

5 Componentes do SRM

5.1. Introdução

Para a análise de estabilidade de taludes, freqüentemente se utilizam os sistemas de classificação do maciço rochoso, sendo os mais usados o RMR (Bieniawski, 1978), o índice Q (Barton et al., 1974), o GSI (Marinos & Hoek, 2000) e o MRMR (Laubscher, 2001). Os sistemas são utilizados para obter os parâmetros de resistência do maciço rochoso como os parâmetros de Mohr-Coulomb: coesão (c) e ângulo atrito (ϕ). Estes parâmetros são usados posteriormente nos métodos de equilíbrio limite, elementos finitos e elementos discretos. Alguns problemas associados à metodologia usada atualmente são:

- Os valores empíricos de coesão e ângulo atrito obtidos dos sistemas de classificação têm limitações e erros intrínsecos associados a alguns parâmetros do sistema. Como o RQD, o GSI e a distância entre descontinuidades. O valor do RQD obtido é influenciado pelo tipo de equipamento usado na perfuração (tubos simples, duplos e triplos), os operários da perfuração, os geólogos que realizam a leitura. Outro problema é que o valor do RQD é muito sensível no intervalo de 90 mm a 110 mm. Por exemplo, um maciço rochoso com um espaçamento de 90 mm perpendicular à sondagem tem um valor de RQD igual a 0%, enquanto que para um espaçamento de 110 mm o mesmo maciço vai ter um valor de RQD igual a 100%. O outro problema é que tanto o RQD como a distância entre descontinuidades são segadas pela orientação da sondagem. O GSI tem a limitação de ser válido só para o caso de maciços rochosos isotrópicos. Para juntas que tenham uma direção preferencial não se aplica. Estes erros e limitações geram uma incerteza considerável, na prática uma maneira de corrigir é

mediante a calibração do nosso modelo usando as datas do monitoramento dos deslocamentos medidos no talude a avaliar.

- Os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb: coesão e ângulo atrito são obtidos em um ponto do maciço, que posteriormente se transfere para todo o modelo com o mesmo material, assumindo que o maciço é isotrópico e contínuo. Isto não acontece para um maciço rochoso fraturado.
- Não se pode simular a propagação de fraturas, de forma que a fratura se propague pela rocha intacta (pontes de rocha) e pelas descontinuidades.

O método SRM está conformado por duas técnicas bem estabelecidas (Ver figura 5.1). O BPM (*Bonded Particle Model*) para representar a rocha intacta desenvolvida por Potyondy e Cundall (2004) e o DFN (*Discrete Fracture Network*) para a representação das estruturas. Cada junta é representada explicitamente mediante o modelo de contacto *Smooth-Joint* (SJM) (Mas Ivars D et al., 2008b). Este método permite simular as descontinuidades mediante o deslizamento da partícula através de outra partícula, em lugar de passar sobre a outra partícula. O programa usado para a modelagem foi o PFC^{2D} (Itasca, 2008a). A continuação se detalha os componentes do método.

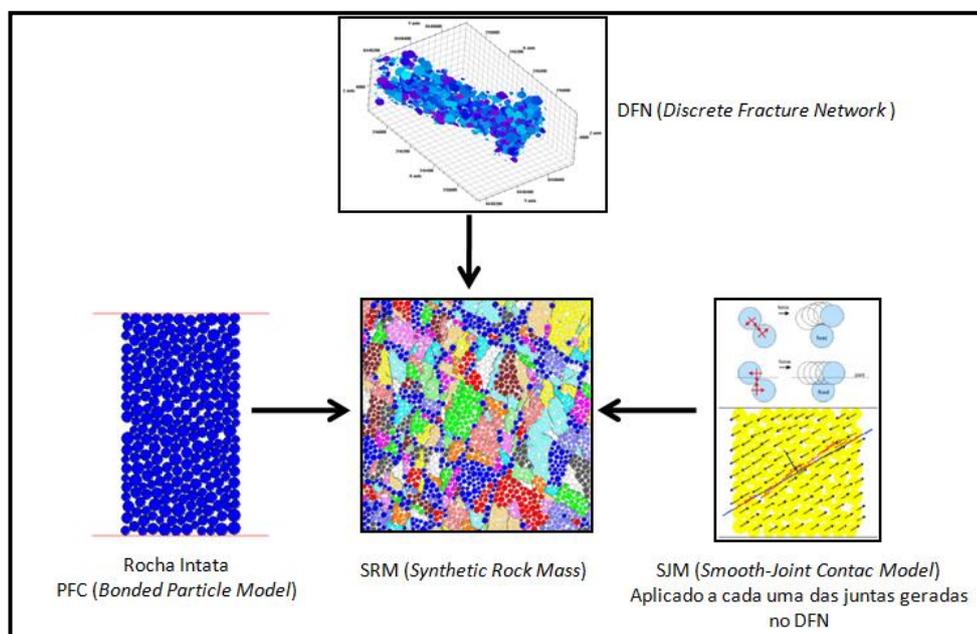


Figura 5.1 – Componentes usados para a geração do SRM (Synthetic Rock Mass)

5.2. Representação da rocha intacta

A rocha intacta no SRM é representada mediante o BPM (*Bonded Particle Model*) (Potyondy & Cundall, 2004). O BPM representa a rocha intacta mediante um conjunto de partículas rígidas circulares (2D) ou esféricas (3D) (O termo *partícula*, tem um significado diferente que no campo da mecânica, na qual é considerado como um corpo com dimensões insignificantes e portanto, ocupa um ponto no espaço. No contexto do BPM, o significado de partícula é de um corpo que ocupa uma quantidade finita de espaço).

O modelo BPM está composto por partículas rígidas, cada partícula é livre de se movimentar independente de outra e só interatuam nos contatos e interfaces entre partículas. A diferença das partículas que são rígidas, os contatos usam o *soft contact approach*, significa que os pontos de contato têm um valor de rigidez finita e, portanto, podem ser quebrados os contatos. O comportamento mecânico do sistema é descrito em termos do movimento de cada partícula e das forças inter-partículas atuando em cada ponto de contato. As leis básicas do modelo são a 2da lei de Newton aplicada às partículas e relaciona os deslocamentos entre partículas e as forças que causam o movimento, a outra é a lei força-deslocamento que é aplicada aos contatos para atualizar as forças de contato devido ao movimento relativo de cada contato.

Na figura 5.2 se mostra um conjunto de partículas rígidas que estão unidas nos pontos de contatos mediante um modelo linear de contato (laranja). Também estão unidas mediante contatos de ligação paralela (verde) que simulam o cimento das rochas. O modelo de contato mais básico no PFC é o modelo linear no ponto de contato entre duas partículas (Figura 5.2(c)), que relaciona a componente da força normal, F^n , e a sobreposição de contato, U^n , incremento de força de cisalhamento ΔF^s e o deslocamento cisalhante, ΔU^s , que se apresenta a seguir:

$$\begin{cases} F^n = K^n U^n \\ \Delta F^n = -k^s \Delta U^s \end{cases} \quad (1)$$

Onde K^n e k^s é a rigidez normal e cisalhante respectivamente (unidades: Pa/m), respectivamente. A resistência de fricção do contato está dada por:

$$F^s \leq \mu F^n, \quad (2)$$

Onde μ é o coeficiente de atrito entre as partículas. As relações apresentadas em (1) são para considerar o movimento entre partículas, para representar um conjunto de partículas que tem uma coesão intrínseca como no caso da rocha intacta, o PFC permite simular mediante contactos de ligação, sendo as novas relações as seguintes:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{F}^n = \bar{k}^n A \Delta U^n \\ \Delta \bar{F}^s = -\bar{k}^s A \Delta U^s \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \bar{M}^n = -\bar{k}^s J \Delta \theta^n \\ \Delta \bar{M}^s = -\bar{k}^n I \Delta \theta^s \end{array} \right. \quad (4)$$

Onde \bar{F}^n , \bar{F}^s , \bar{M}^n , \bar{M}^s são os componentes de força e momentos respeito ao centro da zona de contacto cimentada, \bar{k}^n e \bar{k}^s são a rigidez da ligação normal e cisalhante por unidade de área, θ^n e θ^s são os componentes do ângulo de rotação, e A, I e J são a área, momento de inércia e momento polar da seção transversal da ligação, respectivamente. A resistência do contato cimentado é:

$$\bar{\sigma}^{max} = -\frac{\bar{F}^n}{A} + \frac{|\bar{M}^s| \bar{R}}{I} < \bar{\sigma}^c \quad (5)$$

$$\bar{\tau}^{max} = -\frac{\bar{F}^s}{A} + \frac{|\bar{M}^n| \bar{R}}{J} < \bar{\tau}^c \quad (6)$$

Onde \bar{R} é o raio da zona cimentada (Figura 5.2(c)), $\bar{\sigma}^c$ e $\bar{\tau}^c$ é a resistência à tensão e cisalhamento do contacto cimentado, respectivamente.

