

REFORÇO DE PILARES DE MÁRMORE POR EFEITO DE CINTAGEM

Costa e Silva , M. Matilde
CEGEO, IST, Lisboa, matilde.horta@ist.utl.pt

Resumo

Nos métodos de desmonte subterrâneo com abandono de pilares, quer os pilares se encontrem espaçados regularmente, quer se encontrem posicionados irregularmente no desmonte, são estas as estruturas responsáveis pela estabilidade dos trabalhos, ou seja pela segurança das explorações, daí que o seu dimensionamento adquira uma importância extraordinária no projecto de exploração subterrânea.

A possibilidade de efectuar algumas explorações de mármore em subterrâneo, levou a que se considerasse importante o estudo do comportamento mecânico destes materiais, que frequentemente se encontram atravessados por superfícies várias de fraqueza.

A grande dificuldade no dimensionamento dos pilares reside na determinação das resistências, efectivamente, elas são função não só da resistência do material rochoso que compõe o pilar mas também da distribuição das tensões nele instaladas, isto é, dependem da sua geometria. Esta, por sua vez, é condicionada pela necessidade de maximizar as taxas de extracção.

Neste contexto revela-se de extrema importância não só a determinação da resistência dos pilares, mas também o estudo de metodologias que permitam, de forma prática e económica o aumento destas resistências.

Com este trabalho de investigação laboratorial pretende-se contribuir para o esclarecimento e se possível para a quantificação aproximada do aumento da resistência dos pilares através de algumas metodologias que recorrem à sua cintagem com materiais de baixo valor económico (técnicas de entulhamento), ou providenciando esta acção de cintagem pelo recurso ao seu atirantamento ou pregagem.

Da observação dos resultados obtidos pode concluir-se que o entulhamento se afigura como uma metodologia capaz de aumentar o valor máximo da resistência à compressão uniaxial.

Relativamente às técnicas de pregagem e amarração parece ser esta última a que corresponde a uma maior mobilização das componentes de corte, e portanto a mais eficaz do ponto de vista da segurança.

1. Introdução

Nos métodos de desmonte subterrâneo com abandono de pilares, quer os pilares se encontrem espaçados regularmente, quer se encontrem posicionados irregularmente no desmonte, são estas as estruturas responsáveis pela estabilidade dos trabalhos, ou seja pela segurança das explorações, daí que o seu dimensionamento adquira uma importância extraordinária no projecto de exploração subterrânea.

A possibilidade de efectuar algumas explorações de mármore em subterrâneo, levou a que se considerasse importante o estudo do comportamento mecânico destes materiais, que frequentemente se encontram atravessados por superfícies várias de fraqueza.

A grande dificuldade no dimensionamento dos pilares reside na determinação das resistências, efectivamente, elas são função não só da resistência do material rochoso que compõe o pilar mas também da distribuição das tensões nele instaladas, isto é, dependem da sua geometria. Esta, por sua vez, é condicionada pela necessidade de maximizar as taxas de extracção.

Neste contexto revela-se de extrema importância não só a determinação da resistência dos pilares, mas também o estudo de metodologias que permitam, de forma prática e económica o aumento destas resistências.

Com este trabalho de investigação laboratorial pretende-se contribuir para o esclarecimento e se possível para a quantificação aproximada do aumento da resistência dos pilares através de algumas metodologias que recorrem à sua cintagem com materiais de baixo valor económico (técnicas de entulhamento), ou providenciando esta acção de cintagem pelo recurso ao seu atirantamento ou pregagem.

Se admitirmos que os pilares se comportam como sólidos compartimentados, em relação a eles interessam principalmente, as respectivas resistências residuais. Tais resistências serão em larga medida, as provenientes da mobilização da resistência ao deslizamento das superfícies de compartimentação entre blocos e das oposições que se oferecem ao basculamento de uns blocos em relação a outros.

Compreende-se assim, o efeito altamente positivo, que para o estabelecimento das condições finais da estabilidade global do maciço, possam ter as acções de cintagem que fundamentalmente se traduzem em confinamentos laterais dos pilares, contrariando a respectiva desarticulação.

