

4

Calibração do material

4.1

Geração do material

O material empregado para as simulações está definido como o modelo de partículas interligadas para rocha ou **BPM** pela sua sigla em inglês; definido como um empacotamento denso de partículas de tamanhos diferentes que são ligadas conjuntamente pelos seus contactos empregando um modelo de contato predefinido.

Esse material é criado usando um recipiente constituído por paredes que permite formar um sistema bem conectado entre partículas e a uma tensão isotrópica especificada.

- Primeiro o recipiente é preenchido com partículas localizadas aleatoriamente com um tamanho reduzido à metade do raio especificado; após, o raio delas é acrescentado para conformar um sistema denso levando ele ao equilíbrio de forças para ser calculada a tensão isotrópica resultado da superposição entre partículas.
- Logo o raio das partículas é mudado uniformemente até atingir a tensão isotrópica especificada, definida como a média das tensões em cada eixo, “x” e “y”. O valor da tensão mencionada é considerada usualmente menor do que 1% da resistência à compressão simples do material. Essa condição evita a ruptura das ligações acontecer quando o sistema for retirado do recipiente e levado ao equilíbrio estático.
- O sistema de partículas de diferentes tamanhos e localizadas de um jeito aleatório pode conter um número grande de partículas com menos de três contactos, esta característica pode representar comportamentos não desejados do material quando submetido a cargas externas; por conseguinte elas são eliminadas mudando o raio em cada partícula.
- Posteriormente o modelo de contato pre-definido é introduzido entre cada partícula [30].

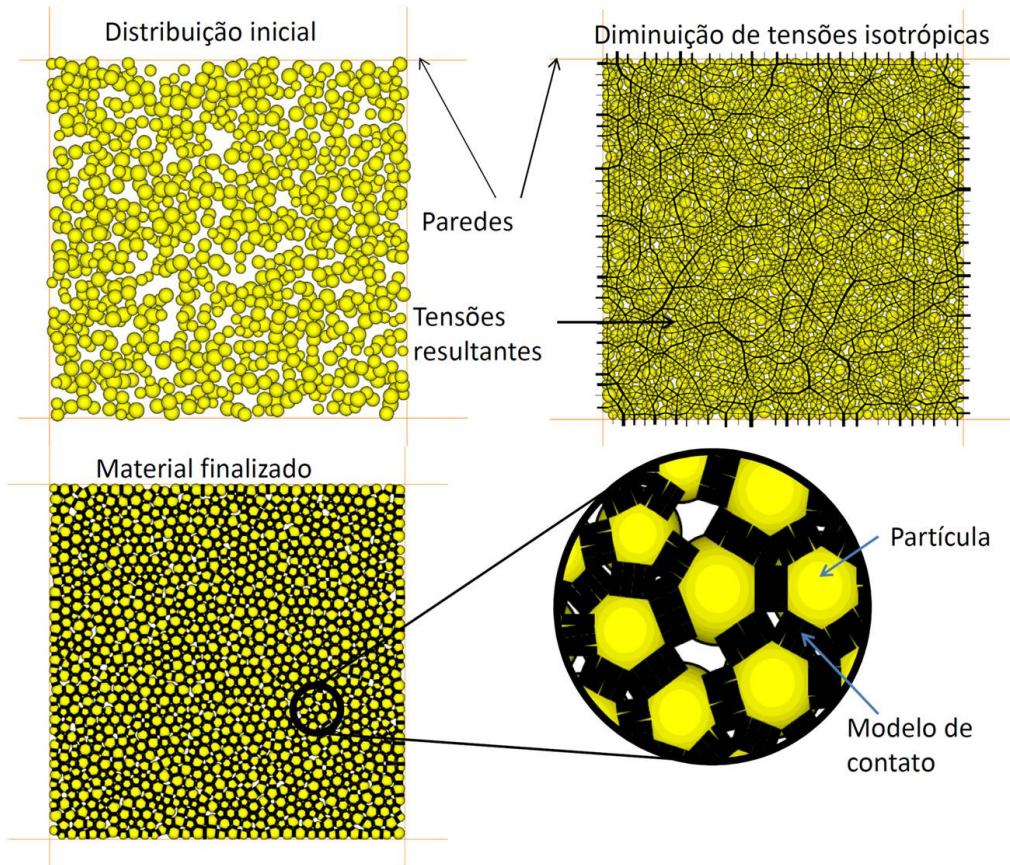


Figura 4.1: Gerado de partículas.

4.2

Flexão em vigas

A deformação por flexão das vigas engastada em uma extremidade e livre na outra foi um comportamento considerado como ponto de partida para a escolha dos materiais a se empregar nas simulações do capítulo 5. Dois tipos de materiais foram avaliados, um material composto pelo *parallel bond contact model* e outro composto pelo *flat-joint contact model*, o comportamento de cada material foi contrastado com a formulação analítica de *Timoshenko* (equação 4-1) em [41].

$$v = \frac{\nu P x y^2}{2EI} + \frac{P x^3}{6EI} - \frac{P l^2}{6EI} + \frac{3P(l-x)}{4cG} \quad (4-1)$$

onde:

- v : flexão da viga.
- E : coeficiente de Young.
- I : momento de inercia.
- ν : coeficiente de poisson.

- P : carregamento aplicado no extremo da viga.
- l : comprimento da viga desde o engaste.
- G : coeficiente de cisalhamento.
- c : metade da espessura da viga.
- x : ponto de avaliação no eixo “x”.
- y : ponto de avaliação no eixo “y”.

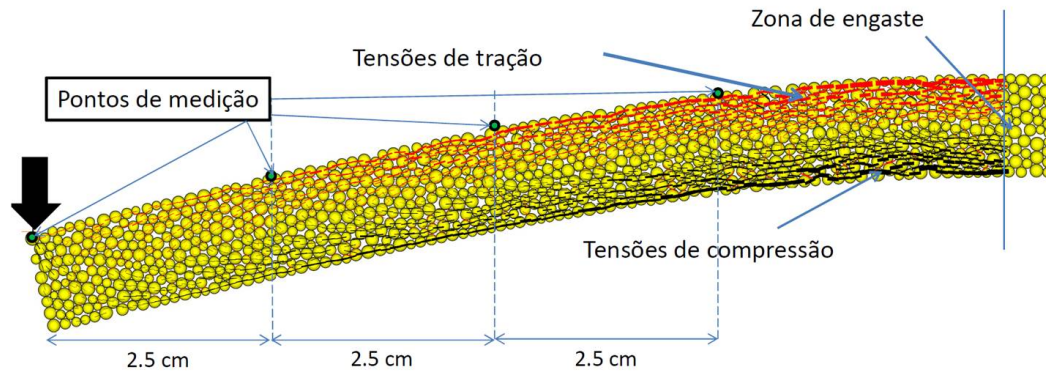


Figura 4.2: Flexão da viga pelo carregamento pontual no extremo, pontos de monitoramento, tensões de tração e compressão geradas.

Cinco vigas foram avaliadas com diferentes macro-propriedades numeradas na tabela 4.1; as dimensões das vigas são as mesmas para os 5 casos tendo um comprimento de 10 cm, 1 cm de altura e um engaste de 0,5 cm. Os resultados finais sugerem que o comportamento das vigas experimenta maior erro quando o valor da rigidez do material é maior; porém os materiais levando somente *parallel bond* nos contactos das partículas apresentam um erro maior em comparação com o material composto por *contact bond* além do *parallel bond*. No entanto, o material composto pelo *Flat-joint* apresenta um erro menor.