Os módulos de Young para os contactos das partículas, E_c e da ligação \bar{E}_c são:

$$E_c = k_n / 2t, \quad (t=1 \text{ em 2D}) \quad (7)$$

$$\bar{E}_c = \bar{k}_n (R^{(A)} + R^{(B)}) \quad (8)$$

Onde $R^{(A)}$ e $R^{(B)}$ são os raios das partículas circulares em contacto (Figura 5.2 (b) e (c)).

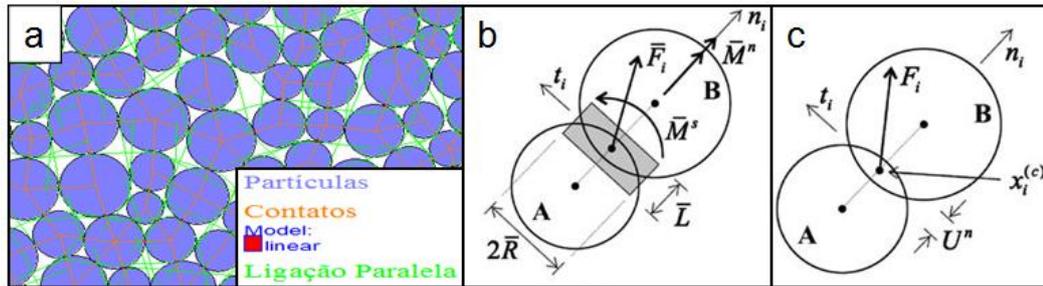


Figura 5.2 – (a) Conjunto de partículas representando a rocha intacta (b) Ligação paralela (c) Contacto entre duas partículas. (b) e (c) de Potyondy e Cundall, 2004.

5.3. Calibração numérica dos micro-parâmetros

As amostras de rocha intacta foram criadas usando os procedimentos desenvolvidos por (Potyondy & Cundall, 2004). O BPM está caracterizado pela densidade, forma, distribuição do tamanho das partículas e pelos micro-parâmetros das partículas e ligações entre as mesmas. A finalidade do processo de calibração é de obter os micro-parâmetros a partir dos macro-parâmetros obtidos nos ensaios de laboratório como: O módulo de Young, o coeficiente de Poisson, a resistência pico à compressão.

O primeiro parâmetro definido a um nível macro foi o módulo de Young. No PFC este parâmetro é controlado pelo módulo de contacto da partícula E_c , e a relação entre a rigidez normal e cisalhante (k_n/k_s), módulo de Young da ligação paralela \bar{E}_c e a relação entre a rigidez normal e cisalhante da ligação paralela (\bar{k}_n/\bar{k}_s). Uma vez obtido o módulo de Young, o coeficiente de Poisson é obtido influenciado pela relação entre a rigidez normal e cisalhante (k_n/k_s) e a relação entre a rigidez normal e cisalhante da ligação paralela (\bar{k}_n/\bar{k}_s). A última etapa consiste em determinar a resistência uniaxial pico, este valor é controlado pelos valores médios da resistência normal e cisalhante das ligações entre partículas.

A rocha a ser calibrada para obter os micro-parâmetros na presente dissertação é o tufo encontrado na zona mineralizada. Os micro-parâmetros mecânicos necessários para a caracterização são:

- Raios das partículas.
- Rigidez dos contactos das partículas.
- Coeficiente de fricção entre partículas.
- Resistência cisalhante e normal das ligações das partículas.

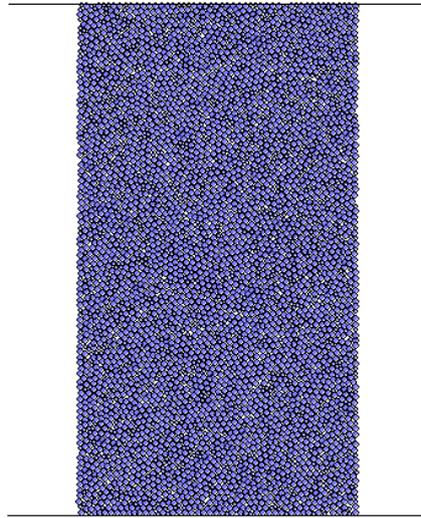


Figura 5.3 – Amostra sintética formado por 5071 partículas que representa o tufo mineralizado.

A primeira etapa foi observar a sensibilidade de alguns micro-parâmetros como: a relação entre o raio maior e menor da partícula (R_{rat}), o tamanho da partícula (R_{min}) e a distribuição das partículas para observar a influência no comportamento e, porém nos resultados dos macro-parâmetros.

A amostra do ensaio foi simulada inicialmente com 5071 partículas e de dimensões de 6.4 cm x 11.2 cm (Ver figura 5.3). Os macro-parâmetros a obter eram: resistência pico 44 Mpa, módulo de Young de 55 GPa, e coeficiente de Poisson de 0.2. Seguindo os procedimentos desenvolvidos por (Potyondy & Cundall, 2004) se obtiveram os seguintes micro-parâmetros:

- Densidade, módulo de Young, atrito e relação entre a rigidez normal e cisalhante para as partículas.
- Módulo de Young, relação entre a rigidez normal e cisalhante, resistência normal (média e desvio padrão), resistência cisalhante (média e desvio padrão) para as ligações paralelas das partículas.

Estes parâmetros se mantiveram constantes, já que o que se procurava é ver a sensibilidade dos parâmetros acima mencionados (R_{min} , R_{rat} e distribuição das partículas). Realizaram-se testes variando o raio mínimo da partícula (R_{min}) com os seguintes valores 0.35, 1.0, 1.5 e 2.0 mm, se apresenta na tabela 5.1 os

micro-parâmetros utilizados na calibração para o raio mínimo de 0.35 mm, também se variou a relação entre o raio máximo e mínimo da partícula ($R_{rat}=R_{máx}/R_{mín}$) para 1.2, 1.5, 2.0 e 3.0. Quando maior é a variação, mais heterogeneidade apresenta a amostra (ver figura 5.4. Os resultados obtidos se apresentam na figura 5.5.

