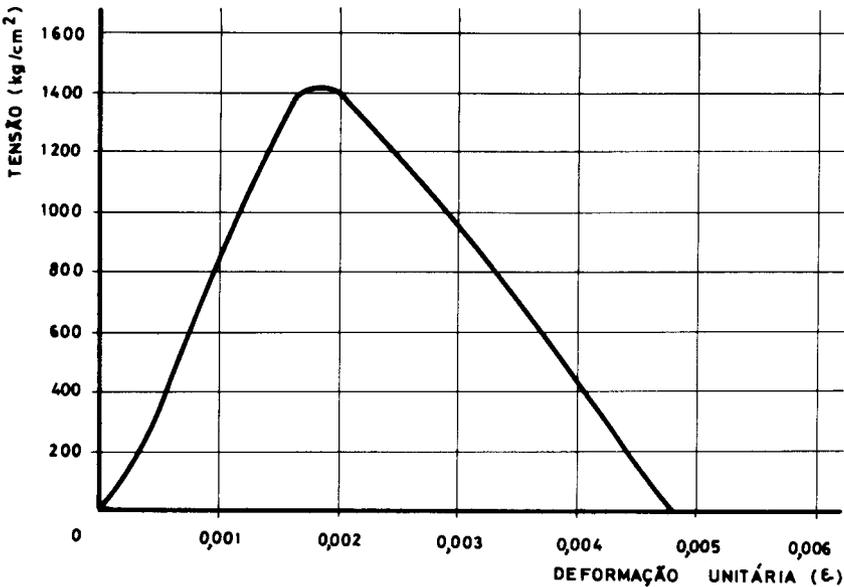


Fig. 12 – Curva completa tensão-deformação unitária para a rocha gresosa submetida à compressão uniaxial.

* Para o ensaio referido, eram: $L_A=33$ mm, $L_R=102$ mm, $E_A=2,07 \times 10^6$ kg/cm^2 e $E_R=7,8 \times 10^5$ kg/cm^2 .

Os parâmetros mecânicos mais importantes que caracterizam o grés quartzo-moscovítico obtêm-se a partir de diagramas do tipo apresentado na Fig. 12, a qual revela uma tensão máxima de resistência à compressão uniaxial da ordem de 1410 kg/cm^2 , e módulos de elasticidade iguais a $7,8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ no ramo ascendente a $-5,2 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ no ramo descendente. Assinale-se que na maioria dos ensaios efectuados com este tipo de rocha o declive da curva no troço descendente era inferior ao do seu troço ascendente, ao contrário do registado para o calcário orgânico.

Resta referir o conjunto de determinações experimentais realizadas com a célula de rigidez, que foi propositadamente projectada e construída de modo a atingir o objectivo dos ensaios com maior comodidade e eficiência. Tanto os testes com tubos de aço como os com anéis dinamométricos, em especial os últimos, eram demasiado morosos e sujeitos a variadas causas de erro. Surgiu pois a necessidade de dispor de um elemento de rigidez apropriado para a realização de ensaios em série, cujo modo de operação fosse simples e que possuísse um processo directo de leitura de deformações. Baseando-se na utilização de uma célula constituída por um tubo de aço com base e tampa de aço incorporadas, no exterior da qual fosse possível instalar uma gaiola para a inclusão de um deflectómetro mecânico, o processo é caracterizado por permitir leituras directas do mesmo com grande facilidade, quando exista ou não um provete de rocha no interior da célula. Como a base de medida do deflectómetro da gaiola é regulável, fixa-se a mesma com uma dimensão igual à altura do provete a ensaiar, a fim de o quociente entre os deslocamentos e a altura da referida base fornecer imediatamente os valores da deformação sofrida pela rocha.

A espessura da parede da célula (ver Fig. 7) foi estabelecida por tentativas a partir de uma dimensão inicial suficientemente ampla para, por sucessivas passagens ao torno, se ir reduzindo até um valor adequado à obtenção da curva completa da rotura das rochas estudadas.

Os registos têm o aspecto apresentado na Fig. 13, onde se sobrepõem as curvas da célula vazia com as correspondentes a dois testes realizados depois de introduzir um provete de calcário e outro de grés quartzo-moscovítico no interior da célula.

Usando o processo, já descrito, de individualizar as curvas correspondentes ao provete de rocha e executando os correspondentes cálculos, é imediata a obtenção das curvas tensão-deformação unitária, que para os casos referidos são as que constam da Fig. 14.