Os diferentes valores de flexão nos extremos das vigas avaliadas versus o carregamento aplicado se apresentam nas figuras, 4.3, 4.4, e os valores de flexão em diferentes pontos das vigas através do eixo “x” apresentam-se na figura 4.2.

Analisando o valores de flexão nos pontos das vigas onde são medidas as deformações (fig.4.2), pode-se perceber que valores maiores de erro ocorrem mais perto da zona de engaste. Os menores valores de erro são de 8.89 % e 10.09 % (figura 4.5) que ocorrem no ponto de carregamento das vigas N°4 e N°5 com módulos de elasticidade iguais a $4.37E + 10$ Pa. e $4.42E + 11$ Pa. respectivamente. É fácil concluir neste ponto que um valor muito maior no módulo de Young (cinco vezes maior) para o *Flat-jointed BPM*, fornece um

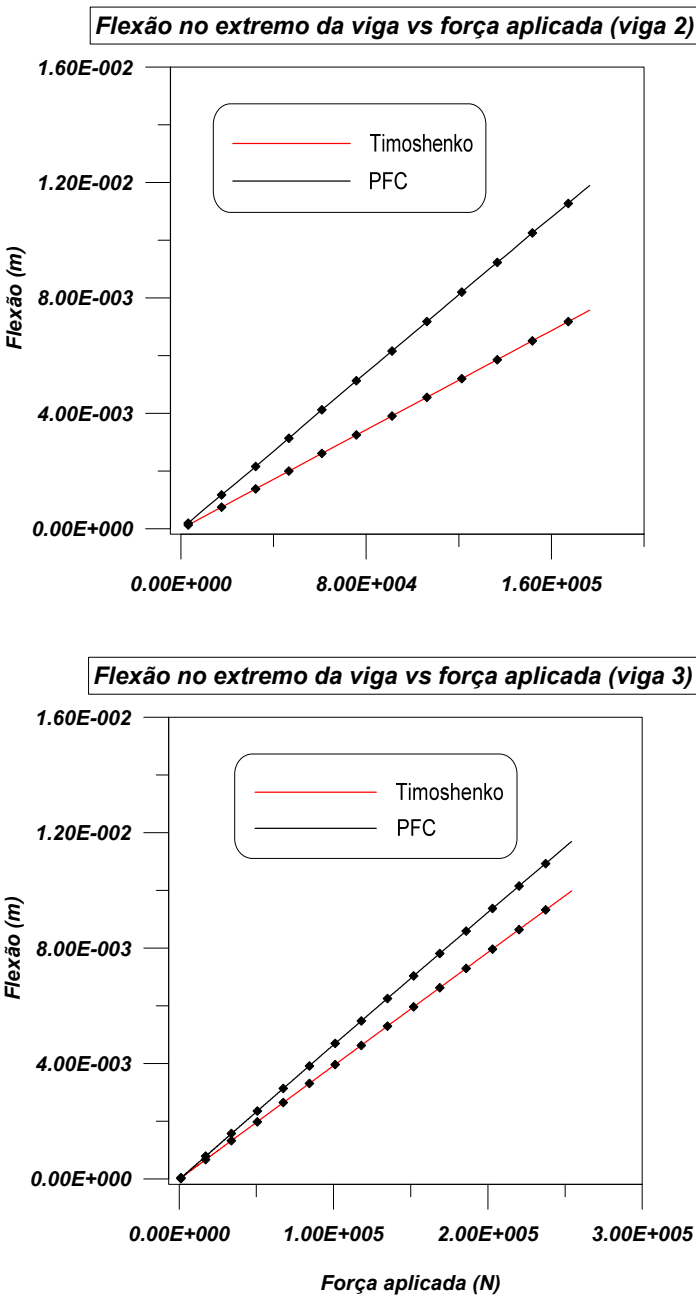


Figura 4.3: Comparativo na flexão, calculado pelo PFC2D vs a fórmula analítica de Timoshenko

valor de erro 40 % menor do que a viga N°3 composta por *Parallel-bond BPM*. Considerando esses resultados conclui-se que o *Flat-jointed BPM* é a melhor alternativa para a simulação da flexão em rocha.

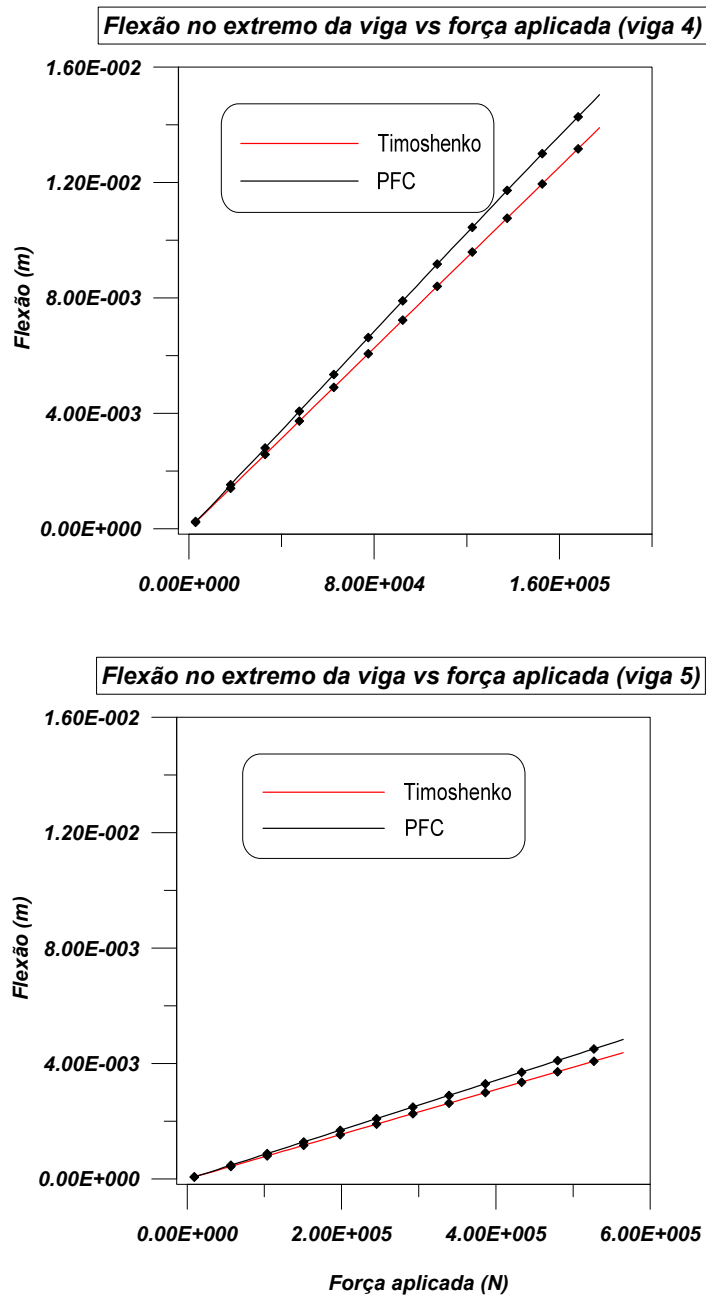


Figura 4.4: Comparativo na flexão , calculado pelo PFC2D vs a formula analítica de Timoshenko