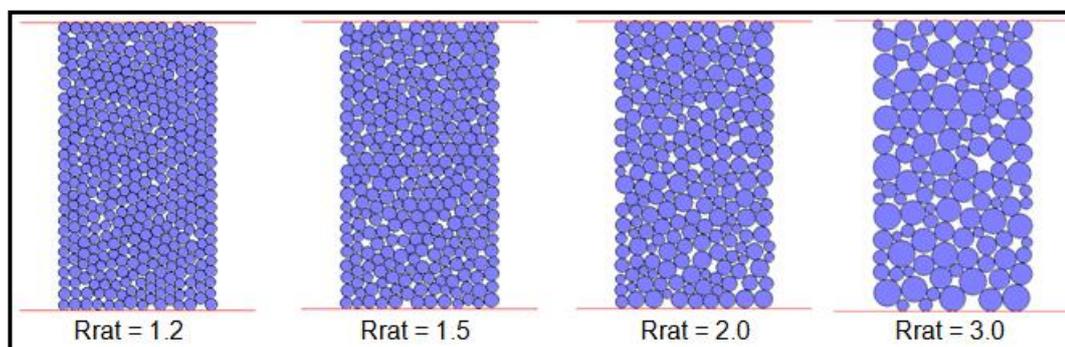


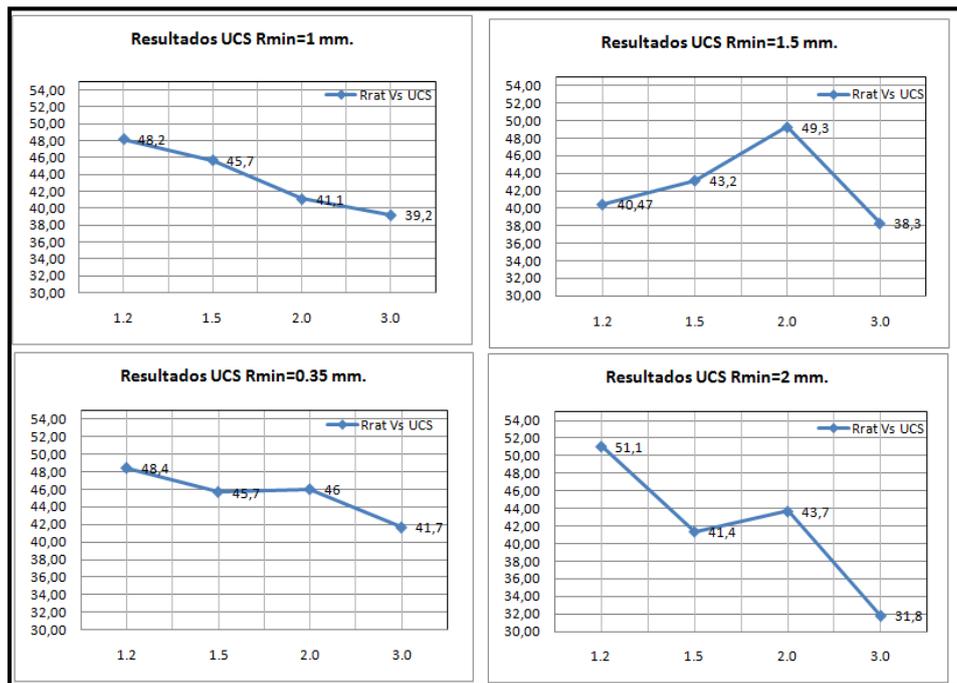
Figura 5.4 – Amostras sintéticas com diferentes $R_{máx}/R_{mín}$ (R_{rat}).

Tabela 5.1 – Micro-parâmetros utilizados no modelo para $R_{mín} = 0.35$ mm.

Micro-parâmetros da amostra sintética	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Densidade da partícula (kg/cm ³)	2712.64	2712.64	2712.64	2712.64
Raio mínimo da partícula, $R_{mín}$ (mm)	0.35	0.35	0.35	0.35
Relação de tamanho de partículas, $R_{máx}/R_{mín}$	1.2	1.5	2.0	3.0
Número de partículas	13 365	10 349	7 187	4 042
Módulo de Young para o contacto partícula-partícula, E_c (Gpa)	44	44	44	44
Relação de rigidez entre partículas, k_r/k_s	2.5	2.5	2.5	2.5
Módulo de Young da ligação paralela, \bar{E}_c (Gpa)	44	44	44	44
Resist. da ligação paralela normal, média, $\bar{\sigma}_c$ (Mpa)	33.2	33.2	33.2	33.2
Resist. da ligação paralela normal, desvio padrão, $\bar{\sigma}_c$ (Mpa)	7.4	7.4	7.4	7.4
Resist. da ligação paralela cisalhante, média, $\bar{\tau}_c$ (Mpa)	33.2	33.2	33.2	33.2
Resist. da ligação paralela cisalhante, desvio padrão, $\bar{\tau}_c$ (Mpa)	7.4	7.4	7.4	7.4

Tabela 5.2 – Resultados da calibração.

D/H=60,4 mm/112,0 mm $R_{min} = 0,35$ mm	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Ensaio de lab.
Módulo de Young, E (Gpa)	57,4	57,2	56,5	55,4	55,0
Coefficiente de Poisson, ν	0,22	0,23	0,23	0,23	0,2
Resist. à compressão uniaxial, q_u (Mpa)	48,4	45,7	46	41,7	44,0
Rrat	1.2	1.5	2.0	3.0	

Figura 5.5 – Sensibilidade dos micro-parâmetros R_{min} e R_{max}/R_{min} .

Como pode se observar, a resistência pico no ensaio UCS tem uma maior variabilidade quanto maior é o R_{max}/R_{min} (quanto mais heterogênea é a amostra).

Dos resultados anteriores os raios mínimos (R_{min}) de 1 mm. e 0.35 mm tiveram uma variabilidade aceitável e considerados confiáveis para ser utilizados nos modelos.

A continuação se realizou um procedimento estocástico para estabelecer o REV (*Representative Elemental Volume*) para o tufo mineralizado, se utilizaram 8 tamanhos diferentes de amostras, incrementando 1x1 cm desde 3 x 3 cm até 10 x 10 cm (ver figura 5.6). Utilizaram-se os mesmos micro-parâmetros da tabela 5.1 com exceção do R_{min} que foi 1 mm no início e posteriormente 0.5 mm o R_{max}/R_{min} utilizado foi de 2.0. A distribuição das partículas no modelo foi gerada aleatoriamente como um processo de Poisson. Para cada tamanho do modelo

foram geradas 10 realizações, fazendo um total de 160 modelos estocásticos de partículas (80 para $R_{\min}=1$ mm. e 80 para $R_{\min}=0.5$ mm).

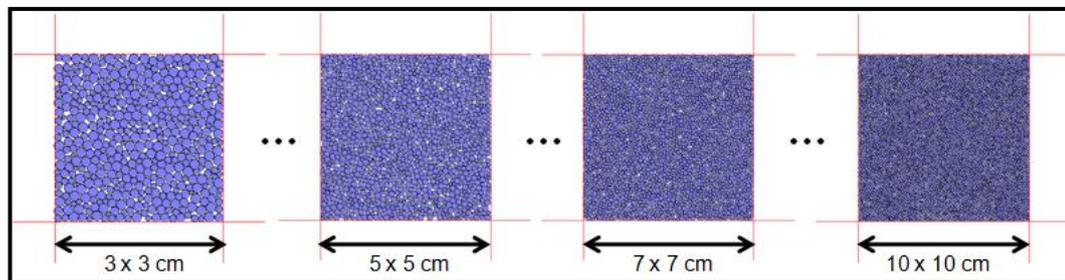


Figura 5.6 – Amostras quadradas utilizadas para ver a influência do tamanho da amostra.

A figura 5.7 mostra o ensaio biaxial realizado em as amostras para o cálculo do REV. Para simular o ensaio biaxial, se aplicou um servo mecanismo para manter uma tensão de confinamento constante e igual a 4 Mpa (σ_x). Estes ensaios biaxiais foram realizados para calcular os parâmetros macroscópicos: Módulo de Young, coeficiente de Poisson e resistência à compressão pico.

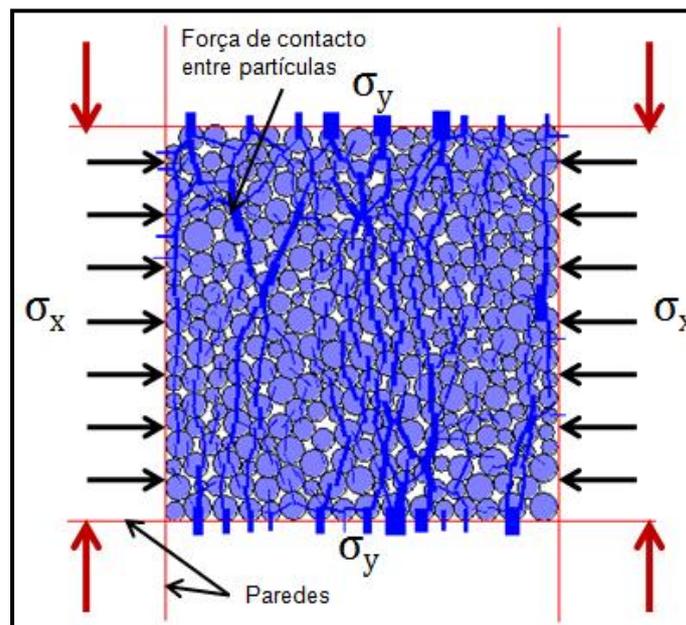


Figura 5.7 – Simulação do ensaio biaxial (Pressão de confinamento = 4 Mpa).

Os resultados dos ensaios para ver a variabilidade do módulo de Young, coeficiente de Poisson e da resistência pico à compressão se apresentam na figura 5.8, 5.9 e 5.10 respectivamente.

