

565
03
12
04

1º SIMPÓSIO BRASILEIRO
DE
JOVENS GEOTÉCNICOS

GEO-JOVEM 2004

23 e 24
agosto de 2004

São Carlos, SP

1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS

Comissão Organizadora:

Edmundo Rogério Esquivel
Gene Stancati
João Baptista Nogueira
Lázaro Valentim Zuquette
Nelson Aoki

Realização:



Escola de Engenharia de
São Carlos

USP
UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

AB
MIS

Patrocínio:


CENTROVIAS

PERFIS
GERDAU ACOMINAS

 **BANCO DO BRASIL**

Verthz
fundação especial

MACCAFERRI
AMÉRICA LATINA

 **EG Barreto**
Geometria e Fundações

Apoio:

 **IGS**
Brasil

BGE

2004



Departamento de Geotecnia
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo



Associação Brasileira de Mecânica dos Solos
e Engenharia Geotécnica

GEO-JOVEM 2004

1º Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos

Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo
São Carlos, 23 a 24 de agosto de 2004

Editado por:

Edmundo Rogério Esquivel
Gene Stancati
João Baptista Nogueira

Propagação de fraturas em maciços rochosos com juntas não persistentes

Gaitán, V.H.O. G144p
Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, vhgaitan@sc.usp.br

Bortolucci, A.A.
Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, bortoluc@sc.usp.br

Resumo: Neste trabalho apresenta-se uma compilação dos diversos métodos publicados para o estudo do comportamento de maciços rochosos com juntas não persistentes. Estes estudos podem ser divididos em dois grupos: o primeiro, tem um enfoque global, ou seja, estuda o comportamento do conjunto juntas-macício quando submetido a distintos estados de tensões; o segundo grupo, estuda propriamente o fenômeno da propagação da fratura entre as juntas denominado coalescência. O estudo de ambos os grupos é realizado tanto em ambientes virtuais, mediante modelos matemáticos, como experimentalmente com o uso de corpos de prova feitos de materiais cimentantes.

Abstract: In this paper a resume of different methods used for the study of rock mass behavior with non-persistent joints is presented. These studies are divided in two groups: the first one, has a global approach, that is, the behavior of the set joint-rock mass is studied when submitted to different state of stresses; the second group, properly studies the phenomenon of fracture propagation between joints called coalescence. The study of both groups is also made in mathematical virtual models, as in tests on cementitious materials specimens.

1 INTRODUÇÃO

Define-se junta como qualquer superfície de foliação, xistosidade, acamamento, fraturas, juntas-falhas dentro do maciço rochoso. Podem ser *persistentes*, quando atravessam todo o maciço e fazendo deste uma interação de blocos (Figura 1.a). Ou *não persistentes*, quando têm comprimentos finitos dentro do maciço (Figura 1.b).

Os estudos sobre o comportamento dos maciços rochosos, quando apresentam juntas descontinuas ou não persistentes, podem ser divididos em dois grupos: a) estudo da curva tensão-deformação do corpo de prova sem importar a maneira em que as fraturas se propagam. A este tipo de pesquisa chamaremos de global. b) análise da propagação e coalescência das fraturas entre as juntas de um maciço quando é submetido a carregamentos. Esta abordagem será denotada como "localizada".

Os estudos sobre juntas não persistentes, tanto os globais como os locais, realizam-se mediante métodos computacionais e métodos diretos. Nos métodos computacionais, simulam-se os corpos de provas mediante modelagem numérica, como os métodos de elementos finitos, elementos de contorno, elementos distintos, etc. No caso dos métodos diretos, usualmente utilizam-se materiais

que consigam simular o comportamento frágil da rocha e que, ao mesmo tempo, possam ser reproduzidos em condições de laboratório. Alguns exemplos destes materiais são: argamassa, gesso, mármore, concreto e alguns tipos de resinas.

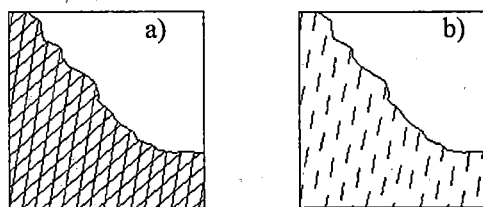


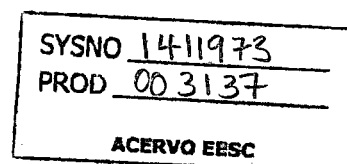
Figura 1: Modelos conceituais de maciços rochosos. a) com juntas persistentes. b) juntas não persistentes.