4.3 Resistência à tração da rocha

Já que as feições tabulares do maciço rochoso quando submetido a processos de tombamento do tipo flexural estão expostos a momentos flexionantes, pode se esperar que a resistência a tração da rocha intata seja um dos fatores mais importantes na estabilidade do talude [4]; por tal motivo considerou-se importante determinar a resistência à tração deles e estabelecer qual é a

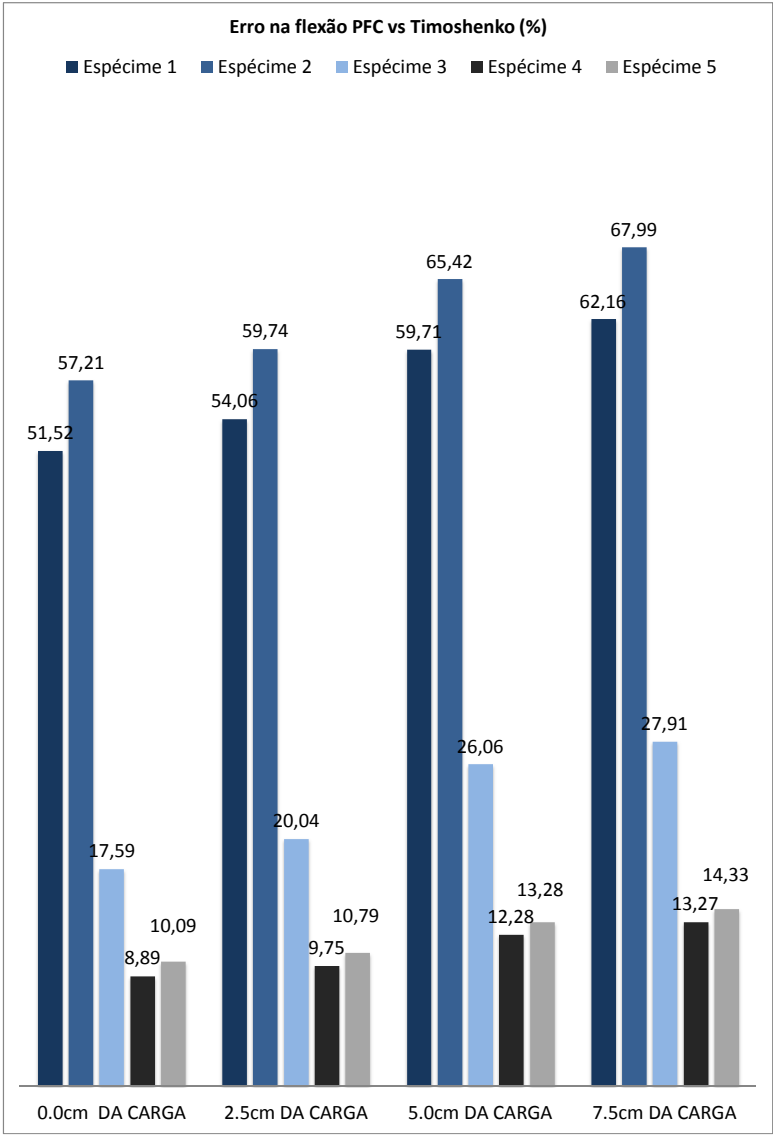


Figura 4.5: Comparativo do erro na flexão em diferentes pontos das vigas; Espécimes 1 e 2 parallel-bond, Espécime 3 contact bond mais parallel bond, Espécimes 4 e 5 flat-joint contact model

resposta do material sintético, observando a sua resistência em deformações flexurais.

A resistência a tração da rocha por definição é a tensão no momento da ruptura da rocha em condições de tensões uniaxiais puras; e para reproduzir estas condições o ensaio de tração direta é a maneira ideal, onde o corpo de prova cilíndrico é puxado até atingir a ruptura; no entanto, as condições difíceis e custosas de reproduzir esse ensaio motivou a criar métodos indiretos mais baratos e fáceis de realizar. Segundo *Coviello et al.* [16], os ensaios indiretos mais empregados são:

Viga	Contato	Young, E (Pa)	Poisson, ν
1	Parallel bond	7.5E+10	2.62E-01
2	Parallel bond	7.91E+10	2.51E-01
3	Parallel e Contact bond	8.64E+10	1.99E-01
4	Flat-joint	4.37E+10	7.20E-02
5	Flat-joint	4.42E+11	6.86E-02

Tabela 4.1: Macro-parâmetros das vigas sometidas a flexão por carregamento pontual no extremo.

- Ensaio Brasileiro.
- Ensaio de flexão em três pontos.
- Ensaio de flexão em quatro pontos.
- Ensaio de Luong.

Nas secções seguintes os ensaios do tipo direto, brasileiro, flexão de três e quatro pontos serão avaliados por representar os métodos mais usuais na engenharia.

O material empregado em [1] composto por ilmenita areia e 15% de gesso reporta uma resistência à tração media de 1.1 **MPa**. (na faixa de 1.07 a 1.14 **MPa**); tal resistência foi estimada mediante ensaios de flexão de quatro pontos; o módulo de elasticidade do material tem o valor de 2.4 **GPa**., um coeficiente de poisson de 0.16 e uma resistência uniaxial dentro de 3 a 4 vezes a mesma resistência a tração.

4.3.1

Ensaio de tração direta

O ensaio de tração direta no PFC2D foi feito em um corpo de prova de 0.03 m de largura e 0.06 m de altura, respeitando a relação $\frac{H}{b} = 2$ onde H é a altura e b é a base do corpo de prova. Considerando o corpo de prova colado com cimento epóxico em terminais metálicos, como é descrito pelo trabalho de *Hawkes e Mellor*; esta configuração proposta inicialmente em 1969 por *Fairhurst* foi definida através de estudos com luz polarizada; o qual, é um método que induz menores perturbações na distribuição de tensões [25]; bem como recomendado pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (**ISRM**).

Para simular as mesmas condições no PFC2D, eliminou-se a liberdade de deslocamento no eixo “x” das partículas no topo e na base do corpo de prova, posteriormente aplicou-se uma velocidade nas mesmas partículas para criar condições de carregamento quase-estáticas, até atingir a ruptura do espécime