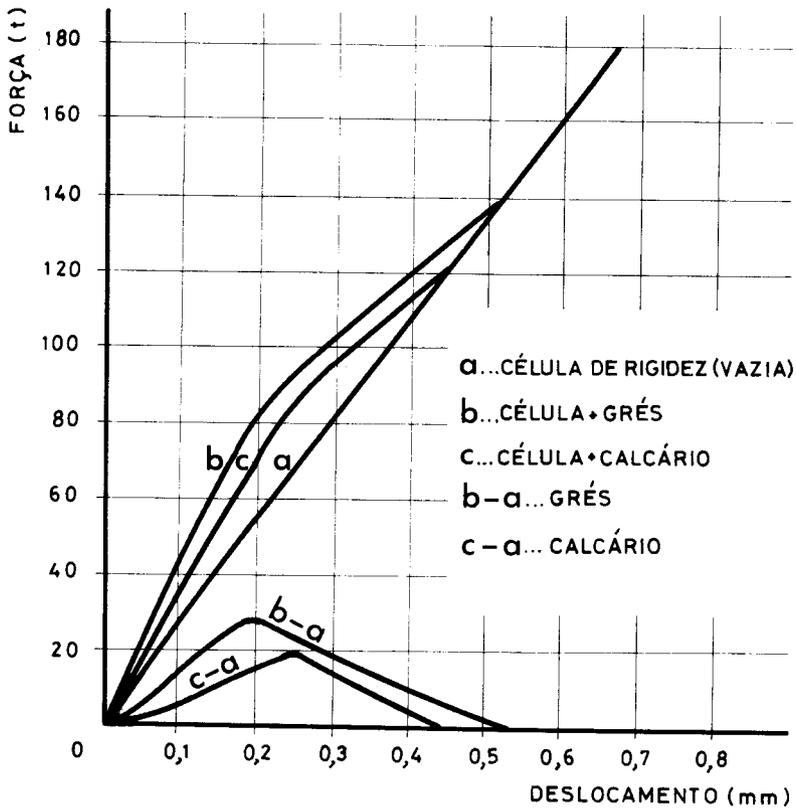


Fig. 13 – Características força-deslocamento de duas variedades de rochas, obtidas por ensaios com célula de rigidez.

As grandezas dos parâmetros mecânicos das rochas, determinados por este processo, estão compatíveis com os já referidos a propósito da utilização dos dois outros elementos de rigidez. Contudo, foi constatado que os desvios padrão obtidos em relação ao valor desses parâmetros, verificados nos sucessivos ensaios, eram menores quando se empregava a célula de rigidez do que nos dois outros métodos. Essa relativa constância no valor das grandezas medidas traduz uma mais correcta repetição das condições experimentais que acompanham os ensaios quando se faz uso da célula de rigidez, o que leva a considerar este último sistema preferível em relação aos anteriores.

Dispondo, por consequência, de uma célula de rigidez convenientemente calibrada é possível sistematizar o processo operatório dos ensaios destinados