2. Mecanismos da rotura de pilares

2.1. Considerações gerais

Na realidade, um pilar de mina raras vezes pode ser tomado como um elemento estrutural isolado das zonas vizinhas do maciço rochoso que o carregam. Sendo assim os esforços transmitidos pelo pilar, provenientes das zonas do maciço que, para efeitos dessa transmissão de esforços, são dele tributárias, distribuem-se sempre, nas diversas secções do pilar de modo não uniforme, como se mostra na Fig.1, que traduz o caso geral da distribuição das trajectórias das tensões numa secção axial de um pilar.

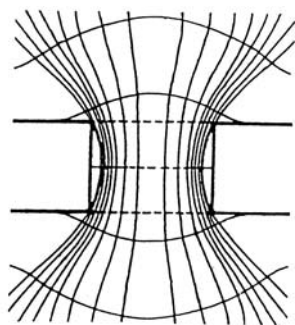


Figura 1: Trajectórias das tensões numa secção axial de um pilar (Mello Mendes, 1985).

Como é sabido, a abertura de um vazio, no interior do qual se abandona um pilar origina uma redistribuição das tensões previamente instaladas, segundo a direcção do eixo do pilar.

Conforme referido por Costa e Silva (1995) e detalhadamente descrito por Mello Mendes (1985), pode considerar-se numa primeira análise, que tal redistribuição dá lugar à instalação de máximos de tensão sobre as faces do pilar, correspondendo a carga que sobre este actua à tensão pré-existente mais a referente à área tributária dos esforços que devido à abertura do vazio, deixaram de poder ser transmitidos através deste (Fig.2).

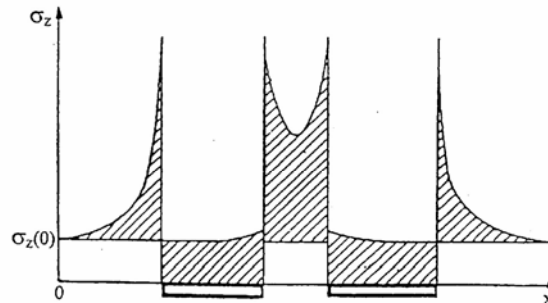


Figura 2: Carga que actua sobre um pilar (Mello Mendes, 1985).

Serão estes máximos de tensão que tenderão a provocar a rotura do pilar a partir das respectivas faces, conferindo-lhe a conhecida configuração de haltere. Esta fracturação enfraquecendo as faces do pilar e diminuindo ali a capacidade para suportar carga tende no entanto a deslocar os máximos de tensão para o interior do pilar.

O deslocamento dos máximos de tensão pode manter nas secções rectas axiais do pilar, consoante a dimensão deste, e a importância de tais máximos, os dois máximos de tensão distintos, ou então dar lugar, por fusão deles, a um único máximo de tensão no eixo do pilar (Fig.3).

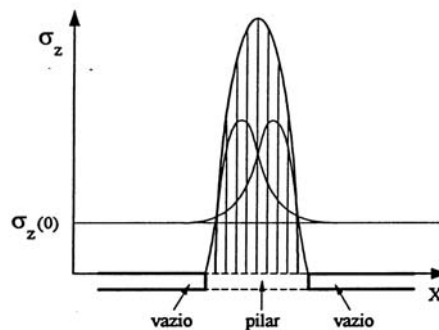


Figura 3: Máximo de tensão situado no eixo de um pilar (Mello Mendes, 1985).

Sob o aspecto da segurança, estas duas situações são completamente distintas, uma vez que a última, pelo menos teoricamente, poderá eventualmente dar origem a roturas que afectam todo o pilar, destruindo-o de uma só vez, ao passo que a primeira, se conduzir a roturas, não afectará obrigatoriamente todo o pilar, sendo susceptível de um eventual domínio do fenómeno.

Agapito (1986) admitiu que, durante o processo de rotura, os pilares podiam considerar-se constituídos por duas zonas: uma exterior, onde os fenómenos de rotura têm primeiro lugar, e outra central, dando origem à existência de um núcleo central mais ou menos são, o qual se encontraria sujeito a um estado de compressão "triaxial", devido ao confinamento produzido pelo material circundante já fracturado.