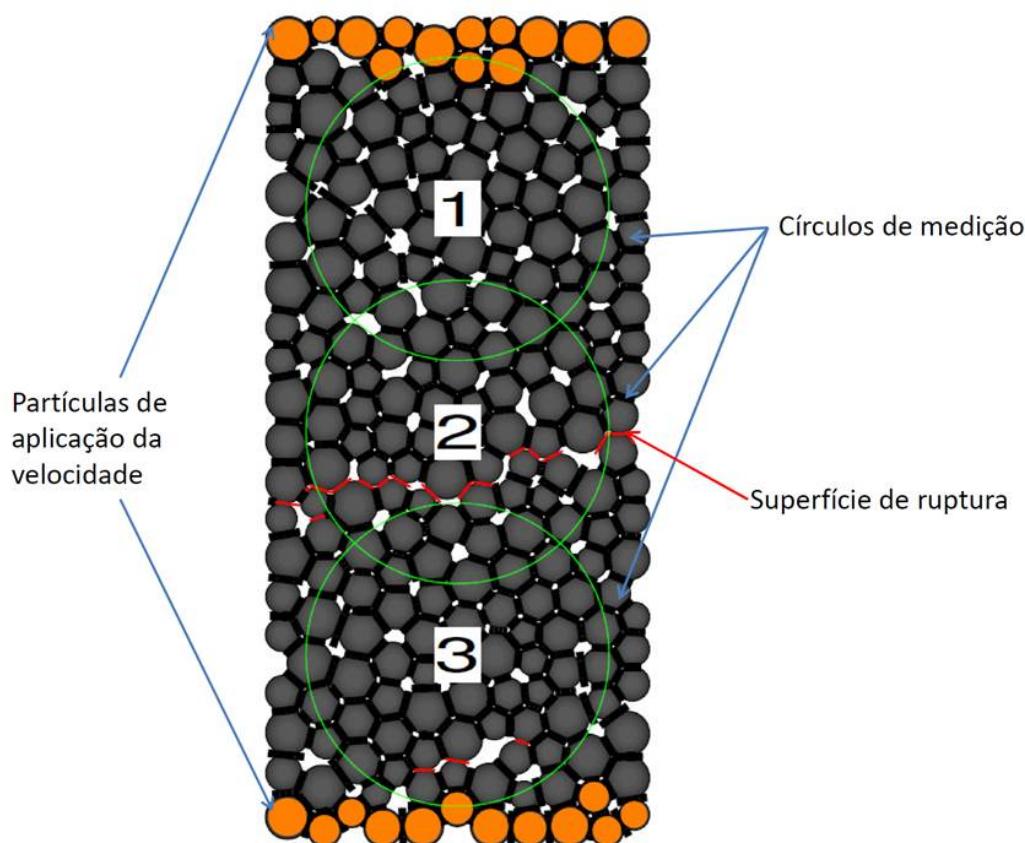


Figura 4.6: Corpo de prova submetido a tração direta e círculos de medição.

[30]; as tensões desenvolvidas no corpo de prova foram medidas através de círculos de medição representados na figura 4.6.

Quatro ensaios com diferentes arranjos de partículas foram realizados para verificar a variação da macro resposta do material à tração; isso mantendo constante o valor de resistência entre os contactos (considerando também as mesmas características elásticas) e simulando diferentes espécimes da mesma rocha. Como resultado, cada espécime apresentou um diferente ponto de fratura (figura 4.7) e diferentes valores de resistência máximo, reportando uma média de 1.1 MPa.

4.3.2 Ensaio brasileiro

O ensaio brasileiro é um método simples e de baixo custo, por essa razão ele é empregado com muita frequência para calcular a resistência à tração, como também para inferir o valor da resistência à compressão simples da rocha (UCS). O ensaio consiste na compressão diametral de discos de rocha entre duas platinas, podendo ser elas planas ou curvas. Um dos estudos mais conhecidos a respeito é o realizado por *Sheorey* [39], que relata uma relação de

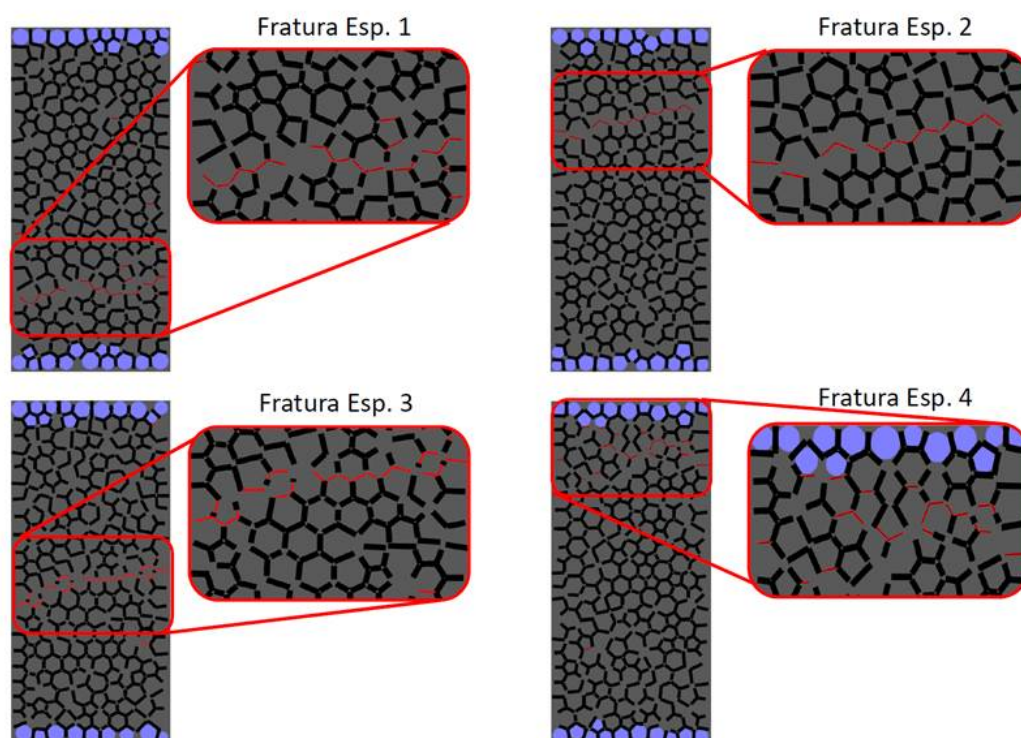


Figura 4.7: Diferentes espécimes ensaiados a tração direta e localização das fraturas.

UCS igual a 10 vezes o valor da resistência obtida pelo método brasileiro. Outros pesquisadores como *Din and Rafigh* [20] e *Kaharqaman et al.* [31] encontraram valores parecidos. O trabalho desenvolvido pelo Martins [33], fazendo um estudo em granito da França sugeriu que o valor de resistência obtido pelo método brasileiro é 80% do valor da resistência obtido pelo método direto.

A validação desse ensaio foi amplamente discutido, e a literatura relacionada a sua validação apresenta conclusões diferentes, como o trabalho apresentado em [15]; este trabalho sugere que a fratura ocorrerá inicialmente nos contactos do disco com as platinas, porém isso acontece só por concentrações de tensões e que a fratura diametral posterior coincide com a resistência a tração do disco; no entanto o trabalho realizado por *Hudson et al.* em [29], fazendo uso de uma carga servo-controlada para evitar um colapso repentino do disco, sugere que o ensaio não é válido para fornecer uma resistência à tração confiável.