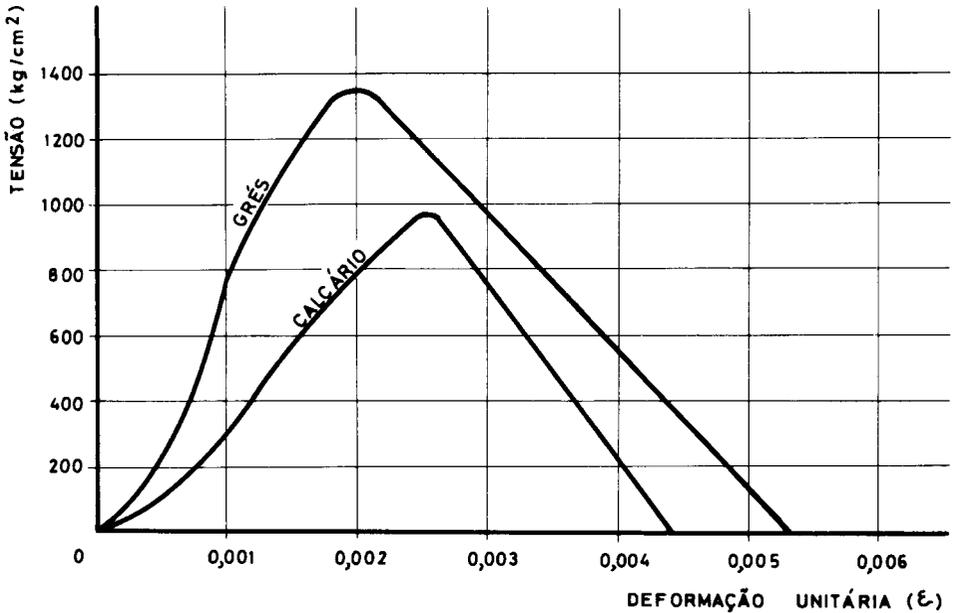


Fig. 14 – Curvas completas tensão-deformação unitária para as rochas ensaiadas, conseguidas a partir de testes com célula de rigidez.

ao registo das curvas de rotura das rochas e normalizar, desse modo, futuras determinações desta natureza.

5 – CONFIRMAÇÃO POR REGISTO DIRECTO

Em grande parte da série de ensaios laboratoriais realizados para a definição de curvas completas tensão-deformação unitária de rochas submetidas à compressão uniaxial procedeu-se à colagem de extensómetros eléctricos nos provetes de rocha e ao registo das respectivas deformações. Os fios condutores saíam do interior dos tubos de aço ou da célula de rigidez por pequenos orifícios abertos nas suas paredes, enquanto que ao fazer uso do anel dinamométrico os fios seguiam directamente para os registadores.

A comparação entre os resultados obtidos através da curva de diferença de leituras de deformações do elemento de rigidez com e sem rocha (registo indirecto) com os resultados provenientes da leitura dos extensómetros ligados ao provete de rocha (registo directo) nem sempre foi satisfatória. Para além dos erros experimentais sistemáticos e da irregularidade

de leituras proporcionadas pelos extensómetros eléctricos (que foi melhorada com a introdução de outros modelos mais adequados às condições destes ensaios) os desvios verificados entre registos indirectos e directos só foram