Para além da não uniformidade da distribuição de tensões a que se tem vindo a aludir, é também importante não esquecer a própria anelasticidade do material rochoso. Todavia, a dificuldade na caracterização desta, uma vez que pressupõe a realização de sofisticados e até dispendiosos ensaios de fluência, levou Dinis da Gama (1973) a afirmar que para o correcto dimensionamento de pilares se deve admitir que a resistência destes diminui com o tempo.

Como se referiu já anteriormente, a resistência dos pilares de mina é ainda claramente influenciada, como seria de esperar, pelo valor das tensões pré-existentes no terreno nas direcções perpendiculares às dos seus eixos, pela natureza dos contactos com os maciços em que estão integrados (descontinuidades), pelo estado de alteração do maciço rochoso e ainda pela presença ou ausência de água (Sheorey,1993).

2.2. Efeito da Geometria na Resistência dos Pilares

Com o objectivo de aprofundar os conhecimentos acerca do efeito da geometria na resistência dos pilares realizou-se um conjunto de ensaios laboratoriais que permitiram, numa primeira aproximação, estudar a variação da resistência à compressão uniaxial (obtida laboratorialmente) com o efeito da esbelteza (relação altura/aresta do provete) e com a dimensão da sua aresta. Observaram-se as tendências que se mostram na Fig.4.

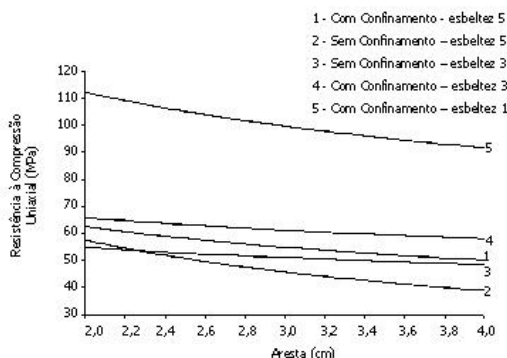


Figura 4: Variação da resistência à compressão uniaxial com a geometria de modelos de pilar ensaiados laboratorialmente.

Na experimentação efectuada não foi esquecido que nos ensaios laboratoriais não se encontram representadas as descontinuidades presentes nos maciços rochosos e por isso esta investigação laboratorial deverá ser tomada como um contributo qualitativo para a caracterização destas variações. Não obstante esta enorme dificuldade, parece oportuno notar que há coincidência dos andamentos observados na variação da resistência à compressão uniaxial com a geometria dos provetes ensaiados, com aquelas variações obtidas por autores sobejamente conhecidos na Mecânica das Rochas dos quais se citam a título de exemplo, os estudos de Bieniawski que realizou ensaios in situ sobre provetes cúbicos de carvão para analisar a variação de resistência à compressão com a aresta dos provetes e os de Salamon que mostrou claramente que a resistência à compressão uniaxial era grandemente influenciada pela esbelteza, decrescendo com o aumento desta.

Na grande maioria dos estudos dedicados à influência da esbelteza na resistência dos pilares, raras vezes foi tido em conta o comportamento de pilares com esbeltezes elevadas (>2), por isso é escassa a referência à eventual influência de fenómenos de encurvadura, característicos no comportamento de peças esbeltas submetidas à compressão uniaxial. Julga-se por isso interessante referir que estas fenomenologias estão aparentemente presentes pelo menos para esbeltezes iguais a 5, como se pode observar na Fig.5, que se reporta a um dos provetes sujeitos a ensaio para esta investigação.



Figura 5: Foto de um provete de esbelteza 5 mostrando fenómenos de encurvadura.

3. As acções de cintagem na resistência dos pilares

Da observação corrente de pilares de mina e da descrição dos mecanismos de rotura feita em 2. pode admitir-se que a rotura de pilares não afecta normalmente todo o pilar, verificando-se antes uma ruína relativamente controlada nestes.

Agapito, na sequência da observação de pilares de mina instrumentados refere que na proximidade do começo da rotura se verifica um aumento das tensões verticais e horizontais na zona central dos pilares, diminuindo estas últimas para a periferia, onde se tornam negativas (de tracção), originando fracturação vertical. Observou ainda o acréscimo das tensões verticais ao longo do tempo, observando diminuições da capacidade de carga dos pilares em cerca de 35% apenas ao fim de 3,5 anos.