Para a simulação numérica, os micro-parâmetros do ensaio de tração direta são mantidos. As dimensões dos discos de rocha sintética ensaiados são de um tamanho que permite um contorno circular e uniforme; isso para que a transmissão de forças entre partículas não seja afetada por imperfeições ou elementos angulares nas bordas (figura 4.8), e que as platinas possam manter

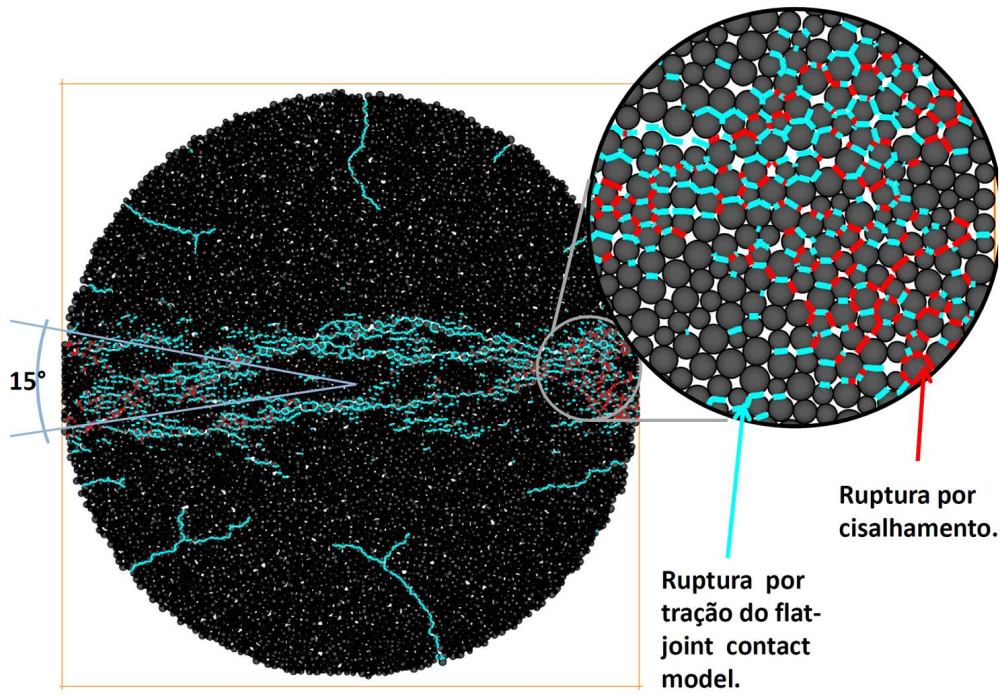


Figura 4.8: Ensaio Brasileiro, representação das rupturas do modelo de contato do tipo flat-joint por cisalhamento e tração.

contato dentro de 15° aproximadamente, como é sugerido pelo padrão da ASTM.

Diferentes diâmetros de 10 cm a 20 cm (seguindo as condições anteriores), foram testados e encontrou-se que o tamanho da amostra ensaiada não representa uma condição que domina a resistência final; então, empregou-se diâmetros de 15 cm com diferentes arranjos de partículas para simular diferentes espécimes. O método de medição da tensão de ruptura está realizada através da medição das forças geradas nas paredes laterais a través da equação 4-2. Para isso, as paredes são submetidas a uma velocidade servo-controlada, comprimindo o corpo de prova de uma maneira quase-estática até atingir a ruptura.

$$BTS = \frac{2F}{\pi Dt} \quad (4-2)$$

4.3.3

Ensaio de flexão de quatro pontos

Fazendo uso do mesmo material sintético (mesmos micro-parâmetros) e tendo como guia o padrão para a determinação da resistência flexural das rochas da ASTM [36], o ensaio foi feito seguindo as configurações estabelecidas enquanto as dimensões da vigas usadas nas simulações dos taludes do capítulo

5; no entanto, para a altura da viga, considerou-se o comprimento usado para o ensaio de tração direta (3 cm). Para essa dimensão, o padrão define um vão inferior de 30 cm a ser considerado no ensaio, e um comprimento total não menor a 35 cm da viga. A aplicação da carga é feita através da ação de uma velocidade servo-controlada na parede superior, que por sua vez, aplica forças às partículas superiores que representam os pontos de carga. Estas partículas têm restringido o deslocamento horizontal; os pontos de apoio inferiores compostos também por partículas com diâmetro maior têm liberdade de rotação, porém estão fixos no eixo “x” e “y”.

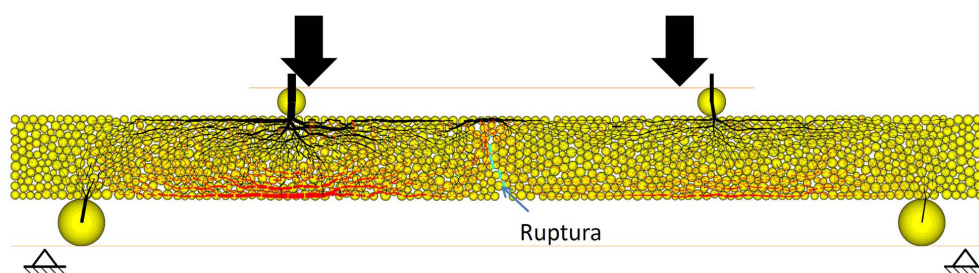


Figura 4.9: Ensaio de flexão quatro pontos

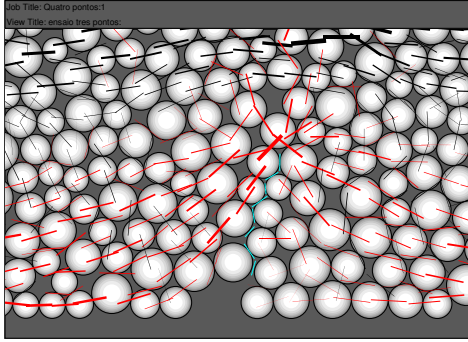
As tensões desenvolvidas na ruptura da viga, são medidas através de círculos de medição considerando as fibras mais externas, onde o momento fletor é maior.

4.3.4

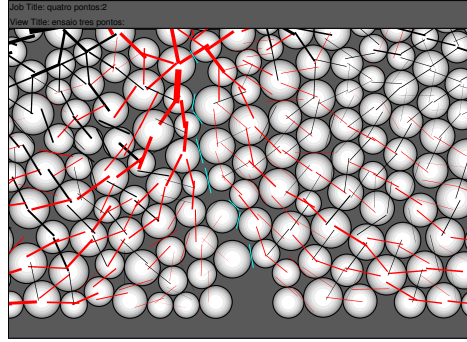
Ensaio de flexão de três pontos

Do mesmo jeito seguiu-se o padrão da ASTM para ensaio de flexão em três pontos, aplicando também a carga através da velocidade servo-controlada na parede superior, aplicando uma força à partícula que transmite carga na viga até atingir a ruptura em condições quase-estáticas. As tensões de ruptura, novamente são medidas nas partículas mas afastadas do eixo transversal da viga através de círculos de medição; o comportamento dos quatro espécimes ensaiados na tensão de fraturamento, estão representados na figura 4.12.

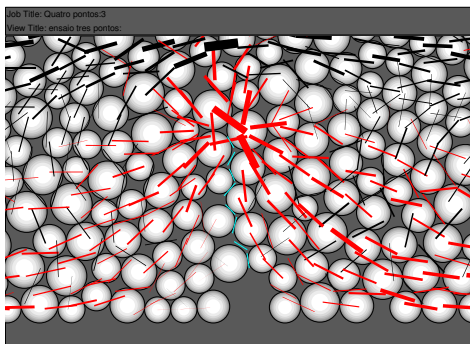
Os valores de resistência fornecidos pelos ensaios de flexão de três e quatro pontos apresentam um desvio padrão maior do que o ensaio de tração direta e brasileiro, porém os valores de resistência médios ficam muito próximos. Nos trabalhos de *Cardani e Meda* e *Coviello et al.* [14, 16] relatam que os valores de resistência calculados nesses ensaios, pelo uso da formulação de Navier em relação à força axial aplicada para rochas naturais, apresentam uma superestimação nos resultados. Os autores sugerem que este problema está relacionado à não consideração da variação da secção transversal durante a flexão pela



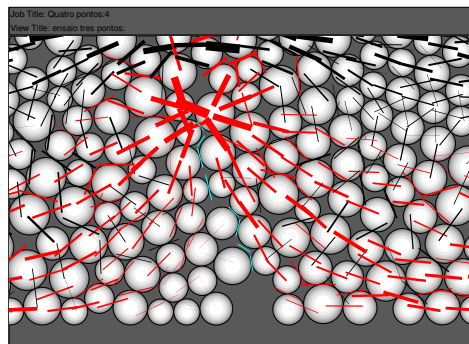
4.10(a): Espécime 1



4.10(b): Espécime 2



4.10(c): Espécime 3



4.10(d): Espécime 4

Figura 4.10: Diferentes espécimes ensaiados a flexão de quatro pontos e o posicionamento das fraturas.