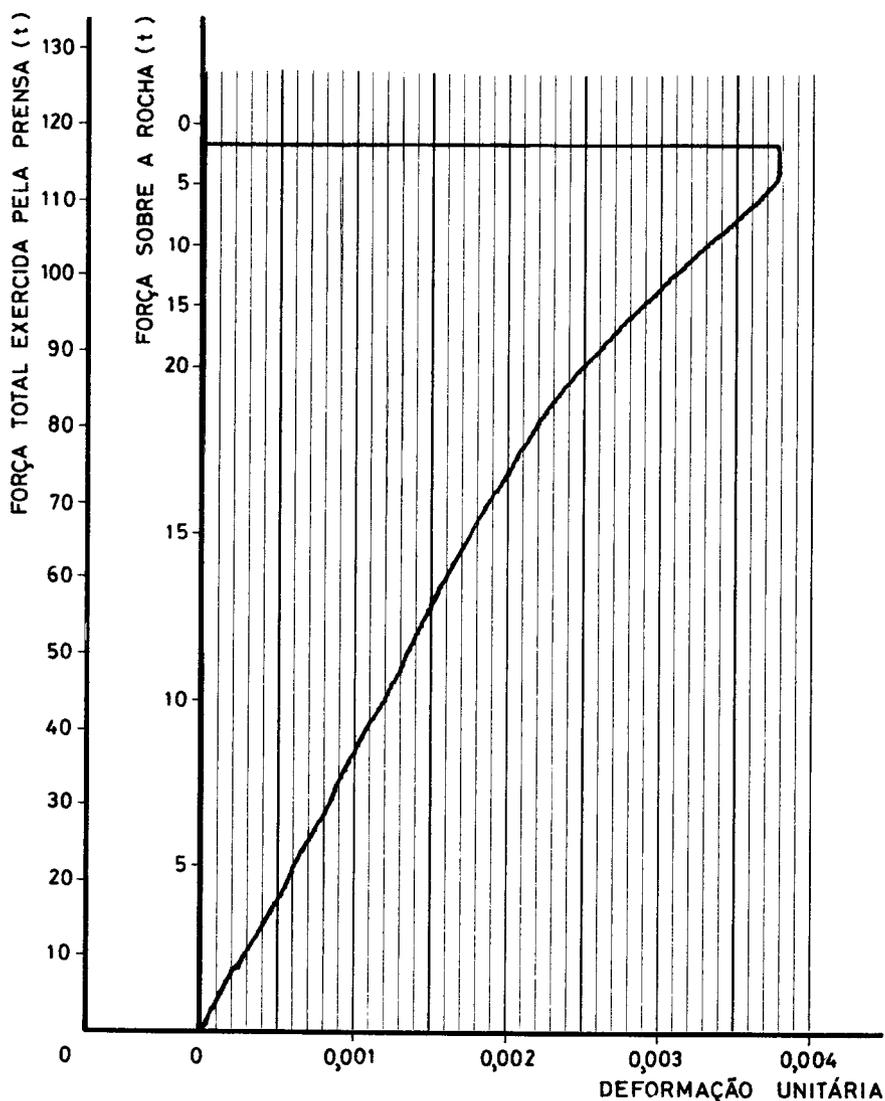


Fig. 15 - Curva força-deformação unitária de um provete de calcário, obtida por registo directo.

considerados aceitáveis no caso da utilização de célula de rigidez, talvez por o seu sistema de leitura própria ser de maior confiança. São bons exemplos dessa concordância os diagramas apresentados nas Figs. 15 e 16 que dizem respeito

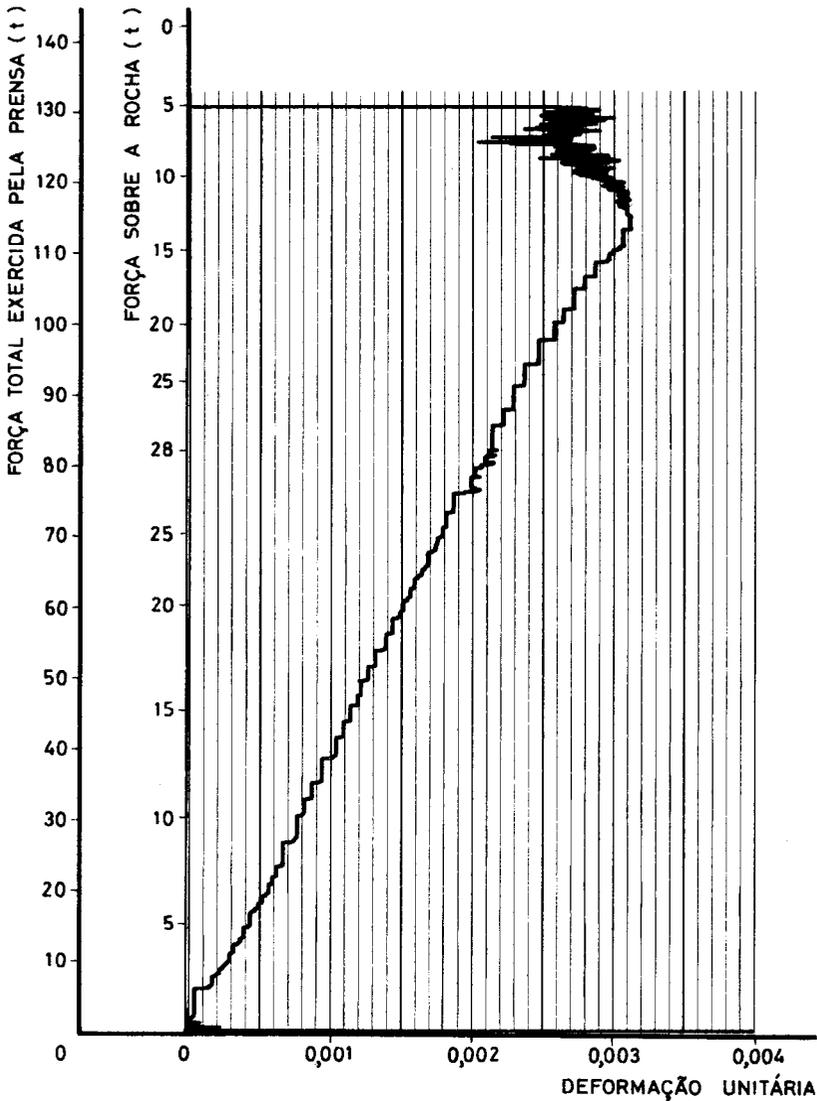


Fig. 16 – Curva força-deformação unitária de um provete de calcário, obtida por registo directo.

aos mesmos ensaios já patentes na Fig. 14, onde então os registos eram obtidos por via indirecta.