2 JUNTAS NÃO PERSISTENTES, ESTUDO GLOBAL.

2.1 Métodos computacionais

Kaneko & Shiba (1990), propuseram um Modelo de Defeito Volumétrico Equivalente (Equivalent Volume Defect Model, EVD), para analisar o comportamento em deformação dos maciços rochosos. Assim, o EVD representa o efeito das

1411973
071204



juntas descontínuas dentro do maciço. Usando este conceito, a relação tensão/deformação pode ser simplesmente formulada e tratada dentro do âmbito da mecânica do contínuo. Para a determinação do EVD, assumiram; *primeiro*, que o EVD_j de cada junta é determinado de maneira independente e a sua forma corresponde a um prato elíptico. *Segundo*, que o EVD_i de todas as juntas é expresso como a união de todos os EVD_j, isto significa que a interação mecânica deve ser tratada como a interação geométrica entre as juntas (Figura. 2). Desta maneira, obtiveram a Equação 1:

$$e = \frac{V}{V - V_d} \cdot r \cdot s \quad (1)$$

onde: e = deformação média do corpo.

V = volume total do corpo.

V_d = volume de defeitos produzido por juntas ou fendas.

r = constante elástica intrínseca do corpo intacto.

s = tensor médio de tensões.

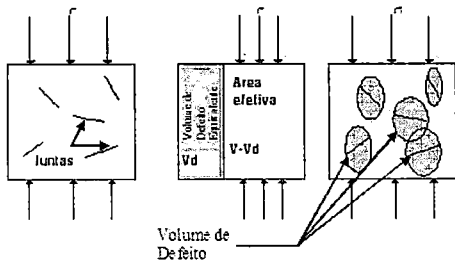


Figura 2: Modelo de defeito volumétrico equivalente, Kaneko & Shiba (1990).

Swoboda *et al* (1990) analisaram o efeito das juntas descontínuas dentro dos maciços rochosos, através de métodos da mecânica do dano. Eles concluíram, que as juntas devem ser tomadas como propriedade do material, e por esta condição, a deformação produzida pelas juntas pode ser tomada como um componente geométrico, que simplesmente, deve ser adicionado à deformação total (Figura 3). Assim, a deformação pode ser descrita pela Equação 2:

$$\varepsilon = \varepsilon_g^d + \varepsilon^e \quad (2)$$

onde: ε = deformação total

ε^e = deformação da rocha sã

$\varepsilon_g^d = \varepsilon_1^d + \varepsilon_2^d$, sendo ε_1^d a deformação produzida pelas juntas verticais, e ε_2^d a deformação produzida pelas juntas inclinadas.

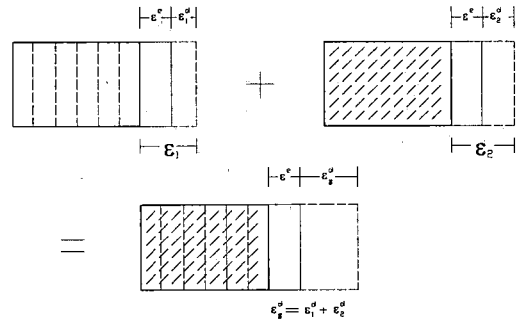


Figura 3: Deformação de dano adicional, Swoboda *et al.* (1990)

Wu & Wang (2001), analisando a energia de deformação atuante no corpo (U), determinaram que esta podia ser dividida em duas partes (Figura 4): energia de deformação da rocha sã (U_0) e energia de deformação das juntas (U_c). Conseqüentemente, baseado neste princípio obtiveram um módulo elástico equivalente, definido na Equação 3:

$$E_m = \frac{E}{1 + \frac{32(1-\nu^2)}{\pi(2-\nu)} \sum_{i=1}^m \lambda \bar{a} h^2 (1-n^2) n^2} \quad (3)$$

onde: E = módulo de elasticidade da rocha sã.