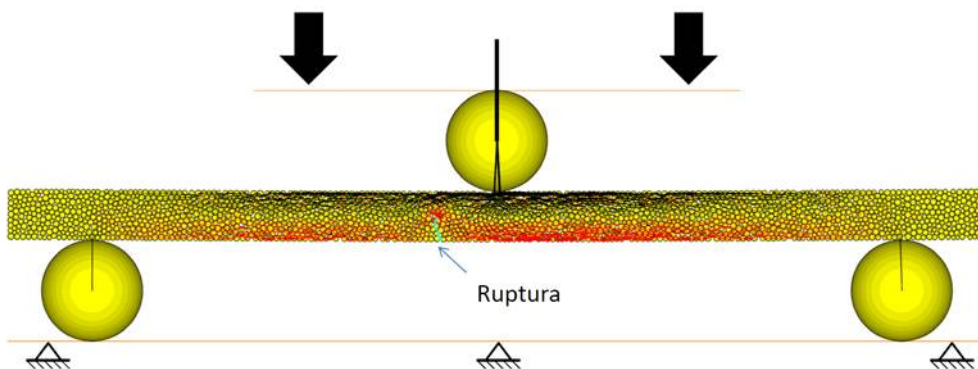
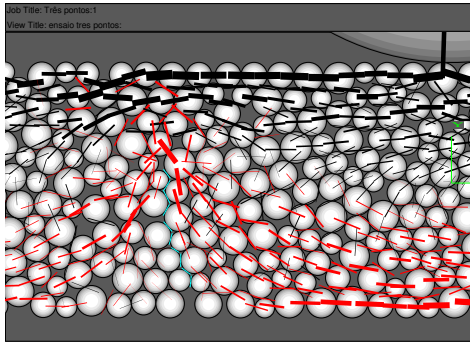
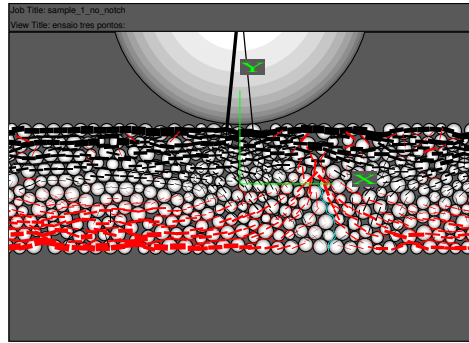


Figura 4.11: Ensaio de tração direta, Hawkes and Mellor (1970).

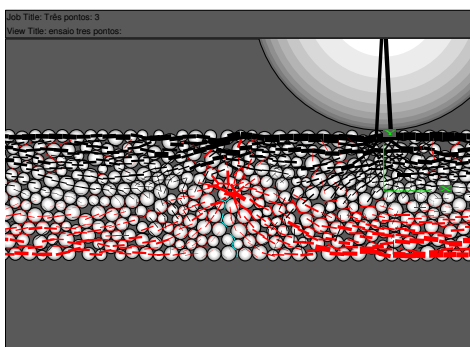
formulação. Outro aspecto importante está relacionado ao conteúdo de imperfeições na estrutura interna da rocha, o efeito da variação da tensão no percurso da seção transversal (zonas mais afastadas do eixo de simetria contém maiores tensões), faz com que pequenas porções de rocha fiquem submetidas à tensão de ruptura, diminuindo a probabilidade da presença de imperfeições que reduzem a capacidade de resistência. A literatura recomenda que o ensaio de



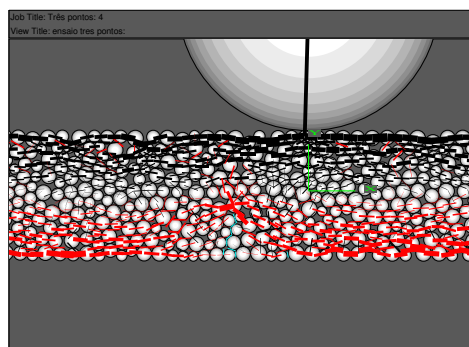
4.12(a): Espécime 1



4.12(b): Espécime 2



4.12(c): Espécime 3



4.12(d): Espécime 4

Figura 4.12: Diferentes espécimes ensaiados em flexão de três pontos e posicionamento das fraturas.

flexão em quatro pontos deve ser considerado mais confiável do que o ensaio de flexão em três pontos, devido à possibilidade de reproduzir as condições unidimensionais necessárias que garantam uma similaridade às condições no ensaio de tração direta; isto é, a possibilidade de induzir o fraturamento em condições de tensão máxima dentro de uma secção determinada pelos pontos de aplicação de carga, se eles estiverem devidamente afastados [27].

As escalas dos corpos de prova em cada ensaio foram assumidos tomando em consideração as dimensões das colunas no modelo físico de Adhikary [1], devido ao fato de que cada coluna tem uma resposta própria ao desenvolvimento das tensões no talude, e considerando as variações que elas poderiam levar na sua resistência, sendo elas constituídas pelos mesmos micro parâmetros.

Como era de se esperar, os resultados dos ensaios apresentam uma variação na resistência de cada espécime ensaiado (figura: 4.13). Em resumo o valor da tensão obtida pelo ensaio de Tração Direta foi comparado com os resultados dos ensaios indiretos. O valor médio de 1.1 MPa que fornece o

ensaio direto foi melhor representado pelo ensaio de quatro pontos com um valor médio de 1.09 MPa, mas com um valor de 1.15 MPa o ensaio de três pontos representa também um valor muito próximo com a mesma variação do que o ensaio de quatro pontos (± 0.13 MPa); no entanto o ensaio Brasileiro tem uma menor variação (± 0.08 MPa), porém apresenta um valor ligeiramente maior de 1.24 MPa; no entanto um número maior de ensaios deve ser realizado para obter uma tendência representativa.

Mesmo assim, os valores concluem que os ensaios diretos e indiretos realizados no PFC nessa faixa de tensões apresentam concordância, e no caso de processos de flexão a ruptura do material acontece quando o valor de resistência à tração do material (**flat-jointed BPM**) é atingido.