Nestes diagramas, tirados do próprio registador contínuo, pode observar-se que as ordenadas estão graduadas em forças, sendo a força total aplicada pela prensa directamente proporcional à velocidade de avanço do papel. Do conhecimento da parcela dessa força total que transita para a rocha (obtida a partir do diagrama da Fig. 13) traça-se um segundo eixo de ordenadas graduado em unidades de força, as quais, após divisão pela área do provete, conduzem à determinação das tensões aplicadas à rocha.

O acordo entre os diagramas das Figs. 15 e 16 com o da Fig. 14 é animador pois comprova que o arranjo experimental usado para registo destes fenómenos se comprovou satisfatoriamente, caracterizando a mesma reacção da rocha através de informações provenientes de duas vias distintas. Por outro lado, essa constatação é também valiosa na medida em que revela ser o registo das curvas completas de rotura das rochas susceptível de se obter, em cada caso, a partir da via mais conveniente (deflectómetros mecânicos ligados à célula de rigidez ou extensómetros eléctricos colados ao provete de rocha) ou ainda, quando grande rigor é exigido, pode recorrer-se a ambos os sistemas simultaneamente.

Outro tipo de registos directos também executados para confirmação dos resultados obtidos à custa do emprego de elementos de rigidez, foi o de ensaiar provetes de rocha cuja rigidez se pudesse estimar *a priori* e fosse inferior à da prensa. De facto, partindo do conhecimento do módulo de elasticidade descendente das rochas, é possível, desde que se estabeleçam convenientes dimensões para a altura e o diâmetro das amostras, impor-lhes uma rigidez inferior a $1,03 \times 10^6$ kg/cm. De acordo com o previsto, o ramo descendente da curva tensão-deformação unitária poderia ser então registado (cf. Fig. 3).

A montagem laboratorial consistiu na instalação de um provete de rocha *esbelto* (cuja relação altura/diâmetro não excedesse 3 [11]) em série com um cilindro de aço das mesmas dimensões (ver Fig. 17). A este cilindro estava colado um extensómetro eléctrico cujas leituras fornecem, depois de multiplicadas por um factor de escala, as forças aplicadas pela prensa; por outro lado, extensómetros colados ao provete de rocha indicam directamente os sucessivos valores da deformação longitudinal a que o mesmo está sujeito. Estes dois tipos de leituras, processados por um registador X-Y, fornecem as curvas completas procuradas.

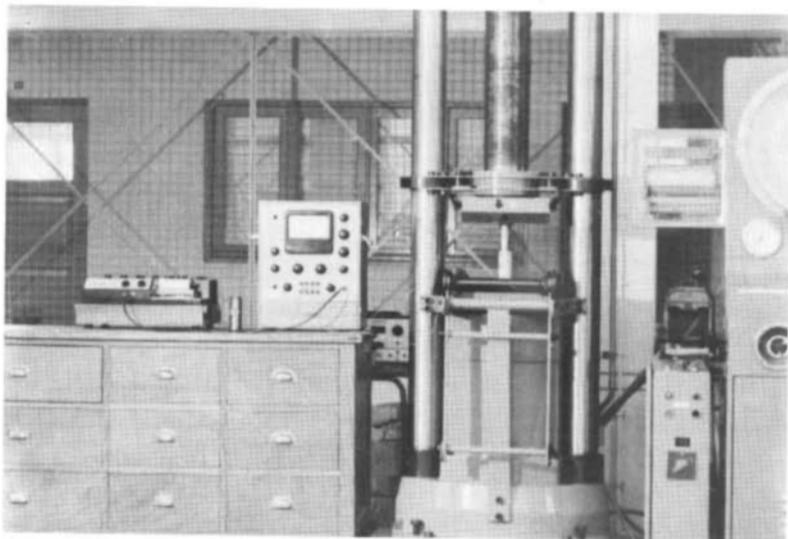


Fig. 17 – Arranjo experimental utilizado para o registo directo das curvas tensão-deformação unitária de provetes de rocha esbeltos.

Usando no gráfico a grandeza das forças em ordenadas, as leituras do extensómetro colado ao provete de aço são ampliadas e ligadas ao eixo dos yy do registador e, análogamente, as do provete de rocha ao eixo dos xx, obtiveram-se curvas tensão-deformação unitária, tais como as apresentadas na Fig. 18.