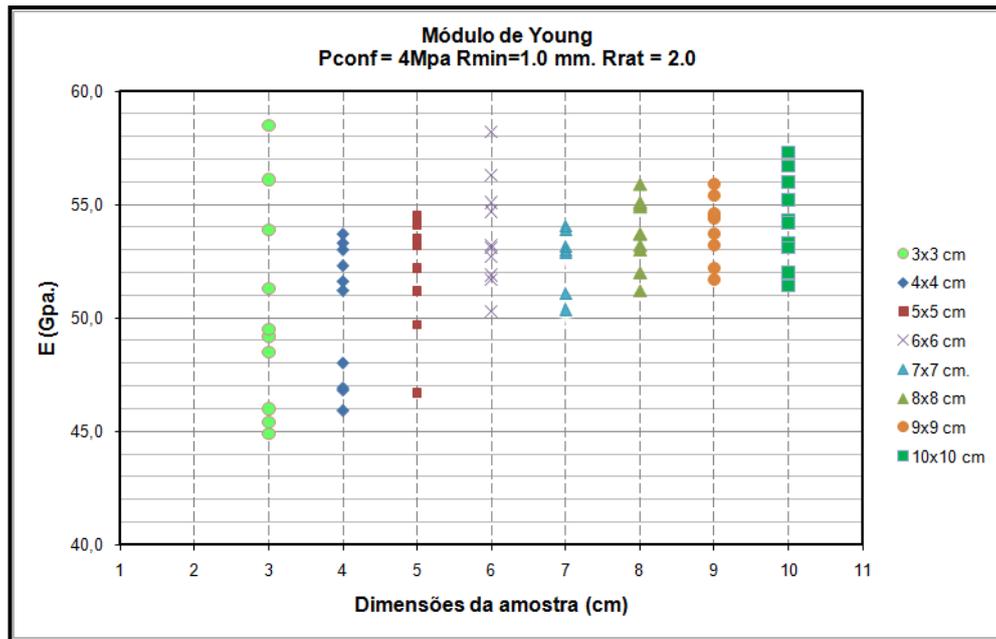


Figura 5.8 – Resultado do Módulo de Young obtido para 10 realizações para cada amostra ($R_{min} = 1.0$ mm).

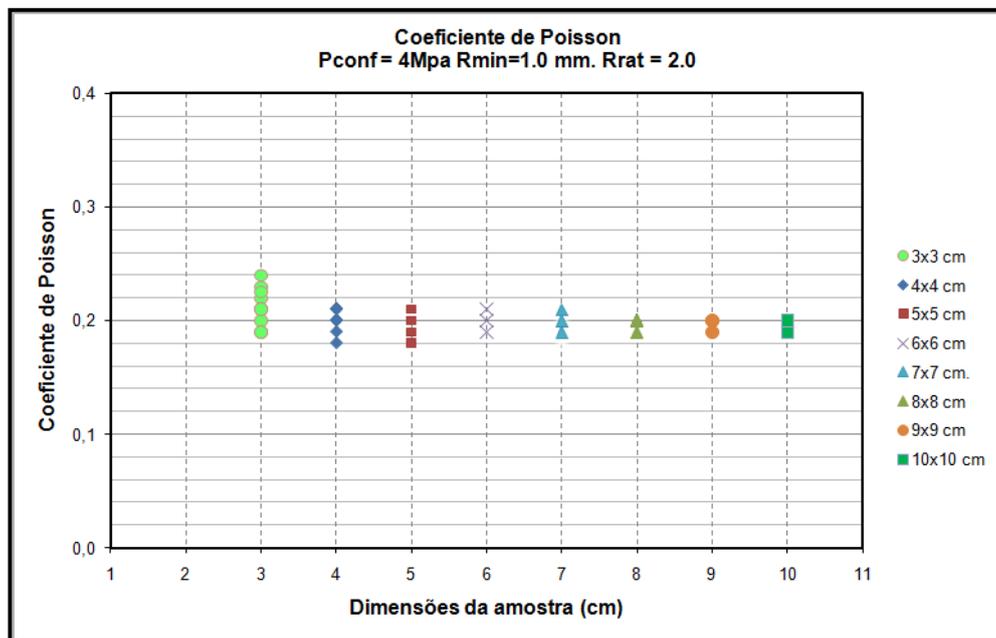


Figura 5.9 – Resultados do coeficiente de Poisson obtido para 10 realizações para cada amostra ($R_{min}=1$ mm).

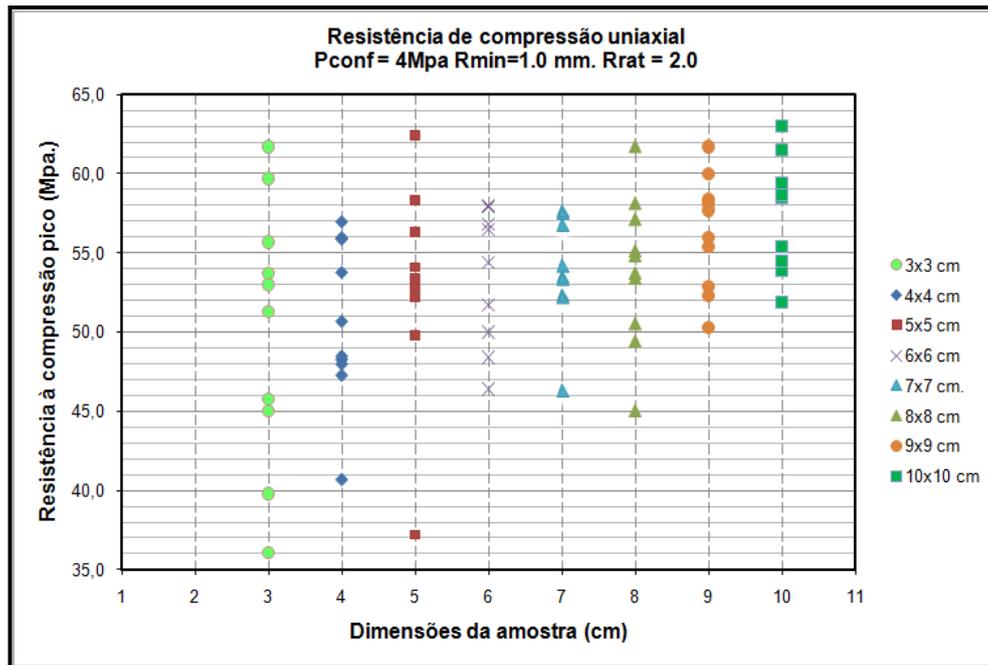


Figura 5.10 – Resultados da resistência à compressão obtida para 10 realizações para cada amostra ($R_{min} = 1 \text{ mm}$).

Dos gráficos se observa uma influência da distribuição do tamanho de partículas considerável no módulo de Young e na resistência à compressão e uma influência menor para o coeficiente de Poisson. A variabilidade foi excessivamente grande (devido provavelmente ao raio mínimo de partícula (R_{min}), pelo que se realizou outra análise similar para um R_{min} de 0.5 mm. Os resultados foram melhores, mostrando uma variabilidade aceitável como se mostra nas figuras 5.11, 5.12 e 5.13.

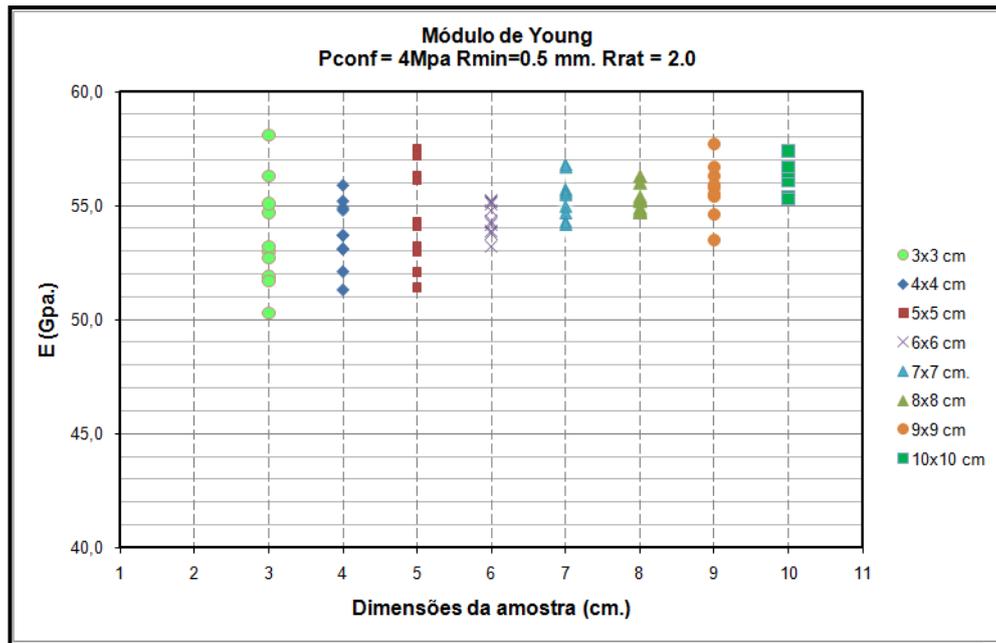


Figura 5.11 – Resultados do Módulo de Young obtido para 10 realizações para cada amostra ($R_{min} = 0.5$ mm).