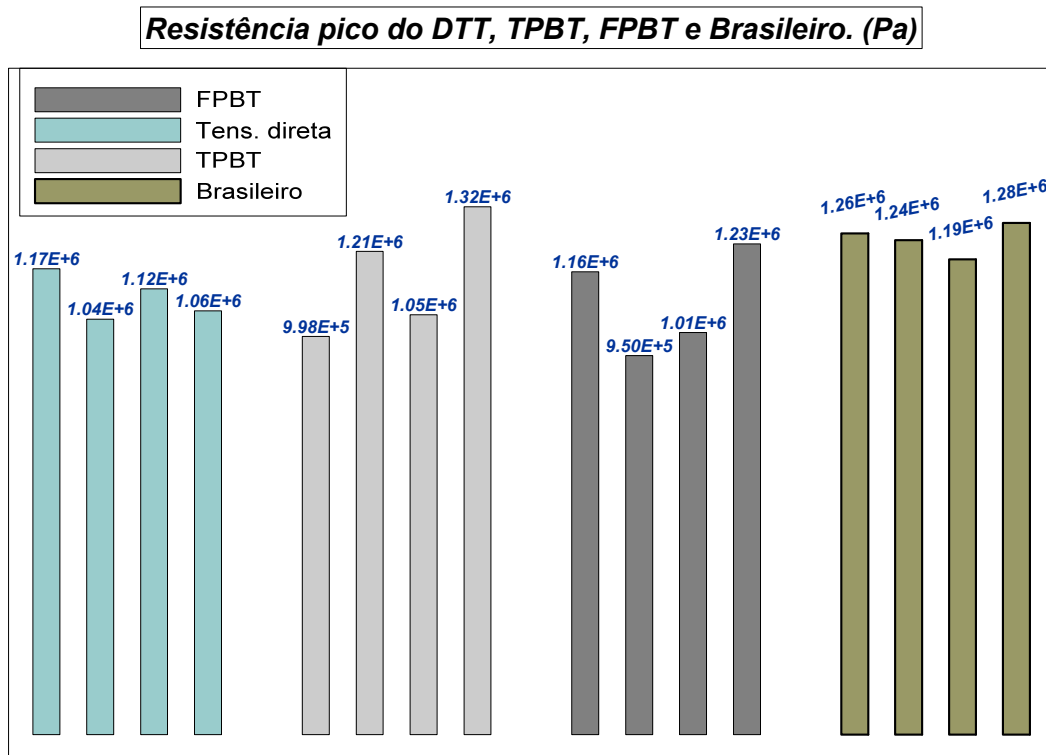


Figura 4.13: Valores de resistência pico de diferentes ensaios à tração.

Por outra parte a máxima deformação para o ensaio de quatro pontos, calculada no PFC, foi maior em comparação a curva tensão-deslocamento apresentado por Adhikary para o mesmo material; nesse caso só conseguiu-se reproduzir a curva em menção com um material mais rígido contendo um coeficiente de Young igual a 7.58 GPa. (ver figura 4.14).

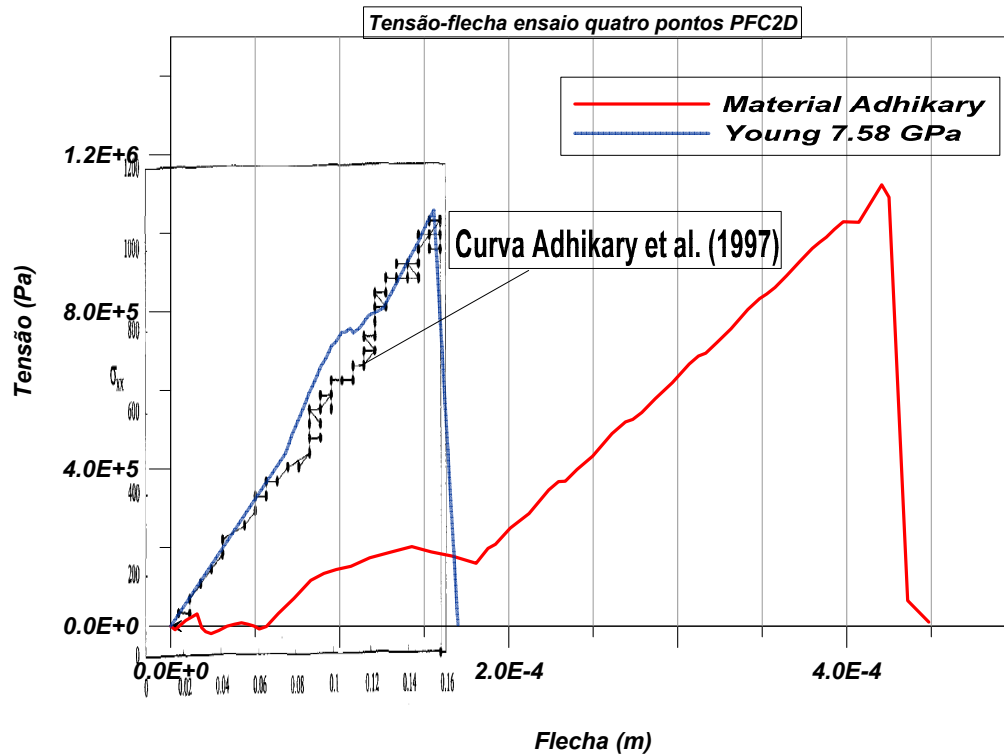


Figura 4.14: Comparação curvas tensão deformação.

4.4

Ensaio de corte direto em discontinuidades de rocha modeladas pelo modelo de contacto do tipo Smooth-joint

Este passo considerou-se importante para verificar o comportamento do modelo de contato do tipo smooth-joint na modelagem de discontinuidades em rocha submetidas ao deslizamento; também para verificar a relação das micro-propriedades do modelo de contato com as macro-propriedades da fratura que eles conformam, isto é, rigidezes e o ângulo de atrito.

As micro-propriedades do material empregado para a simulação do ensaio de Aydan e Kawamoto [7], que foi submetido ao ensaio de corte direto estão listadas na tabela 4.2; aqui pode ser observado que o contato smooth-joint é considerado apenas em condições friccionais com um valor de coesão nulo; isto é, idealizando a fratura sem recheio.

As dimensões do corpo de prova são de 25 cm × 5 cm, ele é gerado segundo o procedimento definido na seção 4.1. Logo depois de ele ter sido criado, a fratura é introduzida na metade do corpo de prova; depois, as paredes do recipiente de geração são apagadas e o sistema é levado ao equilíbrio estático de forças. Consequentemente as paredes que representam as platinas são colocadas em contato com o modelo e o mecanismo de servo-controle é

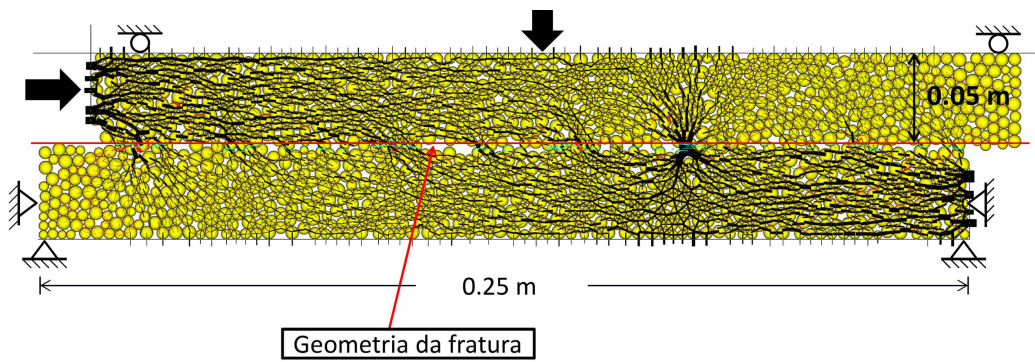


Figura 4.15: Ensaio de corte direto na descontinuidade de rocha.

aplicado na platina superior para obter uma força normal constante durante o percurso do ensaio. A força cisalhante é aplicada através da aplicação de uma velocidade de 0.001 m/s na parede lateral; esta velocidade representa uma aplicação da carga em condições quase-estáticas.

	coesão (Pa)	σ_t (Pa)	E (Pa)	k_n Pa/m	k_s Pa/m	μ ($\tan(\phi)$)	Dilatância ($^\circ$)
Flat-joint	10.0e3	7.4e3	4.29e6	–	–	0.5	0
Smooth-joint	0	0	–	2.0e8	6.67e5	0.84	0
linear contact	–	–	4.29e6	–	–	0.5	0

Tabela 4.2: Micro-propriedades dos modelos de contato empregados para o corpo de prova submetido a corte direto.