Pelo que, se atendermos aos estudos de Agapito, admitiremos que a resistência à compressão simples dependerá da acção de confinamento das zonas periféricas já fracturadas sob o núcleo são, tal como se de uma acção "triaxial" se tratasse. Do que ficou dito pode inferir-se da importância da zona fracturada em redor dos pilares.

Para a compreensão da interacção entre os pilares de mina e as acções de cintagem que sobre estes se desenvolvem, através do enchimento na vizinhança dos pilares, com materiais de baixo valor económico (estéreis), de acções de pregagem, simples amarração com cabos (atirantamento), tem algum interesse atentar no facto de a rotura por corte ter início na periferia do provete, onde a tensão radial é nula e por consequência, onde é maior a diferença entre as tensões principais instaladas, maior e menor. Alguns autores estudiosos deste assunto, como Waversik, notaram todavia que a introdução de uma pressão de confinamento transversal, mesmo que localizada, como é aquela que resulta apenas da sujeição por atrito dos topos dos provetes contra os pratos das prensas, contribui de modo importante para a estabilização da rotura. Demonstrou este autor que uma rocha que apresente uma rotura instável de tipo explosivo, pode apresentar um comportamento completamente distinto, isto é, apresentar-se com rotura estável perfeitamente controlada se o provete sobre o qual se efectua o ensaio, estiver sujeito a acções de confinamento significativas, como por exemplo, aquelas que se verificam nos topos dos provetes pouco esbeltos. O mesmo autor levou a cabo experiências sobre provetes de mármore do Tennessee, concluindo que mesmo para pressões de confinamento relativamente baixas, da ordem dos 3,5MPa, não se definiam fracturas longitudinais (ausência de splitting), e por isso não se produziam lascas, verificando ainda o aumento do ângulo de atrito interno, pelo que conclui que as acções de cintagem de pilares podem melhorar as curvas características da resistência total do pilar.

Coloca-se no entanto a questão de saber se as fenomenologias apresentadas em ensaios de laboratório serão as observadas em corpos de grandes dimensões como o são os pilares de mina, assim, a propósito da representatividade dos ensaios laboratoriais, acresce dizer que as preocupações relativamente ao impedimento da deformação lateral dos provetes, produzido pelos pratos das prensas, nos parecem desajustadas, pois a sujeição dos topos dos pilares é uma realidade, traduzindo-se na existência de estados de compressão nos planos normais aos respectivos eixos; estados de compressão estes provenientes da simples abertura dos trabalhos, que induzem elevadas concentrações de tensões normais nas direcções tangentes aos contornos desses vazios (Mello Mendes, 1985), ou porque estes estados já existiam no maciço virgem. No caso de pilares implantados em maciços estratificados, onde existem superfícies de descontinuidade nos contactos pilares/tecto, as sujeições, embora possam perder um pouco da sua importância, serão sempre condicionadas pelo elevado atrito nesses planos em consequência das elevadas tensões axiais actuantes nos pilares de mina. Refere ainda o estudo já citado de Agapito, que pelo facto de a resistência dos pilares ser sempre muito inferior à dos tectos que os suportam, o conjunto tecto/pilar se comporta de forma análoga a um prato de aço de uma prensa carregando um provete submetido a um ensaio de compressão uniaxial no laboratório.

A existência do atrito nos contactos provete/prato da prensa, ou como se acabou de dizer pilar/tecto, ajuda ainda a compreender o motivo pelo qual as tensões dentro dos provetes não são apenas axiais, de facto a tensão axial deixa de ser uma tensão principal; pelo que a distribuição de tensões fica condicionada à respectiva geometria do pilar, isto é, à medida que aumenta a altura do pilar uma maior porção do volume deste fica sujeito a um estado uniaxial de tensão (Brady & Brown, 1985). Assim parece ser razoável considerar que num pilar pouco esbelto, quando é alcançada a carga máxima por ele suportável, se comecem a manifestar roturas na sua periferia originando uma zona envolvente fracturada que confina o núcleo central ainda relativamente são e que por isso, continua a aguentar carga.