Em regra, os registos directos assim conseguidos revelaram um abaixamento na tensão de resistência à compressão uniaxial e no módulo de elasticidade ascendente em relação aos anteriormente obtidos por via indirecta, facto que pode ser atribuído ao aumento da relação altura/diâmetro dos provetes ensaiados. Além disso, como pode observar-se na Fig. 18, o ramo descendente foi caracterizado por um declive maior que o ramo ascendente, como já tinha sido assinalado para o calcário margoso, em experiências efectuadas com elementos de rigidez.

Embora os resultados desta série de experiências tenham sido significativos, eles não poderão ser comparáveis aos anteriormente citados, em virtude de as dimensões geométricas dos provetes de rocha terem sido alteradas. No entanto, cita-se a sua realização por se considerar que, mesmo sem elemento de rigidez, as prensas convencionais podem registar o ramo descendente das

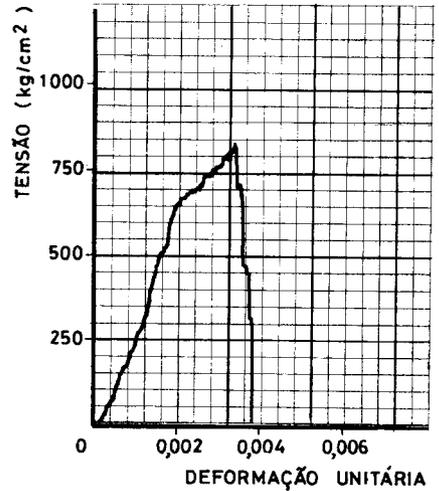
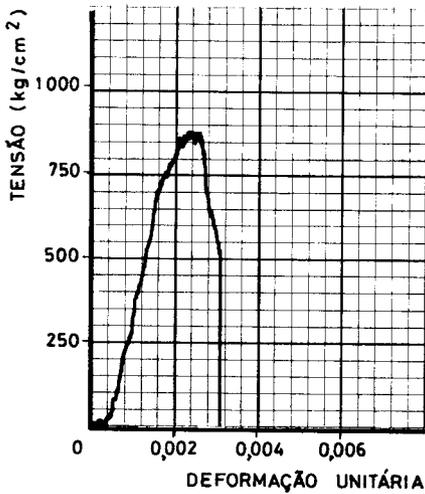


Fig. 18 – Dois exemplos de curvas completas de ruptura da rocha calcário margoso, obtidas directamente no registador X-Y.

curvas de rotura de certas rochas, desde que o respectivo declive, isto é, a correspondente rigidez da rocha na zona de pós-rotura, seja inferior à rigidez da prensa.

6 – CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos na sucessão de ensaios realizados, todos relativos a solicitações de compressão uniaxial, podem ser bem correlacionados com as previsões teóricas da rotura dos materiais rochosos. Sendo uma rotura eminentemente frágil, ficou comprovado, através dos registos obtidos, que é de importância limitada a fase plástica que antecede a rotura propriamente dita.

De uma maneira geral, pode confirmar-se que as quatro zonas em que se considera dividido o diagrama tensão-deformação unitária (cf. Fig. 1) se registam habitualmente na prática, tendo o cuidado de promover o aumento artificial de rigidez do sistema de carga para poder assinalar o ramo descendente dessas curvas, correspondente à zona de pós-rotura das rochas.

Sob um ponto de vista mais restrito, as conclusões mais salientes da investigação realizada, podem sintetizar-se nos seguintes pontos:

a) Existe uma resistência atribuível às rochas fracturadas, representada pela tensão que as mesmas podem suportar após o início da sua rotura, tensão essa que é representável pela ordenada de cada ponto do ramo descendente da curva tensão-deformação unitária da rocha submetida à compressão uniaxial.

b) Na zona de pós-rotura, cada incremento de deformação unitária além do ponto de resistência máxima da rocha, requer um incremento de energia de deformação que deve ser comunicada à rocha. Tal incremento de energia, a avaliar pelos resultados experimentais parece ser crescente com o valor da tensão máxima de resistência à compressão. Se não for fornecido esse incremento, a rotura é suspensa ficando a rocha com deformações irreversíveis.

c) Como corolário, a resistência das rochas estudadas é, na zona de pós-rotura, tanto maior quanto maior for a respectiva tensão máxima de resistência à compressão.