ν = Coeficiente de Poisson.

λ = norma estatística de densidade volumétrica das discontinuidades.

\bar{a} = média estatística do raio das discontinuidades.

h = τ da rocha sã / τ da junta (τ_{rs}/τ_j).

m = número de famílias de juntas.

n = variável de anisotropia, dependente da orientação das juntas.

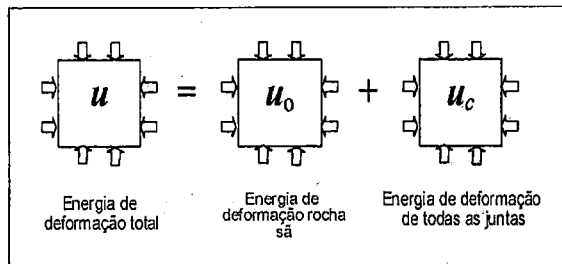


Figura 4: Derivação do Módulo de Young equivalente.

2.2 Métodos Diretos

Jamil (1992) realizou ensaios biaxiais em modelos de argamassa (Figura 5) onde estudou a resistência das amostras e os modos de ruptura para juntas fechadas persistentes e não persistentes. Neste

trabalho conseguiu analisar o movimento de pontos marcados na face exposta do corpo de prova, mediante um mecanismo de vídeo e processamento digital de imagens (Applied Intelligent System). Desta forma, foram verificados os padrões de movimento antes e após a ruptura ser atingida.

As juntas persistentes e não persistentes foram modeladas tendo uma inclinação β com relação ao esforço maior (σ_1), com os seguintes valores: 22,5°, 45°, 67,5° e 80°. O comprimento de junta (L_j): 101,6 e 203,2 mm; o comprimento da ponte de rocha (L_r): 25,4 e 50,8 mm; a distância entre as filas de juntas (d) foi mantida entre 50,8 e 101,6 mm, dependendo do teste; as tensões confinantes (σ_3) foram de: 0, 0,7 e 1,4 MPa e o grau de persistência (K , ver Equação 4) foi de 0,8 e 0,667.

$$K = \frac{L_j}{L_j + L_r} \quad (4)$$

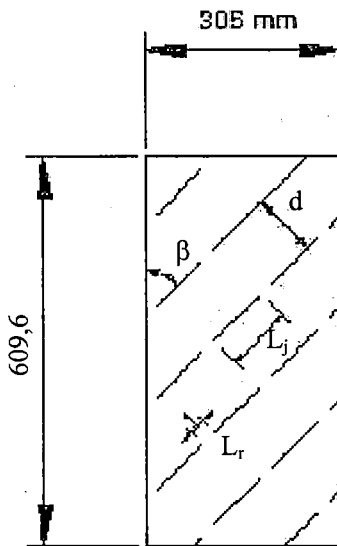


Figura 5: Geometria dos corpos de prova, Jamil (1992)

Foram verificados 4 modos de ruptura nos corpos de prova com juntas não persistentes lisas: 1) deslizamento ao longo da junta, cisalhando através do material intacto de rocha; 2) modo escalonado, deslizamento ao longo da junta e ruptura de tração na ponte da rocha sã; 3) modo multi-escalonado, ruptura por tração na ponte de rocha sã, escalonamento entre as juntas sem deslizamento da junta, ruptura desenvolvida numa zona. 4) cisalhamento através do material intacto de rocha, cruzando as juntas.

Em relação à inclinação β concluiu-se que, Para as juntas com $\beta = 22,5^\circ$, o tipo de ruptura dominante foi o modo 1. A persistência (K) e a tensão de confinamento (σ_2), não têm influência significativa sobre o modo de ruptura para esta inclinação.

Nas juntas com $\beta=45^\circ$, o grau de persistência (K) tem um alta influência, tanto no modo de ruptura

como na resistência. Com $K=0,667$ e sem confinamento, a ruptura ocorre no modo 2. Já com confinamento a ruptura é de modo 1. Com $K=0,8$ a ruptura ocorre no modo 1, tanto confinada como sem confinamento.