Esta hipótese explicativa da fenomenologia da rotura ajuda a perceber a razão pela qual pilares com larguras muito superiores às respectivas alturas se podem considerar “indestrutíveis”, levando alguns autores a admitir uma “reconsolidação” dos pilares de modo a que os respectivos módulos de deformabilidade se tornam aproximadamente iguais na fase pré e pós rotura. Gobbelaar (1970) refere que para os pilares pouco esbeltos a resistência não diminui significativamente com a rotura progressiva verificando-se a existência de pilares estáveis; ao contrário, para pilares relativamente esbeltos, a resistência média já diminui apreciavelmente à medida que a rotura progride para o centro do pilar.

Parece pois justificado o interesse da cintagem exterior, ou seja, da aplicação de pressões de confinamento adicionais seja por entulho, por pregagem ou amarração (Fig.6).

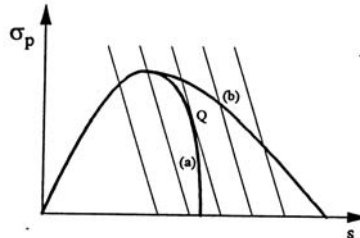


Figura 6: Comportamento na rotura de um pilar sem entulhamento (a) e com entulhamento (b) (Salamon & Oravec, 1976).

Das acções acima referidas salienta-se, todavia, que o entulhamento apresenta a importante vantagem ambiental de permitir ocultar no subsolo uma percentagem significativa dos materiais estéreis (de baixo valor económico) resultantes da exploração e que de outro modo agravariam os problemas de deposição superficial dos mesmos.

Com a cintagem pretende-se, em princípio contrariar a deformação transversal dos pilares num processo semelhante ao utilizado nos ensaios triaxiais de laboratório, nos quais se conseguem aumentar por vezes, de modo muito significativo os valores da tensão axial de rotura à custa da aplicação de pressões laterais ainda que relativamente baixas. Atendendo a esta finalidade o entulho lançado em torno dos pilares não necessita atacamento ao tecto, visto que não se destina a transmitir cargas entre o tecto e o piso sendo apenas necessário que rodeie o pilar até cerca de dois terços da sua altura, visto que as maiores deformações transversais, como é sabido, se verificam a meia altura.

A semelhança pretendida entre o comportamento dos pilares cintados com entulho e o comportamento de provetes ensaiados triaxialmente em laboratório é apenas aparente, há certamente, como temos vindo a pretender demonstrar, outros mecanismos que poderão justificar a melhoria do comportamento de pilares quando entulhados. Assim, efeitos semelhantes aos pretendidos com esta técnica podem esperar-se de outros processos tais como o atirantamento transversal dos pilares, este todavia sempre mais dispendioso e sem as vantagens ambientais adicionais do entulhamento.

Se admitirmos que os pilares se comportam como sólidos compartimentados, em relação a eles interessam principalmente muito mais do que se fossem sólidos contínuos, as respectivas resistências residuais, após terem suportado as cargas máximas possíveis. Tais resistências serão em larga medida, as provenientes da mobilização da resistência ao deslizamento das superfícies de compartimentação entre blocos e das oposições que se oferecem ao basculamento de uns blocos em relação a outros, ou seja, de um modo geral, as resultantes do impedimento maior ou menor que os pilares tiverem para se irem deformando transversalmente por efeito dominante da existência das suas descontinuidades, efeito esse a adicionar também, evidentemente, às encurvaduras que forem produzidas por excentricidades de carga. Compreende-se assim, o efeito altamente positivo, que para o estabelecimento das condições finais da estabilidade global do maciço, possam ter as acções de cintagem que fundamentalmente se traduzem em confinamentos laterais dos pilares, contrariando a respectiva desarticulação.