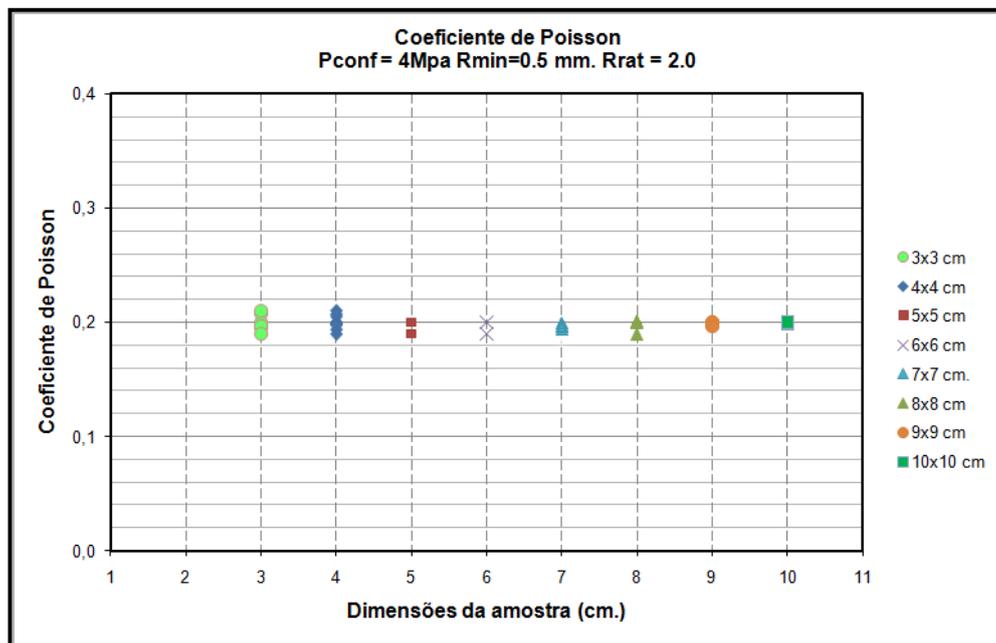


Figura 5.12 – Resultados do coeficiente de Poisson obtido para 10 realizações para cada amostra ($R_{min} = 0.5$ mm).

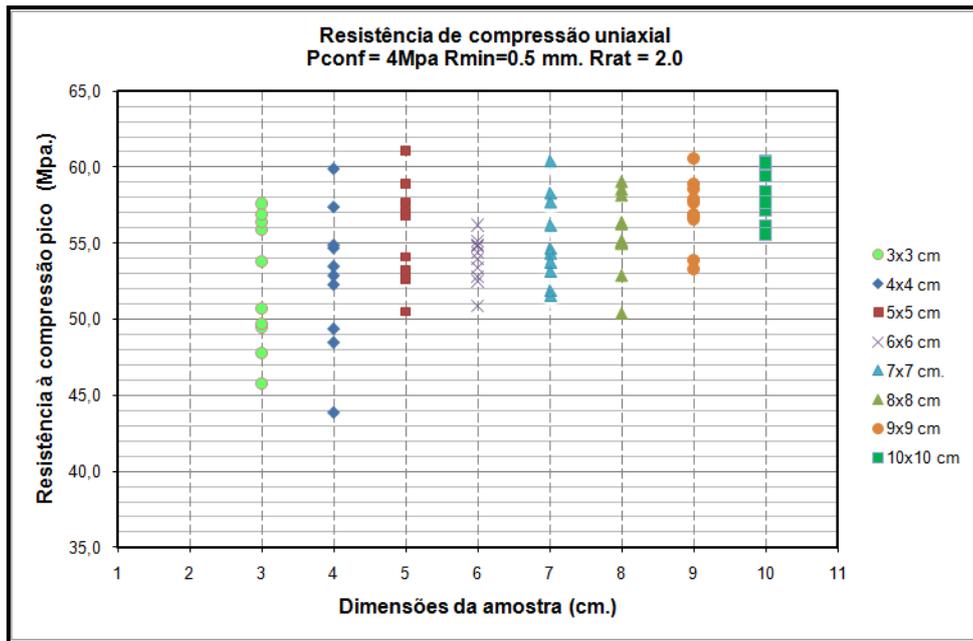


Figura 5.13 – Resultados da resistência à compressão pico obtida para 10 realizações para cada amostra ($R_{min} = 0.5$ mm).

Dos resultados obtidos, observa-se que a variação é muito menor tanto para o módulo de Young, como para a resistência à compressão pico e também que a partir da amostra de 6 cm os valores médios aumentam pouco pelo que poderia se considerar como o REV do modelo de 6 x 6 cm. Também se realizaram histogramas dos 80 modelos para o R_{min} de 0.5 mm e $R_{rat}=2.0$. Como a determinação do modelo poderia ser subjetiva, utilizou-se o coeficiente de variação definido como a relação entre o valor do desvio padrão e da média das respectivas propriedades macro-mecânicas. Estes resultados se mostram na figura 5.15.

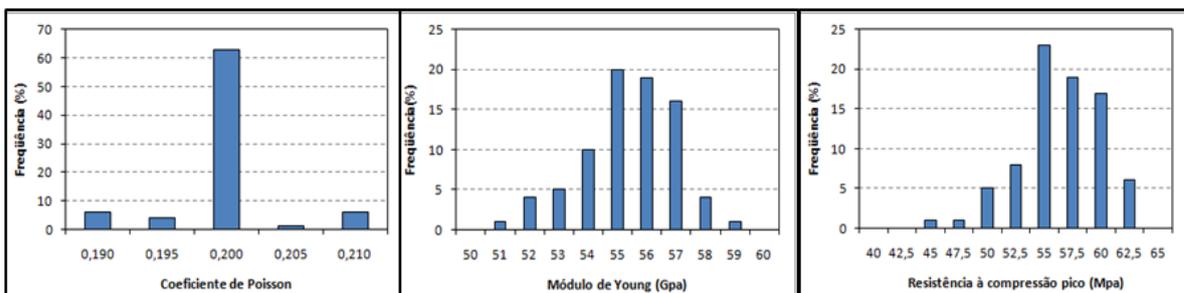


Figura 5.14 – Histogramas das propriedades mecânicas calculadas usando o PFC.

Como se observa na figura 5.15 quanto mais aumenta o tamanho da amostra, mais diminui o coeficiente de variação. Considerou-se como aceitável

um coeficiente de variação menor a 5% e sendo assim, o REV seria de 6 x 6 cm como se tinha mencionado anteriormente.

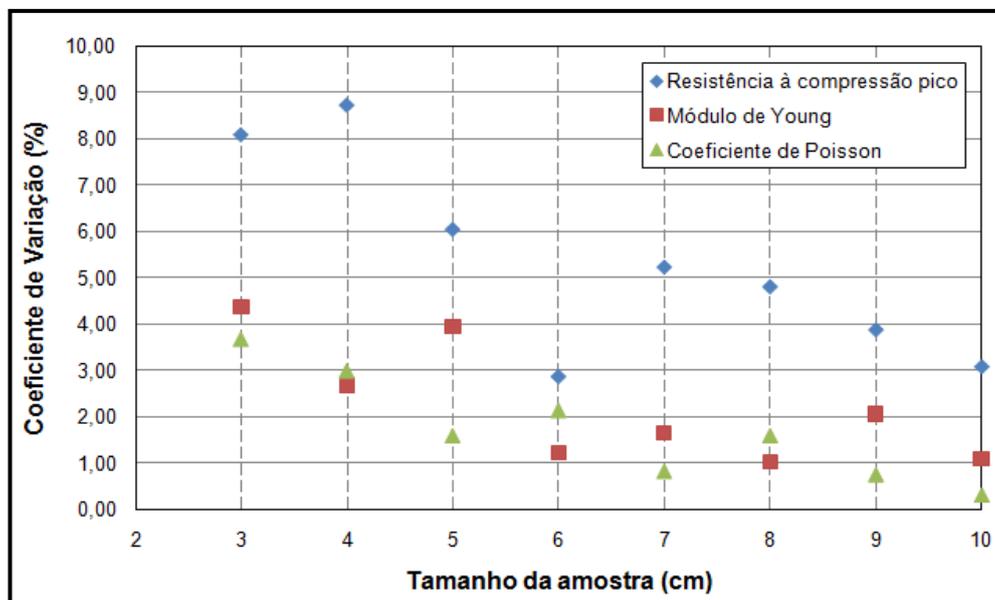


Figura 5.15 – Coeficiente de variação das macro-propriedades para $R_{min} = 0.5 \text{ mm}$ e $R_{rat} = 2.0$.