d) O quociente entre o módulo de elasticidade da rocha no ramo ascendente da curva σ - ϵ e o módulo de elasticidade no troço descendente da mesma curva parece ser aproximadamente constante para cada tipo de rocha. Esse quociente foi, em valor absoluto, menor que a unidade para uma das rochas ensaiadas (o calcário margoso orgânico) e maior que a unidade para a outra (grés quartzo-moscovítico).

e) O tipo de fracturação obtido após a realização de todos os testes foi o resultante do desenvolvimento de fendas verticais ou longitudinais através da rocha, com a ocorrência de fragmentos alongados. Nunca foi registada a formação de fragmentos cónicos, típicos da rotura por corte, como é comum em ensaios de compressão uniaxial, em que existe considerável atrito entre os topos dos provetes e os pratos da prensa [11].

f) Os resultados experimentais foram condizentes entre si, apresentando razoável constância, o que satisfaz os requisitos normalmente exigidos na prática.

A importância que trabalhos desta natureza podem vir a ter é considerável, principalmente se os mesmos forem estendidos a ensaios *in situ*.

O conhecimento mais profundo da resistência das rochas em situações de pós-rotura pode ter grande variedade de aplicações em trabalhos mineiros subterrâneos, no projecto de desmontes, na previsão de escorregamentos de terreno, etc.. Por outro lado, a extensão do conhecimento científico sobre a rotura dos materiais rochosos é, por si só, justificativo do prosseguimento de trabalhos desta natureza.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a amável contribuição do Dr. Paz Baptista, do Departamento de Geologia da Universidade de Luanda, para a identificação das espécies rochosas ensaiadas. Está também reconhecido pela colaboração prestada pelo preparador A. Milício Silva durante a realização dos ensaios laboratoriais, frequentes vezes para além dos horários normais de serviço.

O apoio concedido pelas Oficinas de Mecânica e de Electrotecnia da U.L. para a eficácia da experimentação foi decisivo, pelo que ele é aqui referido com os agradecimentos do autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - GRIFFITH, A. A. (1924) - *Theory of rupture*. Proceedings of the First International Congress of Applied Mechanics. Delft.
- 2 - McCLINTOCK, F. A. and WALSH, J. B. (1962) - *Friction on Griffith Cracks under Pressure*. Proceedings of the Fourth U. S. National Congress of Applied Mechanics. A. S. M. E. New York.
- 3 - BRACE, W. F. (1964) - *Brittle Fracture of Rocks. State of Stress in the Earth's Crust*. Ed. W. R. Judd. Elsevier. New York.
- 4 - COOK, N. G. W. (1965) - *The Failure of Rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 2, Pp. 389-403. Pergamon Press. London.
- 5 - JAEGER, J. C. (1967) - *Brittle Fracture of Rocks*. Proceedings of the Eighth Symposium on Rock Mechanics. Ed. C. Fairhurst. A. I. M. E. New York.
- 6 - BIENIAWSKI, Z. T. (1967) - *Mechanism of Brittle Fracture of Rocks*. Parts I, II and III. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 4, Pp. 395-430. Pergamon Press. London.
- 7 - WAWERSIK, W. R. (1968) - *Detailed Analysis of Rock Failure in Laboratory Compression Tests*. Ph. D. Thesis. University of Minnesota. Minneapolis.
- 8 - RUMMEL, F. and FAIRHURST, C. (1970) - *Determination of the Post-Failure Behavior of Brittle Rock using a Servo-Controlled Testing Machine*. Progress Report n.º 21. July 1970. Minneapolis.
- 9 - TURNER, P. W. and BARNARD, P. R. (1962) - *Stiff Constant Strain Rate Testing Machine*. Engineer, Vol. 214, Pp. 146-148.
- 10 - MELLO MENDES, F. (1968) - *Mecânica das Rochas*. Edição da Secção de Folhas da A.E.I.S.T. Lisboa.
- 11 - GAMA, C. D. (1970) - *Análise da Compressão Uniaxial de Provetes de Rocha pelo Método dos Elementos Finitos*. Técnica n.º 403, Pp. 143-156. Ed. A.E.I.S.T. Lisboa.
- 12 - BIENIAWSKI, Z. T. and VOGLER, U. W. (1970) - *Load-deformation Behavior of Coal After Failure*. Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics. Beograd.