4. Experimentação laboratorial

4.1. Considerações gerais

Em face dos objectivos da investigação anteriormente expostos, executaram-se com recurso a modelos físicos ensaios de compressão uniaxial, pretendendo com estes estudar as variações da resistência máxima à compressão uniaxial com a geometria de provetes sujeitos a acções de cintagem produzidas pelo seu envolvimento com material granular, reproduzindo deste modo as acções de cintagem obtidas com as técnicas do entulhamento. A geometria adoptada para os provetes foi semelhante aquela que se prevê adoptar para os pilares na exploração subterrânea; assim, utilizaram-se secções quadradas de arestas variando entre 2, 3 e 4cm, com as respectivas alturas correspondendo a 3 e 5 vezes o valor da aresta, representando esbeltezes entre 3 e 5.

Realizaram-se também, de acordo com o que se referiu acerca da importância das resistências ao escorregamento entre blocos, quando se admitissem os pilares como sólidos compartimentados, ensaios de compressão uniaxial sobre provetes onde se induziu previamente uma superfície de corte. Determinaram-se assim as resistências ao deslizamento das superfícies de compartimentação entre blocos, quando estes se encontravam pregados ou amarrados por cabos, procedimentos esses a que chamamos de pregagem e amarração.

A escala geométrica adoptada quer para os provetes, quer para os dispositivos que se destinavam a simular as acções de cintagem, foi de 1/100, portanto dentro dos limites aconselhados (<1/500) por Rocha (1952). Assim, como oportunamente referimos, não constituirá incorrecção a extrapolação qualitativa dos resultados para os casos reais de dimensionamento de pilares de explorações subterrâneas.

4.2. Descrição da Experimentação

4.2.1. Cintagem por entulhamento

Como se referiu em 3. é apenas aparente a semelhança entre as acções de cintagem a desenvolver pelo entulho e as aplicadas no caso de provetes sujeitos a ensaios triaxiais. De facto, a acção de sustimento desenvolvida pelos entulhos é do tipo passivo, isto é, só é mobilizada a resistência máxima destes materiais granulares após se observarem a aplicação de apreciáveis valores de carga na direcção normal ao eixo do pilar, resultantes da deformação significativa deste. É sabido, que as grandes deformações nos pilares se verificam sobretudo a meia altura destes, pelo que não se justifica o envolvimento dos pilares ou provetes na totalidade, assim na prática mineira este enchimento é efectuado até cerca de 2/3 da altura, procedimento este também adoptado para a experimentação laboratorial.

Os provetes de secção quadrada e aresta 2, 3 e 4cm e alturas variando entre 3 a 5 vezes a respectiva aresta foram envolvidos por material granular de calibre médio igual a 0,25cm e 0,5cm, correspondendo na prática à utilização de blocos entre 0,50m e 0,25m de aresta consoante a dimensão da aresta a adoptar para o pilar.

A garantia de igualdade das condições de ensaio foi conseguida através da manutenção dos volumes de material granular usando para isso caixas com arestas dimensionadas para representar a área correspondente ao vão livre dos desmontes a entulhar; assim por exemplo, provetes de 4cm foram ensaiados em caixas de aresta igual a 16cm, mantendo-se esta relação para outras dimensões. Neste caso, simula-se um desmonte com pilares de 4m de aresta e vãos de 12m (Fig.7).

Ainda no sentido de garantir a igualdade das condições de ensaio, estabeleceu-se a colocação do material granular em 3 camadas, sendo cada uma das camadas previamente "compactada" após a sua colocação com cerca de 30 pancadas, este procedimento pretendeu simular a utilização de 3 rebaixos, situação que se verificará na prática, até que o pilar adquira a sua altura final; prevê-se naturalmente que será possível proceder no desmonte à passagem de qualquer equipamento de carga de fundo (pá carregadora) duas ou três vezes para proceder a uma ligeira compactação e assim melhorar as características de suporte deste material possuidor de um elevado índice de vazios.



Figura 7: Fotografia do conjunto de provetes e caixas de ensaio.

Efectuado este procedimento de rotina os provetes foram sujeitos a ensaio de compressão uniaxial a velocidade constante (0,5 MPa/s) numa prensa marca ELE. Registaram-se os resultados obtidos e observaram-se as superfícies de rotura geradas nos corpos de ensaio.