5.4. Efeito da escala

Como visto anteriormente se deveria usar um tamanho de partícula de raio mínimo de 0.5 mm, mas para um modelo de dimensões de 100 m x 100 m, por exemplo, se necessitariam milhões de partículas o que converteria nosso modelo inviável pelo tempo computacional.

Tem-se realizado diversos estudos mostrando a influência na resistência da rocha intacta na escala de laboratório como (Bieniawski, 1968a; Bieniawski, 1968b; Bieniawski e Van Heerden, 1975; Heuze, 1980). Devido a essa influência as micro-propriedades da rocha intacta devem ser calibradas para representar a resistência do bloco da rocha intacta e não só para as dimensões da amostra de laboratório.

Para tomar em consideração esse efeito da escala se usa a relação desenvolvida por Hoek e Brown (Hoek e Brown, 1980) para rocha homogênea dura ou a extensão dela proposta por Yoshinaka et al.(2008) para rocha alterada e/ou com a presença de micro-trincas. A relação empírica de Hoek e Brown foi desenvolvida da coleção de resultados ensaios de compressão uniaxial

realizados em amostras de diferentes tamanhos, em rocha dura e homogênea. A relação se apresenta na figura 5.16.

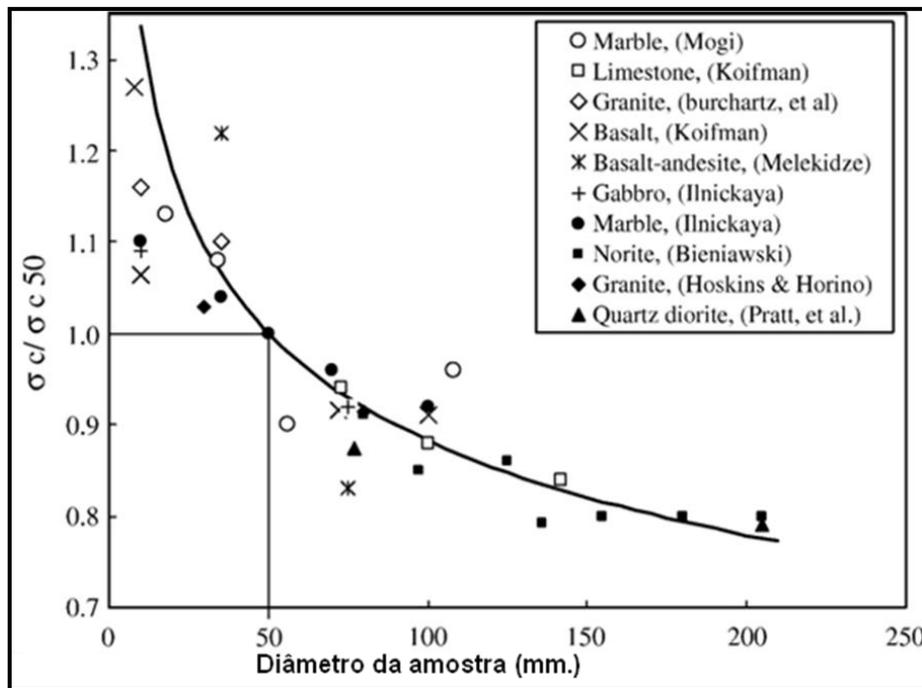


Figura 5.16 – Efeito da escala na resistência à compressão uniaxial em rocha intacta (modificado de Hoek e Brown, 1980).

Yoshinaka et al. (2008) percebeu uma similaridade entre a forma da função de Hoek & Brown e a relação entre a resistência e volume de um sólido, derivado da teoria estatística de Weibull's:

$$\sigma_c = \sigma_{c0} (V/V_0)^{-1/m}$$

Onde V é o volume da amostra, m é uma constante do material chamada módulo de Weibull, e V_0 é o volume da amostra de tamanho padrão. Para padronizar amostras de diferentes relações de diâmetro e altura, ele utilizou uma dimensão equivalente, $d_e = V^{1/3}$, e um expoente, $k=3/m$, ficando a relação como segue:

$$\sigma_c = \sigma_{c0} (d_e/d_{e0})^{-k}$$

Ele observou que o valor de k era fortemente influenciado pela presença de micro-trincas nas amostras. Ele notou que o valor de k no intervalo de 0.1-0.3 era adequado para rochas duras homogêneas e que o valor de k era mais sensível para rochas alteradas e/ou com presença de micro-trincas, sendo seu intervalo de 0.3-0.9. Os resultados se mostram na figura 5.17 junto com a relação de Hoek e Brown (1980).

Outro aspecto importante a considerar quando se quer simular um maciço rochoso com uma grande densidade de fraturas que serão simuladas usando o modelo *smooth-joint* é a resolução que pode estar limitada pela resolução do bloco da rocha intacta ou pelas descontinuidades. Geralmente e no caso da presente dissertação o fator limitante são as descontinuidades, já que o tamanho das mesmas é maior do que o espaçamento entre elas. O espaçamento médio das descontinuidades é de 2.5 m, pelo que o tamanho do bloco a calibrar é de 2.5m x 2.5 m.

Do ensaio de laboratório se obteve uma resistência de 44 Mpa para uma amostra de 6.04 cm. x 11.2 cm. e as micro-propriedades obtidas da calibração se mostram na tabela 5.1 e serão usadas nesta etapa. Usando a relação de Hoek e Brown (1980) a resistência para uma amostra de 0.70 x 1.298 m (A mesma relação altura/diâmetro que a do laboratório, no caso da presente dissertação é 1.85) seria aproximadamente 80% do valor da resistência uniaxial da resistência padrão de 5 cm que no caso a resistência σ_{c50} é 45.52 Mpa. Por tanto a resistência à compressão pico de uma amostra com dimensão maior de 2.5 m seria teoricamente 36.4 Mpa.

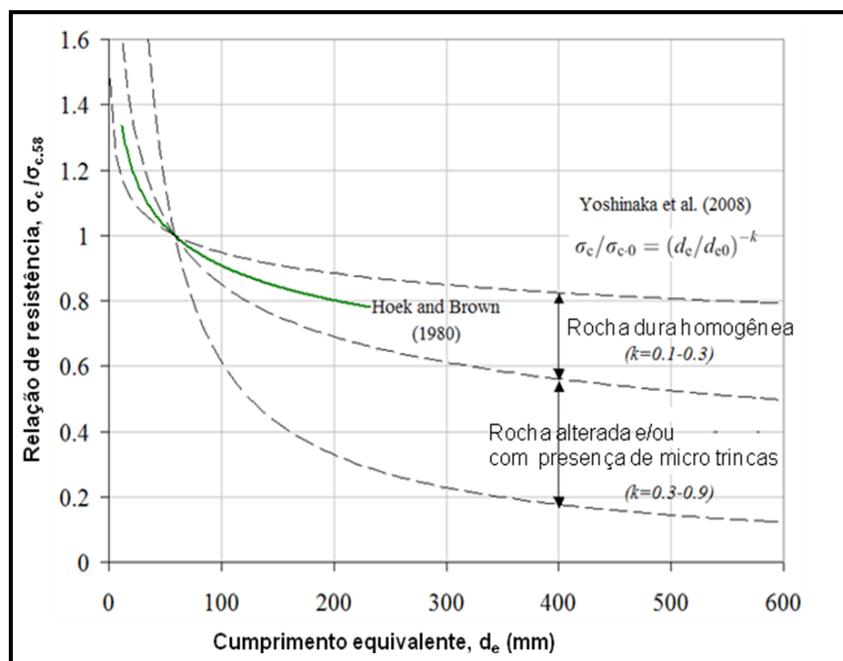


Figura 5.17 – Efeito da escala na resistência à compressão uniaxial em rocha intacta (Yoshinaka et al., 2008) junto com a curva de Hoek e Brown (1980) (Adaptado de Pierce et al., 2009).