Com as juntas $\beta=67,5^\circ$, a ruptura ocorre no modo 2, sem depender de K e do estado de confinamento. A resistência do modelo pode ser descrito pela Equação (5):

$$\sigma_{1f} = \frac{q_t + c_j \frac{L_j}{d} + \sigma_3 \cot \beta (\tan \phi_j + \tan \beta) \left[\left(\frac{L_j}{d} \tan \beta - 1 \right) \cos^2 \beta + 1 \right]}{\cos^2 \beta (1 - \tan \beta \tan \phi_j) \left(\frac{L_j}{d} \tan \beta - 1 \right)} \quad (5)$$

onde: σ_{1f} = tensão principal maior de ruptura

q_t = esforço de tração.

$\tau_j = c_j + \sigma_n \tan \phi_j$ = resistência da junta.

$c_j = 0,08 q_t$

$\phi_j = 17,5^\circ$

Em juntas com $\beta=80^\circ$ e com $d = 2''$, o modo 3 de ruptura é dominante e pequenos acréscimos no confinamento provocaram significantes aumentos na resistência. Com $d = 4''$, as juntas não controlam o modo de ruptura (modo 4), já que este é comparável com os resultados obtidos em amostras intactas.

Aguiar (1998) ensaiou modelos de juntas não-persistentes em corpos de argamassa, similares aos modelos de Jamil (1992).

Concluiu que quando $\beta < 60^\circ$ e com espaçamento entre as juntas (d) de 50 mm, verifica-se ruptura tipo escalonada e a variação de persistência em nada influenciou na ocorrência deste tipo de ruptura.

Conclui também que a ruptura ao longo da ponte rochosa entre as juntas ocorreu nas amostras com β entre os 30° e 60°. Em juntas com $\beta=30^\circ$, o cisalhamento que se iniciou nas discontinuidades seguiu pela ponte rochosa na direção do plano de fraturamento ocorrendo em vários planos indistintamente.

Quanto ao espaçamento, foi verificada sua influência tanto no modo de ruptura quanto na resistência. A persistência da descontinuidade é decisiva na resistência do maciço sob qualquer configuração. A maior influência nos valores de resistência foi verificada para as amostras com $\beta=60^\circ$.

Wong *et al.* (2002,a) investigaram as deformações lentas e os mecanismos de ruptura que ocorrem no contorno de uma abertura circular, num maciço rochoso que apresenta juntas lisas não persistentes. Os corpos de prova (100 x 100 x 25 mm) empregados foram modelados usando uma mistura de barita, areia, gesso e água, com dosagem de 2:4:1:1,5 respectivamente. Tendo as juntas uma inclinação $\beta = 45^\circ$; $L_j = 10,0$ mm; $L_r = 10,0$ mm; $d = 8,66$ mm, e o diâmetro do furo: 20 mm (ver Figura 6).

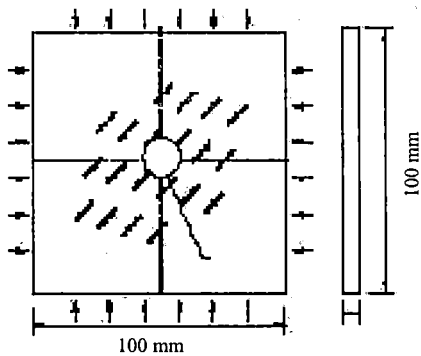


Figura 6: Geometria do corpo de prova, Wong *et al* (2002,a)

Os autores definiram λ como a relação entre as tensões principais (σ_3/σ_1) e observaram que se $\lambda < 1/3$, a tração será o modo dominante de ruptura. Para $\lambda > 1/2$, acontece ruptura por cisalhamento ou tração com cisalhamento. Concluíram também que, a propagação das fraturas inicia-se próximo ao 50 – 70% do valor de σ_{1max} . Além disso, depois da escavação, quando o valor de $\sigma_1/\sigma_{1max} > 65\%$ ocorre uma propagação rápida das fraturas. Quando $\sigma_1/\sigma_{1max} \leq 45\%$, apenas poucas fraturas iniciam, e como resultado o furo permanece estável.