4.2.2. Cintagem por pregagem e amarração

A experimentação teve por objectivo avaliar qual das situações (pregagem ou amarração com cabos) se mostrava mais favorável do ponto de vista de resistência ao escorregamento, verificando a influência do número de dispositivos colocados (1, 2 ou 3 cabos ou pregos) em provetes geometricamente sempre iguais. Nos provetes foi criada uma superfície de corte fazendo um ângulo de $45-\phi/2$ com a direcção da aplicação da força (direcção da tensão principal máxima) de acordo com o Critério de rotura de Mohr-Coulomb. Admitiu-se o valor médio de ângulo de atrito (ϕ) de 48° , valor este determinado laboratorialmente; assim, a superfície de corte apresentava-se fazendo um ângulo de 21° com a direcção de aplicação da carga.

Os provetes com 4cm de aresta e 12cm de altura foram ensaiados à compressão uniaxial, a velocidade de carga constante (0,5MPa/s), após a amarração dos blocos por varão de aço com diâmetro de 0,5mm ou a sua pregagem com varão de iguais características. A pregagem obrigou à execução de 3 furos perpendiculares à superfície de corte onde se introduziram posteriormente os pregos constituídos por troços de varão de aço traccionado, utilizando para tal um sistema de torniquete (Fig.8). Relativamente à amarração, procedimento mais fácil, foi necessário apenas a soldadura do varão após a sua colocação garantindo-se assim o seu traccionamento (Fig.9).



Figura 8: Montagem final para ensaio de pregagem.



Figura 9: Montagem final para ensaio de amarração.

4.3. Resultados Obtidos

4.3.1. Caso do entulhamento

Os valores médios obtidos para a resistência à compressão uniaxial encontram-se na Tabela 1. A numeração atribuída às amostras representa a dimensão da aresta (1º dígito) e o valor da esbelteza da amostra (2º dígito).

Tabela 1 Resultados obtidos com cintagem por entulhamento.

| Amostras | $\sigma_{\text{médio}}$ sem confinamento (MPa) | $\sigma_{\text{médio}}$ com confinamento (MPa) |
|----------|--|--|
| 45 | 35,96 | 45,89 |
| 35 | 52,43 | 64,18 |
| 25 | 55,58 | 59,67 |
| 43 | 54,53 | 63,60 |
| 33 | 43,96 | 53,18 |
| 23 | 59,83 | 70,25 |

Da observação da Tabela 1 e da Fig.4 pode concluir-se que a acção da cintagem provocada pelo envolvimento dos pilares com material granular produziu um acréscimo com algum significado, da ordem dos 20%, na resistência máxima obtida à compressão simples para todas as geometrias ensaiadas à excepção dos provetes de aresta mais reduzida (=2cm) e esbelteza 5 onde possivelmente predominam na rotura, outros fenómenos. Não parece haver nestes casos o desenvolvimento apreciável de zonas periféricas francamente fracturadas que rodeariam os núcleos sãos, que eventualmente viriam a ser "protegidos" das roturas violentas pelo efeito da cintagem providenciado pelo entulho.

4.3.2. Caso das cintagens por pregagem e amarração

Registaram-se os valores da carga máxima aplicada na direcção do eixo do provete para os quais se verificava o deslizamento franco entre blocos. Estes valores foram decompostos de modo a determinar os valores da tensão normal e de corte no plano de corte. Julgou-se conveniente para determinar a influência do número de dispositivos aplicados, determinar um valor "unitário", isto é, um valor por dispositivo aplicado (na tabela 2 designado por /prego). No que respeita, à amarração, utilizou-se a mesma metodologia de análise e cálculo.

Os resultados obtidos para as tensões observadas no plano de corte para cada uma das situações de ensaio, encontram-se sintetizados nas Tabelas 2 e 3. Na Fig.10 podem ser vistos os Círculos de Mohr correspondentes aos estados de tensão obtidos para cada dispositivo.