Fazendo o procedimento anterior (se fizeram 10 modelos com diferentes distribuições de partículas) e se obtiveram as micro-propriedades mostradas na tabela 5.3 a ser usadas no SRM.

Tabela 5.3 – Micro-propriedades para a amostra de 2.5 x 4.65 m.

Micro-parâmetros da amostra sintética (2500 x 4650 mm.)	
Densidade da partícula (kg/cm ³)	2712.64
Raio mínimo da partícula, R_{\min} (mm)	178.5
Relação de tamanho de partículas, R_{\max}/R_{\min}	1.5
Módulo de Young para o contacto partícula-partícula, E_c (Gpa)	42.0
Relação de rigidez entre partículas, k_n/k_s	2.5
Módulo de Young da ligação paralela, \bar{E}_c (Gpa)	42.0
Resist. da ligação paralela normal, média, $\bar{\sigma}_c$ (Mpa)	17.0
Resist. da ligação paralela normal, desvio padrão, $\bar{\sigma}_c$ (Mpa)	3.5
Resist. da ligação paralela cisalhante, média, $\bar{\tau}_c$ (Mpa)	17.0
Resist. da ligação paralela cisalhante, desvio padrão, $\bar{\tau}_c$ (Mpa)	3.5

5.5.

5.6.

Representação das descontinuidades (Modelo de Contacto *Smooth-Joint*)

Uma vez geradas as descontinuidades de maior e menor escala nos programas computacionais adequados para a modelagem estrutural (na presente dissertação foi usado o Petrel versão 2010.1), estas devem ser inseridas no PFC^{2D}. Tradicionalmente as descontinuidades eram inseridas eliminando algumas ligações de contato e modificando as micro-propriedades das partículas localizadas ao longo da interface, dando valores baixos de resistência e de rigidez (Figura 5.18).

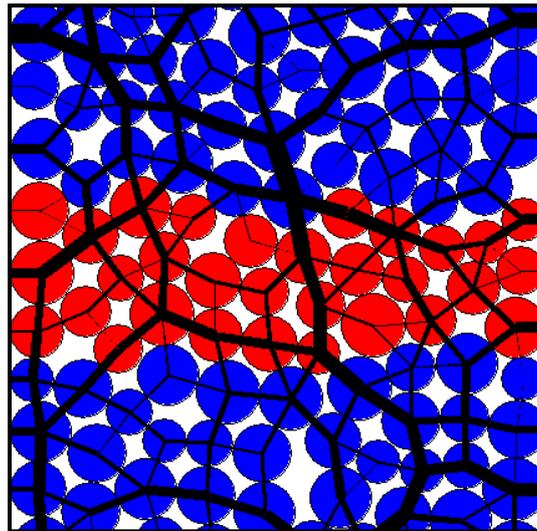


Figura 5.18 – Representação das descontinuidades (cor vermelho) reduzindo as micropropriedades de resistência e rigidez.

O problema de representar as descontinuidades utilizando esse método, ainda dando baixos valores de fricção, resistência, rigidez nos contatos não dará bons resultados quando deslizar, já que se gera uma rugosidade intrínseca nos contornos que é influenciado pelo tamanho das partículas nesses contornos. Uma solução ao problema seria utilizar partículas de menor tamanho nessas zonas para assim diminuir a rugosidade intrínseca, no entanto, quando o número de descontinuidades é grande essa solução não é viável.

Recentemente Cundall tem desenvolvido um modelo para representar as descontinuidades, o modelo de contacto *smooth-joint* (Mas Ivars et al., 2008b). Este modelo simula o comportamento de uma interface independentemente da orientação dos contactos entre partículas ao longo da interface (Figura 5.19). O termo *smooth* é devido a que os pares de partículas que estejam unidas pelo contacto *smooth-joint* podem passar uma através da outra, em vez do contacto padrão, no qual a partícula é forçada a se mover sobre a outra partícula, criando assim uma maior rugosidade (Figura 5.20).

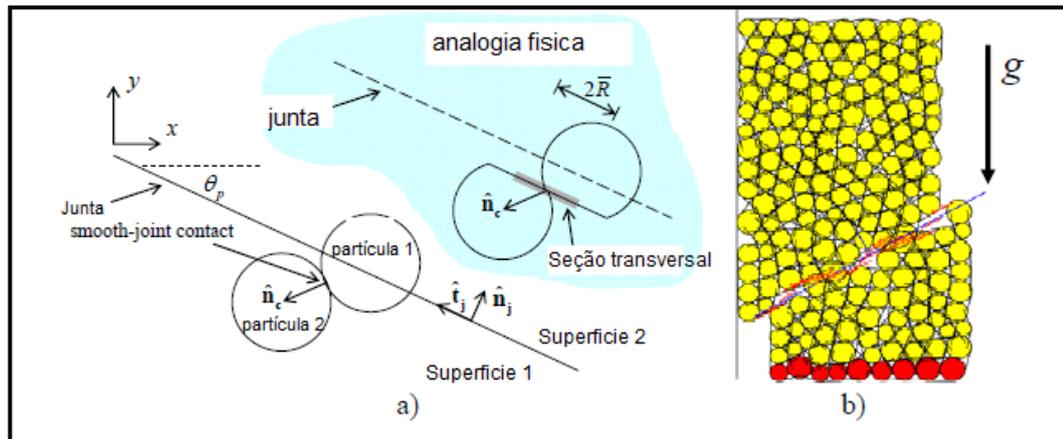


Figura 5.19 – (a) Representação da junta, e (b) amostra 2D baixo ação da gravidade é quebrada pela descontinuidade (as partículas vermelhas são fixas) – grandes movimentos por cisalhamento resultam na criação de novos contactos smooth – joint ao longo do plano da junta. (Modificado de Mas Ivars, 2008).

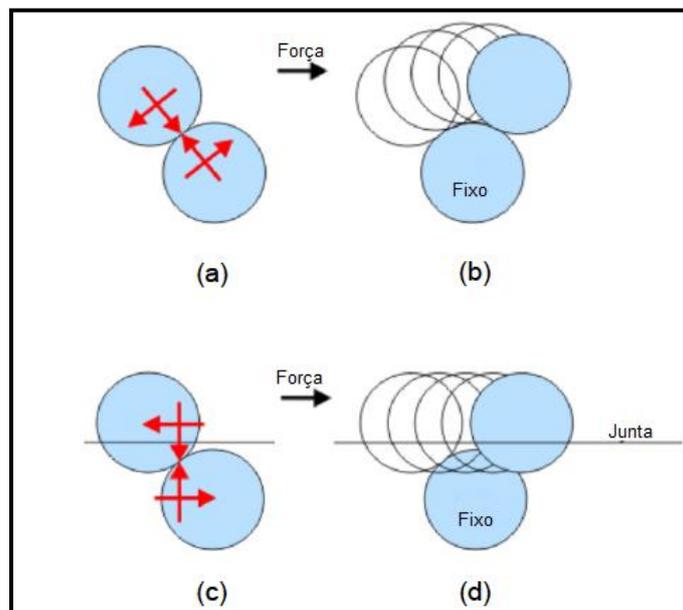


Figura 5.20 – (a) Modelo de contacto padrão (deslocamento normal e tangencial respeito à orientação do contacto), (b) movimento da partícula com contacto padrão quando submetido à força lateral, (c) Modelo de contacto Smooth-joint (deslocamento normal e tangencial respeito à orientação da junta), (d) movimento da partícula com o modelo de contacto smooth-joint quando submetido à força lateral.

No modelo de contacto, a geometria da junta consiste em duas superfícies planares. As duas partículas em contacto estão associadas com as duas superfícies, uma por lado. Durante cada etapa de tempo, o incremento do

deslocamento relativo translacional entre as duas superfícies das partículas é decomposto em componentes normal e tangencial às superfícies das juntas.

O modelo *smooth-joint* pode ser visto como um conjunto de molas uniformemente distribuído sobre uma seção transversal circular, com centro no ponto de contacto e orientado paralelo ao plano da junta. O modelo permite que os pares de partículas com contatos *Smooth Joint* possam se sobrepor e deslizar umas sobre as outras. Durante cada intervalo de tempo (Δt), o incremento do deslocamento translacional relativo entre as duas superfícies das partículas é decomposta em componentes normal e cisalhante às superfícies das descontinuidades.