3 JUNTAS NÃO PERSISTENTES: ESTUDO LOCALIZADO.

3.1 Métodos Computacionais

Shen & Stephansson (1990) estudaram o comportamento de juntas não persistentes mediante o método de deslocamentos descontínuos (DDM) simulando a propagação da fratura em juntas não persistentes. Nos ensaios virtuais, sempre acontecia uma propagação da fratura em forma escalonada entre as juntas. Concluíram que, em valores de tensão muito menores que aqueles em que se atinge a resistência máxima da rocha, inicia-se e propaga-se a fratura, conseqüentemente esta seria a razão pela qual os maciços rochosos com juntas não persistentes, apresentam um comportamento de esforço/deformação altamente não linear.

Scavia & Castelli (1996) estudaram o comportamento das pontes de rocha em juntas descontínuas mediante o método de deslocamentos descontínuos (DDM) baseados na suposição que a rocha sã é um material elástico linear, e que as juntas são não lineares. Fazendo uso de um programa chamado BEMCON e do método DDM, idealizaram um corpo de prova como o representado na Figura 7. Assim, compararam o valor de σ_0 (tensão de início das fraturas) com o valor de σ_1 (tensão de resistência máxima do corpo de prova

com juntas). Com esta análise, concluíram que para baixos valores de “s” (medida da sobreposição das juntas), a propagação da fratura aconteceu de forma instável, mas, com incrementos de “s” torna-se estável. Por outro lado, quando se aumenta a relação “ d/L_j ” aumenta-se o valor de σ_c e σ_0 .

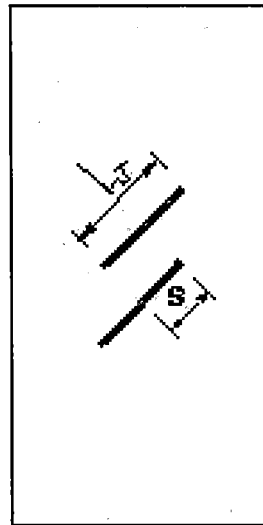


Figura 7: Configuração dos corpos virtuais, Scavia & Castelli (1996)

Wong *et al* (2002, b) investigaram numericamente a propagação de fraturas em corpos de prova carregados uniaxialmente usando o programa computacional Rock Failure Process Analysis (RFPA^{2D}). A análise foi feita em modelos matemáticos de corpos de prova com uma, três e múltiplas juntas, sendo estas últimas localizadas aleatoriamente no corpo (Figura 8).

O programa RFPA^{2D} é um modelo de dano elástico progressivo que pode ser usado para simular a deformação, distribuição de tensões e as rupturas induzidas pela redistribuição das tensões, assim como pela iniciação da fratura e propagação da mesma em materiais heterogêneos.

No caso das famílias de juntas eles concluíram que, o comprimento e localização da junta são fatores importantes. Quanto maior o comprimento da junta e maior a proximidade com a fronteira livre, maior será a facilidade com que a fratura se propaga.

A redistribuição das tensões é o fator mais importante na iniciação e na propagação de fraturas em modelos com múltiplas juntas: Em corpos de prova com juntas inclinadas a fratura propaga-se mais facilmente que quando as juntas estão paralelas ou perpendiculares a direção da tensão maior.



Figura 8: Corpo de prova com três juntas, gerado com o programa RFPA^{2D}

3.2 Métodos Diretos

Shen (1995) estudou o mecanismo de união de fraturas, comparando os dados obtidos de ensaios uniaxiais com os obtidos mediante análises numéricas (critério G modificado e DDM).

Nos ensaios de laboratório usou corpos de prova de 152mm x 76mm x 30 mm. Modelados em gesso e apresentando duas juntas de comprimento limitado (Figura 9), as quais foram criadas durante a cura do corpo, tendo um comprimento de 12,7mm e separadas de 12,7 mm. Foram usados dois tipos de junta, as abertas, geradas colocando as folhas de aço de 0,04mm e retiradas depois da cura do molde. As fechadas elaboradas com lâminas de polietileno de 10 μ m retiradas durante a cura do gesso.

Para estudar o efeito da distância entre as juntas ou da ponte de rocha entre elas e da inclinação das juntas, variou-se a inclinação do ângulo da ponte (α) desde 45° até 120° e do ângulo das juntas (β) desde 30° até 60° ambos com aumentos de 15°. Conclui-se que a união das juntas ocorreu em quase todas as configurações de inclinações das pontes e das juntas, com exceção das juntas com $\beta=60^\circ$.

A coalescência das fraturas pode ser causada por diferentes modos de ruptura, e que esta depende altamente da orientação da ponte de rocha (α). Foram identificados três tipos característicos de união (Tabela 1)

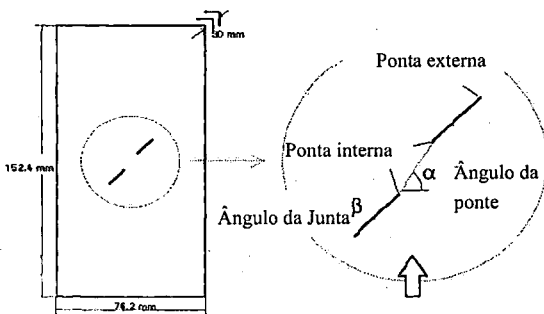


Figura 9: Configuração corpos de prova, Shen (1995)

Tabela 1 – Relação do ângulo α com o modo de ruptura

β	Modo de falha	Descrição
45° - 60°	Cisalhamento	Coalescência escalonada. Superfície de ruptura rugosa contendo material pulverizado.
75° - 90°	Tração + cisalhamento	Coalescência escalonada. Superfície de ruptura, no centro cisalhada, e próxima as pontas da junta a superfície encontrou-se rugosa.
105° - 120°	Tração	Superfície de ruptura encontrou-se cisalhada.

Wong & Chau (1998) fizeram um estudo detalhado sobre a união de fraturas em corpos de prova contendo duas juntas descontínuas. Os corpos de prova foram modelados com uma mistura de pó de barita, areia uniforme, gesso e água. Além disto, as dimensões dos corpos de prova atenderam ao teorema π , assegurando desta forma manter as propriedades, fragilidade e dilatância do material quando este fosse submetido a compressão uniaxial ($\Delta\sigma_n=0,002$ KN/seg; tempo normal do ensaio 20 - 25 min).

O tamanho dos corpos de prova, cumprindo com o teorema, tomou-se de 60mm x 120mm x 25mm. Variou-se β desde 5° até 55° e α de 45° até 120°, ambos em acréscimos de 15°; o comprimento das juntas (L_j) e a distâncias entre juntas (d) foram de 12 mm e 20mm respectivamente para todos os ensaios. Para fazer as juntas, inseriram-se lâminas finas de aço com diferentes rugosidades que alteraram o coeficiente de atrito (μ), de 0,6; 0,7 e 0,9.

Posteriormente aos ensaios, observou-se que 60% das fraturas iniciaram-se nas pontas internas das juntas (Figura 10), 20% começaram nas pontas externas e os restantes 20% iniciaram-se nas duas pontas simultaneamente.

Concluíram que, a coalescência da fratura ocorria em três tipos característicos (Figura 10), designados como:

-Modo S quando só ocorre cisalhamento, unindo as juntas preexistentes. - Modo M, chamado como modo misto, cisalhamento/tração, dividido em duas partes: a) modo M I onde as fraturas de tração aparecem nas pontas internas das juntas e posteriormente aparece a fratura por cisalhamento no meio da ponte, b) modo M II, primeiramente nasce na junta inferior uma fratura de tração, seguido por uma abrupta propagação de uma fratura de cisalhamento proveniente da ponta interior da junta superior. - Modo W, quando só existe a fratura por tração, basicamente é dividido em três grupos, W I, W II e W III, com as combinações W I/II, WI/III e W II/III. Desta maneira, W I é a união de duas fraturas de tração; W II, a coalescência resultante quando uma fratura de tração propaga-se

desde a ponta da junta inferior até atingir a ponta da outra junta; e, W III resulta quando a fratura por tração começa na ponta interior da junta inferior e atinge a ponta interior da outra junta.

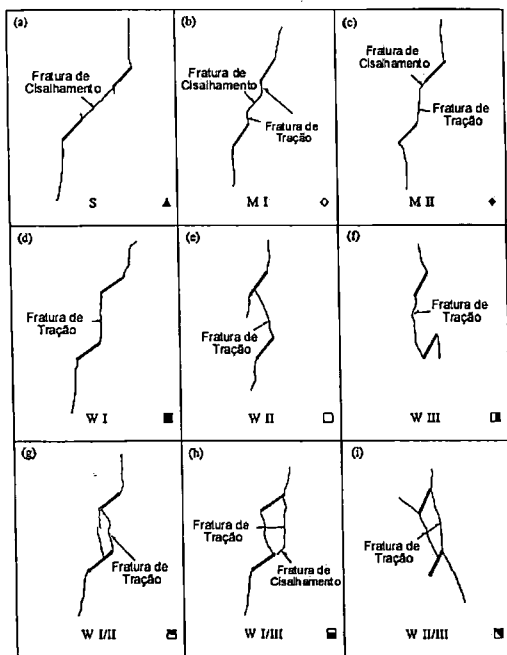


Figura 10: Nove diferentes tipos de propagação de fraturas. As letras S, M e W identificam respectivamente, cisalhamento, cisalhamento/tração e tração, Wong & Chau (1998)

Depois de estudar o comportamento das fraturas nos corpos ensaiados, os autores concluíram que as resistências mínimas encontravam-se nos modelos com $\beta=25^\circ$. Por outro lado, quando $\beta > 45^\circ$ resistência pico é influenciada por o ângulo α , e contrariamente, quando $\beta < 45^\circ$, α não mostrou ter quase nenhuma relevância.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresenta resumidamente alguns dos artigos na literatura que tratam de juntas não persistentes de maciços rochosos com essas características. Observa-se que:

- As pesquisas podem ser agrupadas em dois grandes grupos: os que enfocam no comportamento do conjunto, junta-macício; e outros que estudam como este tipo de juntas interagem diretamente dentro do maciço.
- Para juntas não persistentes, os artigos mostram resultados de ensaios em corpos reais e em corpos virtuais, estes últimos simulados por modelos matemáticos em ambientes computacionais. Têm a limitação de que, as leis físicas são preestabelecidas, dando resultados, algumas vezes, distintos dos que ocorrem na realidade. O programa RFP^{2D}, considera a heterogeneidade da

rocha, sendo este um sistema mais promissor para entender o comportamento da fratura através de meios computacionais.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, C. C. (1998) Ensaios Biaxiais em Modelos de Maciços com Fraturamento Não Persistente. Dissertação de Mestrado. EESC/USP. São Carlos-SP.
- Jamil, S. M. (1992) Strength of non-persistent rock joints – PhD. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Kaneko, K. & Shiba, T. (1990) Equivalent volume defect model for estimation of deformation behavior of jointed rock. Proc. Int. Conf. Mechanics of Jointed and faulted Rock. Vol. 1, Austria, 277 – 284.
- Scavia, C. & Castelli, M. (1996) Analysis of the propagation of natural discontinuities in rock bridges. Eurock 96, 445-451.
- Shen, B. (1995) The mechanism of fracture coalescence in compression, experimental study and numerical simulation. Engineering Fractures Mechanics, 51, 73-85.
- Shen, B & Stephansson, O. (1990) Cyclic loading characteristics of joint and rock bridges in a jointed rock specimen. Proc. Int. Symp. Rock Joints. Norway, 725-729.
- Swoboda, G., Stumvoll, M. & Beichuan H. (1990) Damage tensor theory and its application to tunneling. Proc. Int. Conf. on Mechanics of Jointed and faulted Rock. Vol. 1, Austria, 51 - 58.
- Wong, R. H. C., & Chau, K. T. (1998) Crack coalescence in a rock like material containing two cracks. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sci., 35-2, 147 – 164.
- Wong, R. H. C., Lin, P., Tang, C. A. & Chau, K. T. (2002, a) Creeping damage around an opening in rock-like material containing non-persistent joints. Engineering Fractures Mechanics, 69, 2015-2027.
- Wong, R. H. C., Tang, C. A., Chau, K. T. & Lin P. (2002, b) Splitting failure in brittle rocks containing pre-existing flaws under uniaxial compression. Engineering Fractures Mechanics, 69, 1853-1871.
- Wu, F.Q. & Wang S. J. (2001) A stress strain relation for jointed rock masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 38, nota técnica, 591 – 598.