Tabela 2. Resultados obtidos com pregagens

| Tipo de Ensaio | σ_{axial} (MPa) | σ (MPa) | τ (MPa) | σ (MPa)/Prego | τ (MPa)/Prego |
|--------------------------|-------------------------------|----------------|--------------|----------------------|--------------------|
| Sem Qualquer Dispositivo | 0,19 | 0,068 | 0,175 | ----- - | ----- -- |
| Com 1 Prego | 0,47 | 0,168 | 0,438 | 0,168 | 0,438 |
| Com 2 Pregos | 0,61 | 0,218 | 0,569 | 0,109 | 0,284 |
| Com 3 Pregos | 0,88 | 0,315 | 0,821 | 0,105 | 0,273 |

Tabela 3. Resultados obtidos com amarração

| Tipo de Ensaio | σ_{axial} (MPa) | σ (MPa) | τ (MPa) | σ (MPa)/Cabo | τ (MPa)/Cabo |
|--------------------------|-------------------------------|----------------|--------------|---------------------|-------------------|
| Sem Qualquer Dispositivo | 0,19 | 0,068 | 0,175 | ----- | ----- |
| Com 1 Cabo | 1,03 | 0,369 | 0,961 | 0,369 | 0,961 |
| Com 2 Cabos | 1,10 | 0,394 | 1,03 | 0,197 | 0,515 |
| Com 3 Cabos | 1,17 | 0,419 | 1,09 | 0,139 | 0,364 |

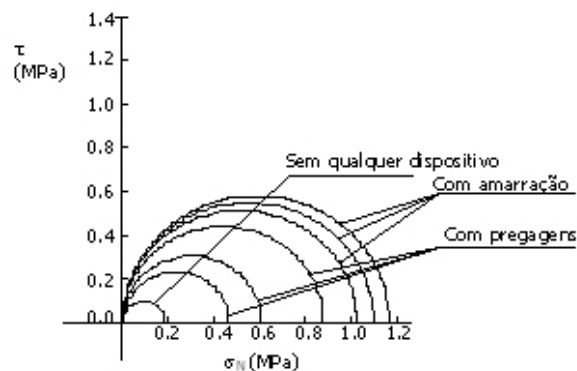


Figura 10: Representação dos estados de tensão obtidos para cada dispositivo de ensaio.

4. Conclusões

Da observação dos resultados obtidos pode concluir-se que o entulhamento se afigura como uma metodologia capaz de aumentar o valor máximo da resistência à compressão uniaxial em cerca de 20%.

Das técnicas de pregagem e amarração parece ser esta última a que corresponde a uma maior mobilização das componentes de corte talvez porque a acção de cintagem influencia as duas componentes: normal e tangente no plano de corte, enquanto que a pregagem mobiliza apenas a componente normal da tensão no plano de corte.

Relativamente ao número de dispositivos parece não haver melhorias assinaláveis entre a colocação de 2 ou 3 pregos embora para a amarração esta conclusão não permaneça completamente válida, pois que se para a componente normal esta conclusão se mantém como verdadeira já para a componente tangencial se pode observar uma melhoria significativa da ordem dos 29%.

Referências bibliográficas

- Agapito, J.F.T.(1986) "Pillar Stability in Large Underground Openings: Applications from a Case Study in Competent, Jointed Rock". *Quartely* vol.81, nº3. Colorado School of Mines. Colorado.
- Brady, B.H.G. & Brown, E.T. (1985) "Rock Mechanics for Underground Mining". George Allen & UNWIN. London.
- Costa e Silva, M.M.H. (1995) "Entulhamento com Rejeitados para a Melhoria do Comportamento de Pilares Esteios". Tese para obtenção do grau de Doutor. IST. Lisboa.
- Dinis da Gama, C. (1973) "Influência da Anelasticidade de Rochas nas Explorações Mineiras". *Boletim* N°24. Serviços de Geologia e Minas. Luanda.
- Grobbelar, C. (1970) "The Theoretical Strenght of Mine Pillars". *Proceedings of the 2nd Congress ISRM*. Vol.II Theme 3-4. Beograd.
- Mello Mendes, F. (1985) "Geomecânica Aplicada à Exploração Mineira Subterrânea. IST.
- Rocha, M. (1952) "Dimensionamento Experimental de Estruturas. Publicação N°21. LNEC. Lisboa.
- Salamon & Oravcz (1976) "Rock Mechanics in Coal Mining. Chamber of Mines of South Africa.
- Sheorey, P.R. (1993). "Design of Coal Pillar Arrays and Chain Pillars. *Comprehensive Rock Engineering Principles, Practice and Projects*. Vol.2." Pergamon.