σ_t (KPa)	σ_c (KPa)	E (MPa)	ν	γ KN/m ³	ϕ ($^\circ$)	H (mm)	t (mm)	ψ ($^\circ$)	K_n frac (MPa)	K_s frac (MPa)
4	11.4	3.02	0.35	12.4	40	150	30	90	3.0	0.3

Tabela 4.3: Macro-propriedades do material para o ensaio de corte direto.

Durante o ensaio verificou-se que o deslocamento máximo onde é reproduzido um comportamento força-deslocamento razoável, tem um valor igual ou maior ao diâmetro máximo da partícula do modelo. Isso acontece porque novos contactos são criados durante o deslocamento contínuo do bloco superior do corpo de prova; neste ponto, um contato do tipo smooth-joint é criado só se ele pertence a duas partículas com centros que ficam em lados opostos da descontinuidade.

Na figura 4.16 é mostrado como o centro de uma partícula é deslocada desde a zona superior até a inferior do corpo de prova delimitado pela geometria da descontinuidade que fica fixa; por tal condição, o novo contato criado não pertence ao modelo do tipo smooth-joint. Para solucionar este problema, um

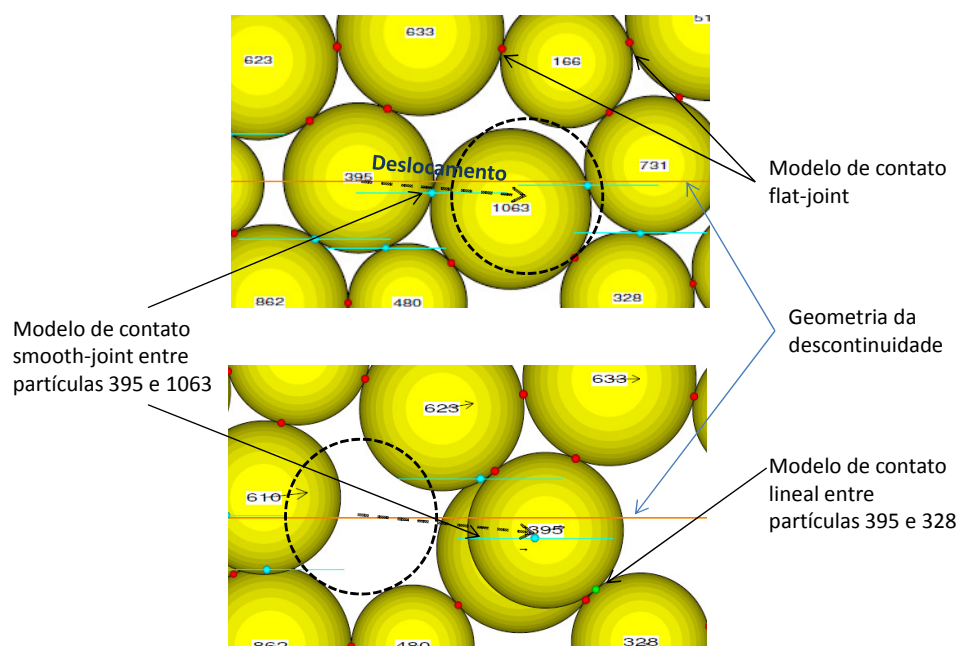


Figura 4.16: Criação de um novo contato do tipo "lineal" durante o ensaio de corte direto

código interno com uma nova condição para a criação dos contactos é aplicado. Este código define inicialmente quais são as partículas que pertencem ao bloco superior ou inferior; após isso, ele designa um número de identificação a cada partícula. Consequentemente um contato do tipo smooth-joint é criado só se as partículas possuem diferente número de identificação.

Este código reproduz melhor o comportamento tensão deslocamento como observa-se na 4.17. De acordo com esses resultados, o código é empregado subsequentemente nas simulações dos taludes.

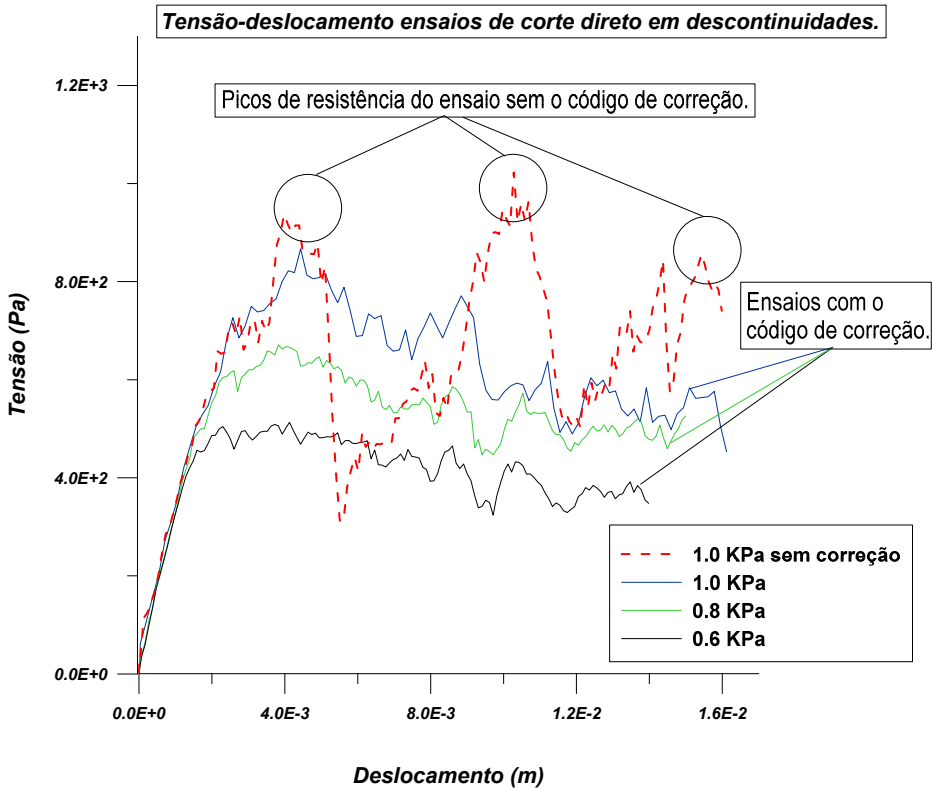


Figura 4.17: Comparação entre o modelamento convencional da fratura vs o modelamento com o código de correção a diferentes tensões normais aplicadas (1.0, 0.8 e 0.6 KPa).