As descontinuidades no modelo SJ podem representar tanto descontinuidades sem nenhuma resistência à tração, como descontinuidades com certa resistência à tração utilizando ligações. As operações realizadas quando o modelo SJ é criado é o seguinte (Figura 5.21):

- O modelo de contato e ligação paralela é apagado e reemplazado pelo modelo *smooth-joint*.
- As micro-propriedades do modelo *smooth-joint* são estabelecidas.
- A força, deslocamento e separação entre partículas (*gap*) são estabelecidas em zero.

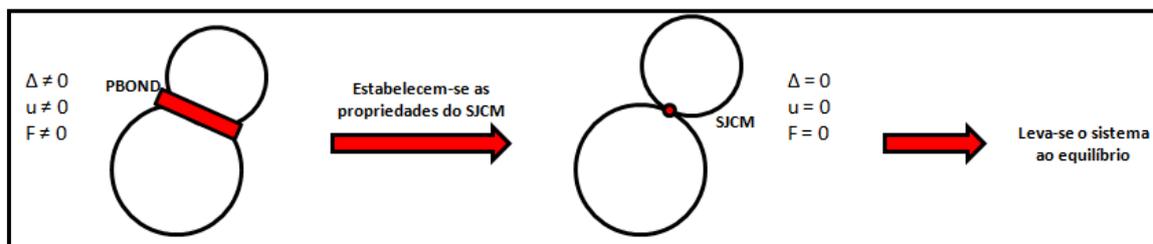


Figura 5.21 – Operações quando o modelo *smooth-joint* é criado

As micro-propriedades do modelo se mostram na figura 5.22 tanto para representar juntas com resistência à tração como para juntas sem nenhuma resistência à tração. Ao igual que como visto na calibração da rocha intata com a sensibilidade de algumas micro-propriedades, para a calibração das descontinuidades também existem maior sensibilidade com algumas micro-propriedades.

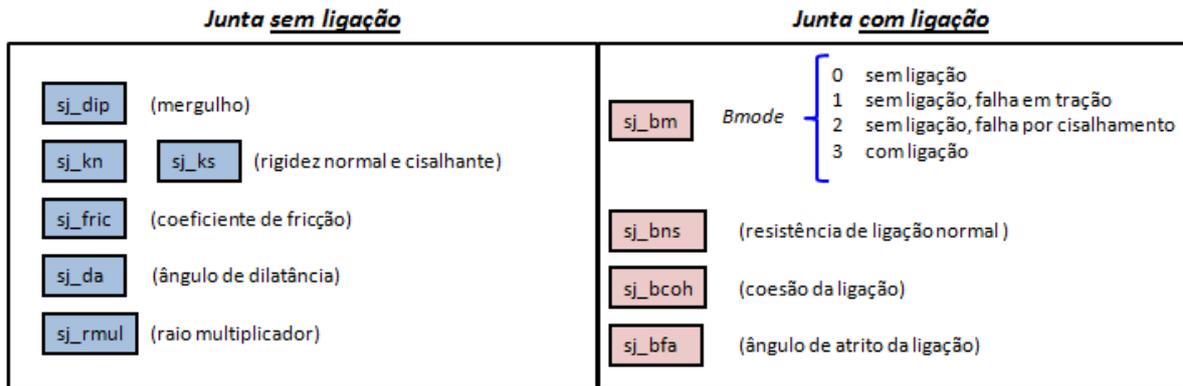


Figura 5.22 – Micro-propriedades do modelo de contato smooth-joint (juntas com e sem ligação)

Park, J-W e Song J-J (2009) estudaram a influência das micro-propriedades no comportamento cisalhante das discontinuidades, concluindo que a resistência pico da resistência cisalhante é controlada pelo coeficiente de fricção, rugosidade e relação entre a resistência cisalhante e normal da ligação de contato. A relação destes micro-parâmetros com a resistência cisalhante é não-linear. Assim também a resistência residual cisalhante está influenciada pelo coeficiente de fricção, raio mínimo e relação da resistência cisalhante e normal da ligação de contato.

Assim se realizou um ensaio de cisalhamento direto, de uma amostra de 60.6 mm de comprimento e 30.0 mm de altura (Figura 5.23). Uma vez gerada a amostra o ensaio consiste em aplicar inicialmente uma tensão normal constante. Isto se realizou utilizando um mecanismo de servo-controle para que a velocidade da parede superior seja tal que a tensão normal aplicada se mantenha constante ao longo do ensaio. Posteriormente se aplica uma velocidade horizontal constante e suficientemente pequena na parede superior esquerda (para assegurar que a amostra permaneça em equilíbrio quase-estático ao longo do ensaio). Realizaram-se os ensaios para as tensões normais de 1.0, 2.5 e 4.0 Mpa. As micro-propriedades utilizadas foram as seguintes:

- $sj_kn = 2.3e9$
- $sj_ks = 2.3e9$
- $sj_fric = 0.5 = \text{atan}(\phi) = \text{atan}(28,86^\circ)$
- $sj_da = 0.0$
- $sj_bm = 0$

Os resultados do ensaio de cisalhamento simulado se mostram na figura 5.24

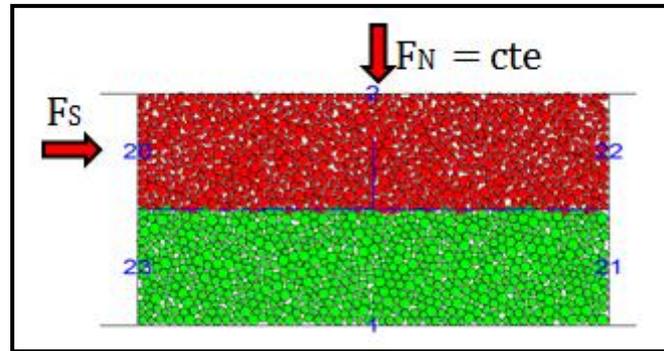


Figura 5.23 – Amostra de ensaio para o cisalhamento direto.

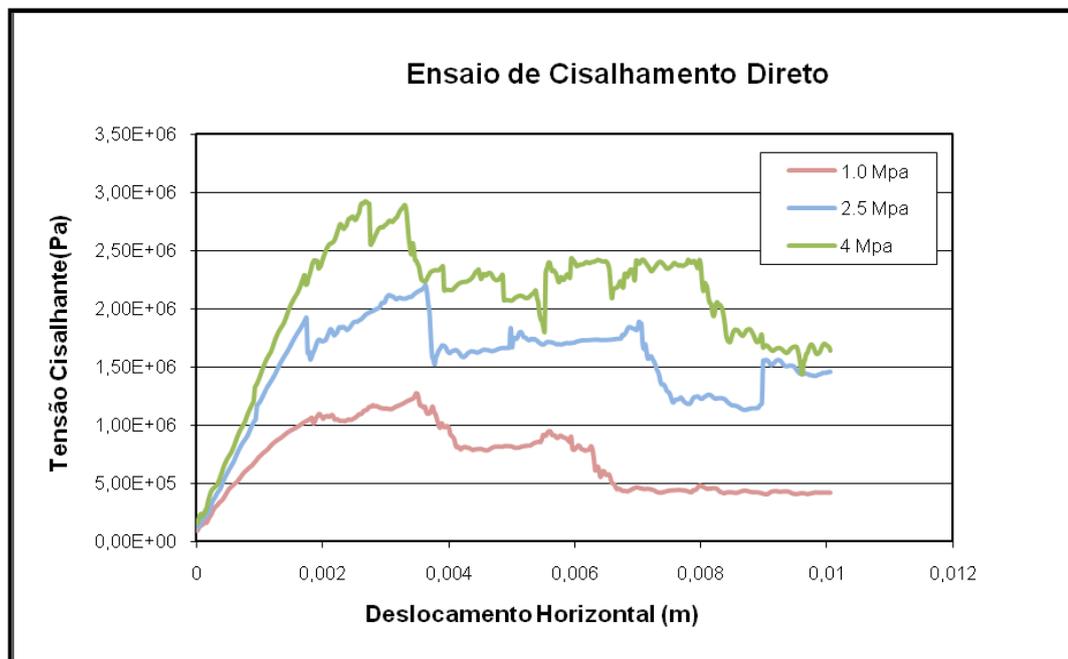


Figura 5.24 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizado.