

4 Simulação do processo de corte pelo método dos elementos finitos

O principal objetivo desta dissertação foi simular o processo de corte através de um programa de elementos finitos comercial – Abaqus. Inicialmente, o estudo foi concentrado na simulação de corte em metais, devido a grande quantidade de trabalhos disponíveis neste tema. Posteriormente, o estudo foi estendido para o estudo de corte em rocha, utilizando uma relação constitutiva adequada.

Em futuros trabalhos de pesquisa (da qual esta dissertação foi a primeira parte), será avaliado a variação de alguns parâmetros envolvidos no processo de corte (ângulo de corte, profundidade de corte, geometria da broca, velocidade, etc), com o objetivo de melhorar a eficiência.

Nas simulações deste trabalho foi avaliada além da força de corte, a energia mecânica específica (MSE), que é dependente do trabalho realizado e do volume cortado.

$$MSE = \frac{\text{Trabalho Feito Durante o Corte}}{\text{Volume de Rocha Cortada}} = \frac{\int (Força)dx}{\text{Volume Cortado}} \quad (23)$$

Nos modelos de corte em metais foi avaliado o efeito do: i) atrito entre a ferramenta de corte e a peça, ii) da pressão de confinamento nas forças de corte e MSE, iii) da temperatura, iv) da geometria da peça e do cortador e v) da profundidade de corte.

Os resultados apresentados a seguir seguem a ordem cronológica das simulações realizadas. Como foram apresentados, os modelos iniciais trabalham o processo de corte em metais e posteriormente, resultados de modelos de corte em metais utilizando o modelo constitutivo de Drucker & Prager são apresentados.

4.1

Validação das simulações realizadas:

Nos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, os autores realizaram validação das simulações pela comparação dos resultados obtidos numericamente com dados de ensaios.

Neste trabalho não foi possível executar ensaios de corte para avaliar os resultados das simulações numéricas, mais foi realizada uma comparação com o trabalho de Mabrouki e Rigal (2005). Os resultados foram comparados, uma boa aproximação na magnitude das forças obtidas neste trabalho e as apresentadas pelos autores foram observadas. A força média apresentada pelos autores é da ordem de 450 N, mostrado na Figura 4.2 (a), que correspondente ao modelo de “*superfícies fixas*” e a parte (b) correspondente ao “*modelo com erosão*”, cujos valores de força estão próximos ao valor médio, entre 350 N e 400 N.

4.2

Modelos de corte 2D em metais:

O primeiro modelo simulado foi para corte em metal e utilizou o esquema de “*superfícies fixas*”, e a geometria do modelo é mostrada na figura 4.1:

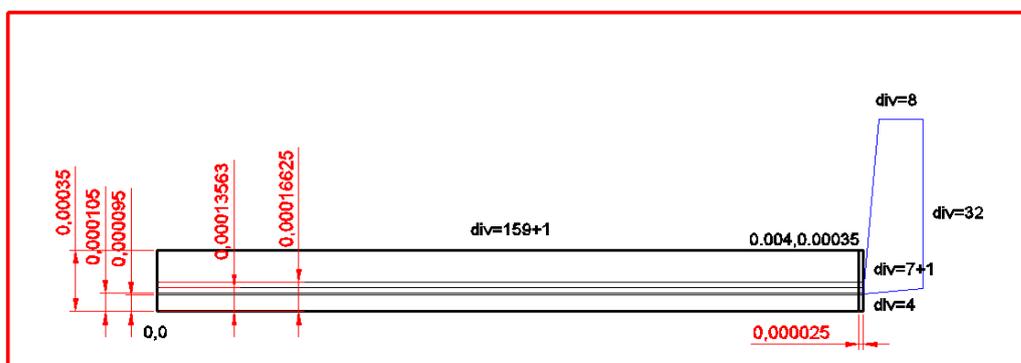


Figura 1.1: Geometria dos modelos de corte em metais 2D (Dimensões em m).

A malha de elementos finitos é constituída da ferramenta com 297 nós e 256 elementos CPE4R (4-node bilinear, reduced integration with hourglass control) e da peça com 2254 nós e 2080 elementos CPE4R. A profundidade de corte, ângulo da ferramenta, velocidade de corte, comprimento e altura da peça são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Propriedades geométricas dos modelos 2D.

Propriedade	Valor
Profundidade de corte (m)	0.000255
Ângulo da ferramenta	5°
Velocidade de corte	1 m/seg
Comprimento da amostra (m)	0.004
Altura da amostra (m)	0.00035

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros do modelo constitutivo de Johnson-Cook utilizados na simulação do corte em metais, baseados no trabalho de Mabrouki e Rigal (2005).

Tabela 4.2: Parâmetros utilizados na simulação de corte em metais.

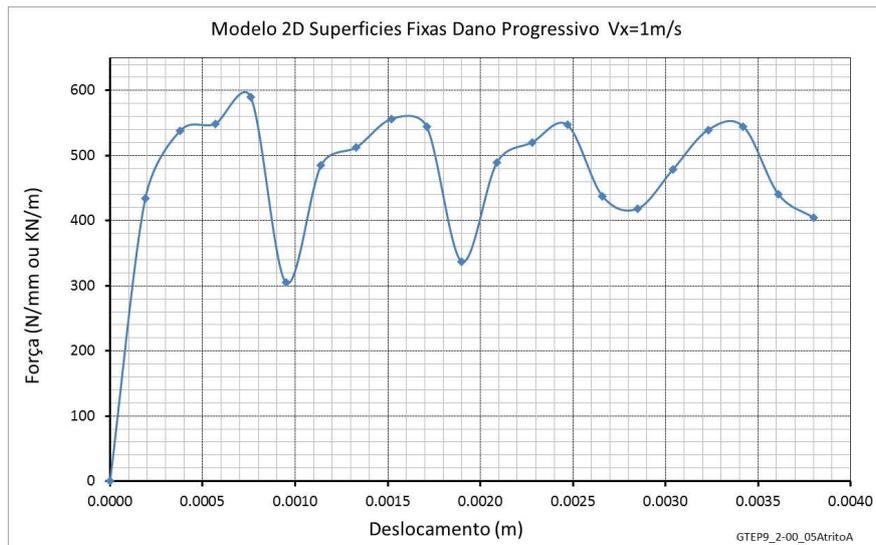
Parâmetro	Valor
A	792 MPa
B	510 MPa
n	0.26
m	1.03
Temperatura de fusão $\theta_{Fusão}$	1520° C
Temperatura de transição $\theta_{transição}$	25° C
C	0.014
$\dot{\epsilon}_0$	1 s ⁻¹
d1	0.05
d2	3.44
d3	-2.12
d4	0.002
d5	0.61

Cinco modelos de corte em metais foram simulados e um resumo das características destes modelos é apresentado na Tabela 4.3. Resultados de força de corte e MSE são apresentados. Os modelos foram simulados considerando “superfícies fixas” e “modelos com erosão”.

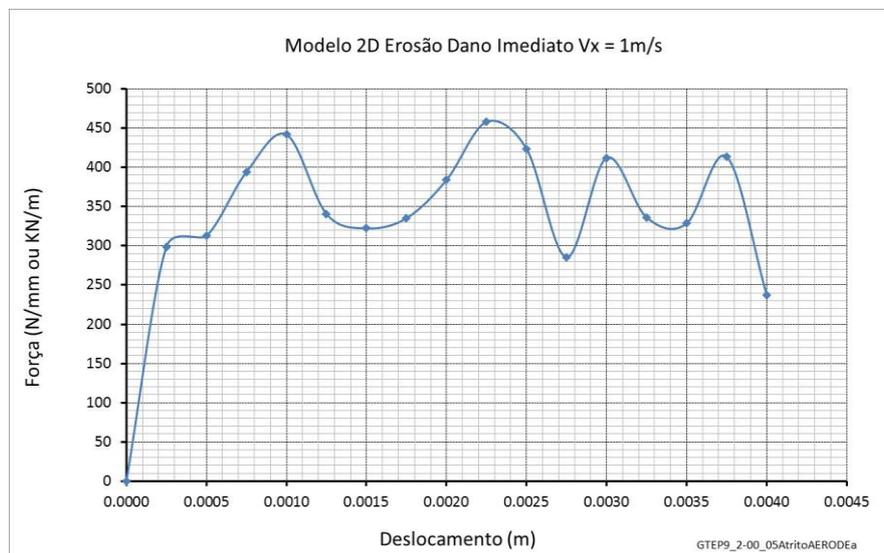
Tabela 1.3: Resumo das características dos modelos 2D para corte em metais

Arquivo	Tipo	Geom.	Dano	Produtos	Vx	Vy	Pc*
GTEP9_2-00_05AtritoA	Superfícies Fixas	2D	Progressivo ($2*10^{-5}$)	Forças e MSE	1m/s	0m/s	0.000254999
GTEP9_2-00_05AtritoAERODEa	Erode	2D	Imediato	Forças e MSE	1m/s	0m/s	0.000254999
GTEP9_2-00_05AtritoAERODEb1	Erode	2D	Progressivo ($2*10^{-5}$)	Forças e MSE	1m/s	0m/s	0.000254999
GTEP9_2-00_05AtritoAERODEbOriginal	Erode	2D	Progressivo ($2*10^{-10}$)+início dano shear	Forças e MSE	1m/s	0m/s	0.000254999
GTEP9_2-00_05AtritoTermico	Superfícies Fixas	2D	Progressivo ($2*10^{-5}$)	Forças e MSE	1m/s	0m/s	0.000254999

*(Vx e Vy são as velocidades em X e Y; Pc é a profundidade de corte em m).



(a)



(b)

Figura 4.2: Força de corte (a) no modelo de “*superfícies fixas*” (b) modelo com erosão.

4.2.1

Forças de corte e MSE nos modelos 2D em metais:

Em cada um dos modelos de corte 2D em metais foram medidas as forças de corte e a MSE. As forças de corte foram avaliadas na parte superior da ferramenta de corte utilizando o pré-processador Abaqus/CAE.

4.2.1.1

Modelo GTEP9_2-00_05AtritoA:

Este modelo foi implementado com o esquema de “*superfícies fixas*” e dano imediato. A figura 4.3 apresenta o modelo GTEP9_2-00_05AtritoA.

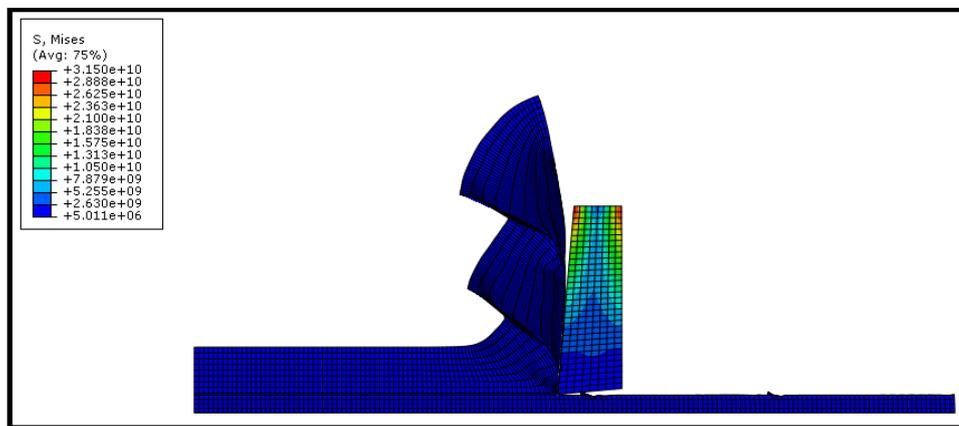


Figura 4.3: Variação das tensões de Von Mises em um modelo com “*superfícies fixas*”.

A Figura 4.4 apresenta a variação da força de corte com o deslocamento do corte, considerando a velocidade de corte de 1 m/s e profundidade de corte mantida constante.

O valor da MSE foi obtido através de uma planilha de cálculo, utilizando os valores de força de corte e o volume de material cortado, obtido através da área sob a curva. Para este modelo, o valor de MSE foi de 1856.77 Mpa.

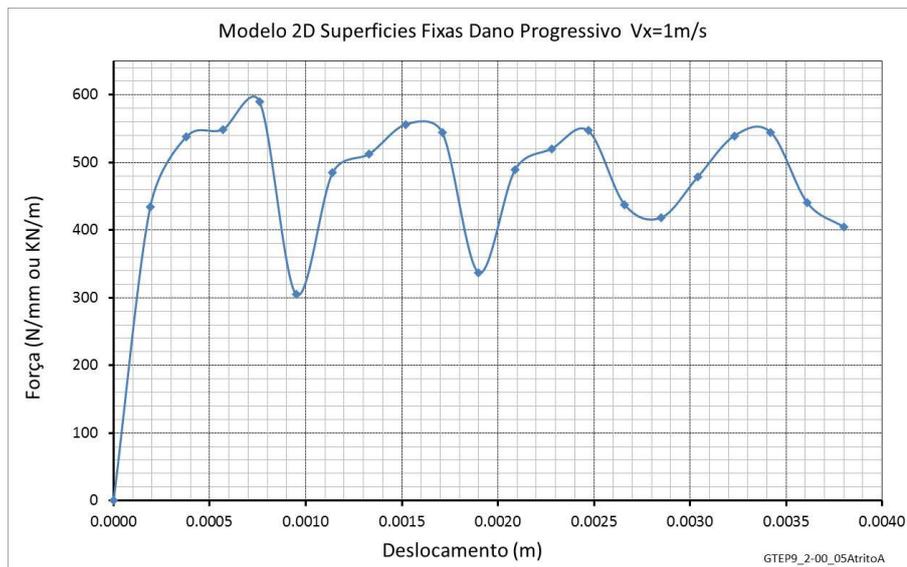


Figura 4.4: Variação da força de corte com o deslocamento do cortador.

4.2.1.2 Modelo GTEP9_2-00_05AtritoTermico:

Para avaliar o efeito da temperatura no corte em metal, foi desenvolvido um modelo combinando o modelo constitutivo de Johnson-Cook e parâmetros de temperatura.

A influência da temperatura na geometria do chip pode ser observada na Figura 4.5. Neste modelo foram implementados os esquemas de “*superfícies fixas*” e dano progressivo. A Figura 50 apresenta as forças obtidas neste modelo, onde é possível observar a redução dos valores da força de corte (a temperatura produz amolecimento do metal) e conseqüentemente redução da MSE, quando comparado com o modelo sem efeito da temperatura.

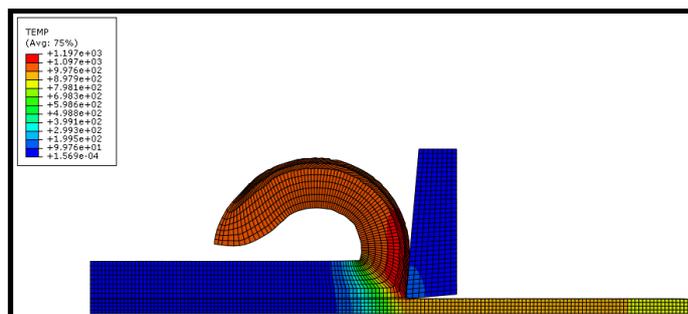


Figura 4.5: Geometria do chip devido o efeito da temperatura.

A Figura 4.6 mostra o efeito da temperatura na variação da força de corte com o deslocamento do corte, considerando a velocidade de corte de 1 m/s e profundidade de corte mantida constante. A MSE calculada para este modelo foi de 576.65 Mpa.

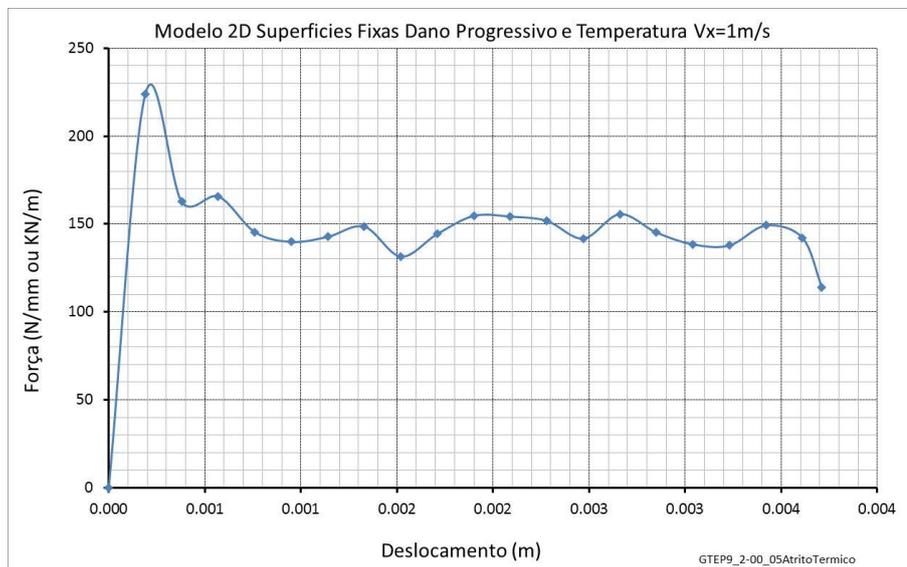


Figura 4.6:2 Efeito da temperatura na variação da força de corte com o deslocamento do cortador.

4.2.1.3

Modelos GTEP9_2-00_05AtritoAERODEa, GTEP9_2-00_05AtritoAERODEb1, GTEP9_2-00_05AtritoAERODEbOriginl:

Todos estes modelos foram implementados com o modelo com erosão. Somente o modelo GTEP9_2-00_05AtritoAERODEa tem dano imediato, os demais modelos apresentam uma função de dano progressivo, onde o modelo GTEP9_2-00_05AtritoAERODEb1 foi o mais “resistente” dos modelos com erosão. Este modelo apresentou valores de forças de corte próximas do modelo de “*superfícies fixas*”, como esperado, pois foi implementado com uma função de dano igual aos modelos de erosão.

As Figuras 4.8 apresentam gráficos da variação da força de corte com o deslocamento e a Tabela 4.4 apresenta os valores da MSE calculados.

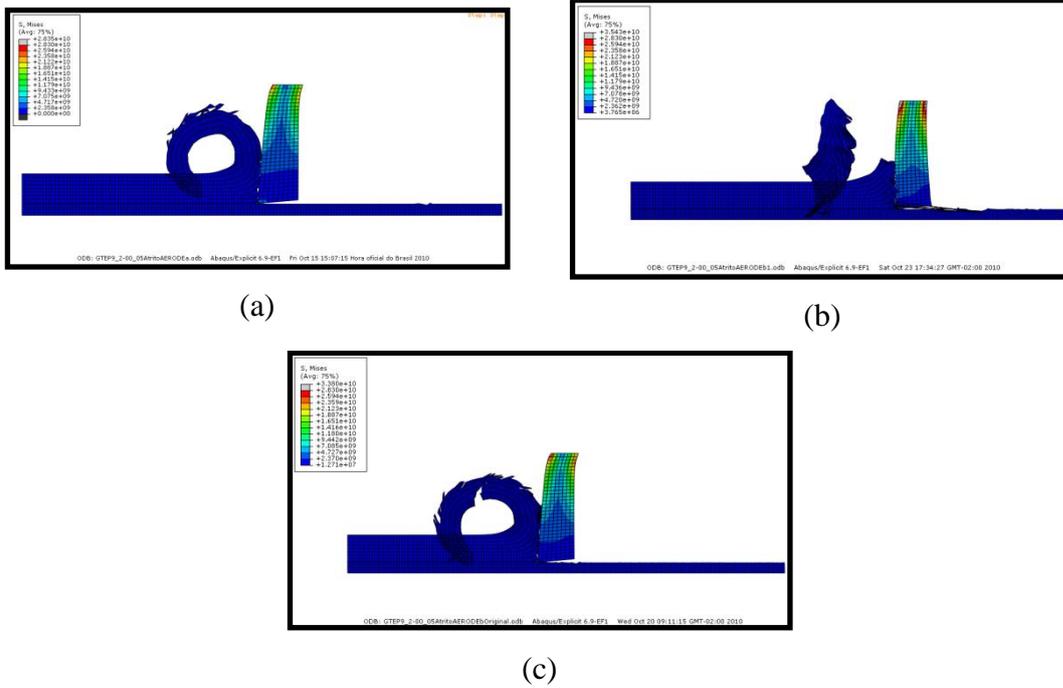


Figura 4.7: (a) GTEP9_2-00_05AtritoAERODEa, (b) GTEP9_2-00_05AtritoAERODEb1, (c) GTEP9_2-00_05AtritoAERODEbOriginal

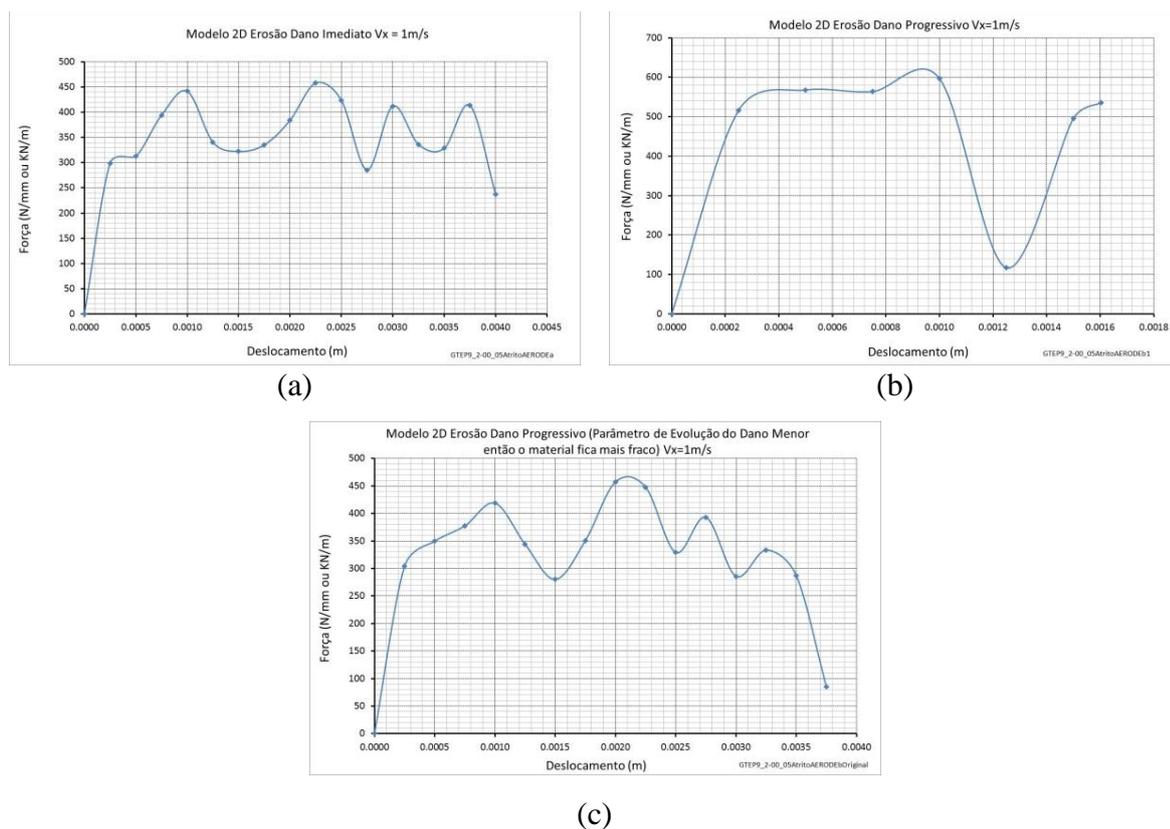


Figura 4.8: Forças vs. deslocamentos (a) GTEP9_2-00_05AtritoAERODEa, (b) GTEP9_2-00_05AtritoAERODEb1, (c) GTEP9_2-00_05AtritoAERODEbOriginal

Tabela 4.4. MSE para os modelos GTEP9_2-00_05AtritoAERODEa, GTEP9_2-00_05AtritoAERODEb1, GTEP9_2-00_05AtritoAERODEbOriginl.

Modelo	MSE Area sob a Curva
	(MPa)
GTEP9_2-00_05AtritoAERODEa	1374.147913
GTEP9_2-00_05AtritoAERODEb1	1725.797544
GTEP9_2-00_05AtritoAERODEbOrig	1307.642684

4.2.1.4

Comparação dos resultados de corte em metais 2D:

Com os resultados dos cinco modelos anteriores, foram realizadas comparações de força de corte e MSE, apresentadas nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11.

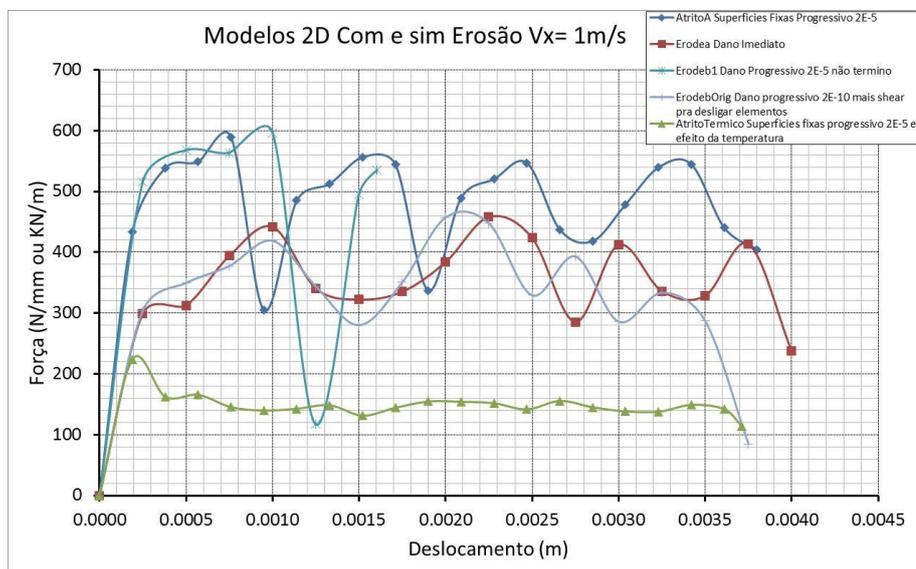


Figura 4.9: Variação da força de corte com o deslocamento do cortador para os cinco modelos.

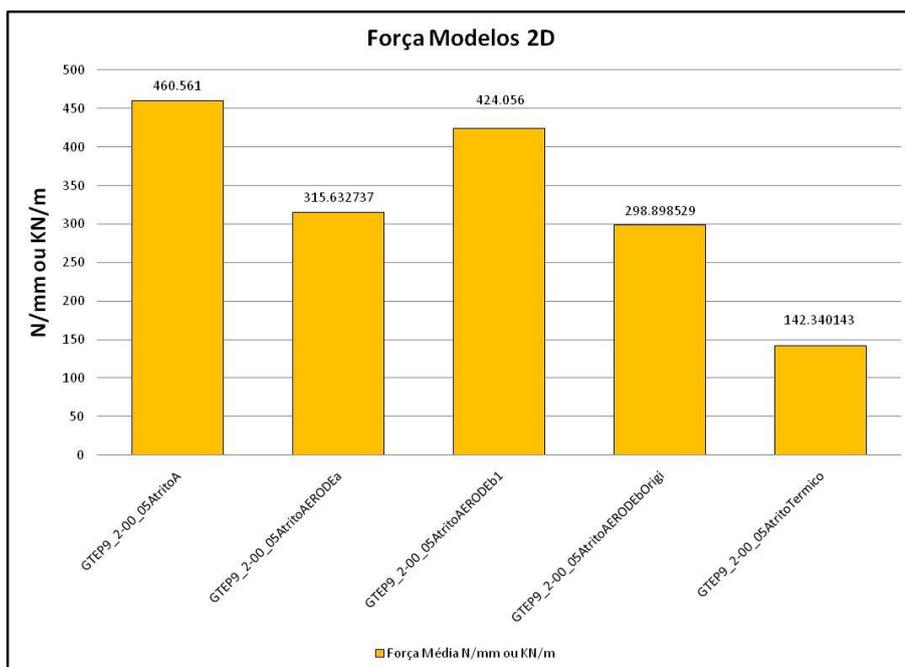


Figura 4.10: Resultados de força para os cinco modelos.

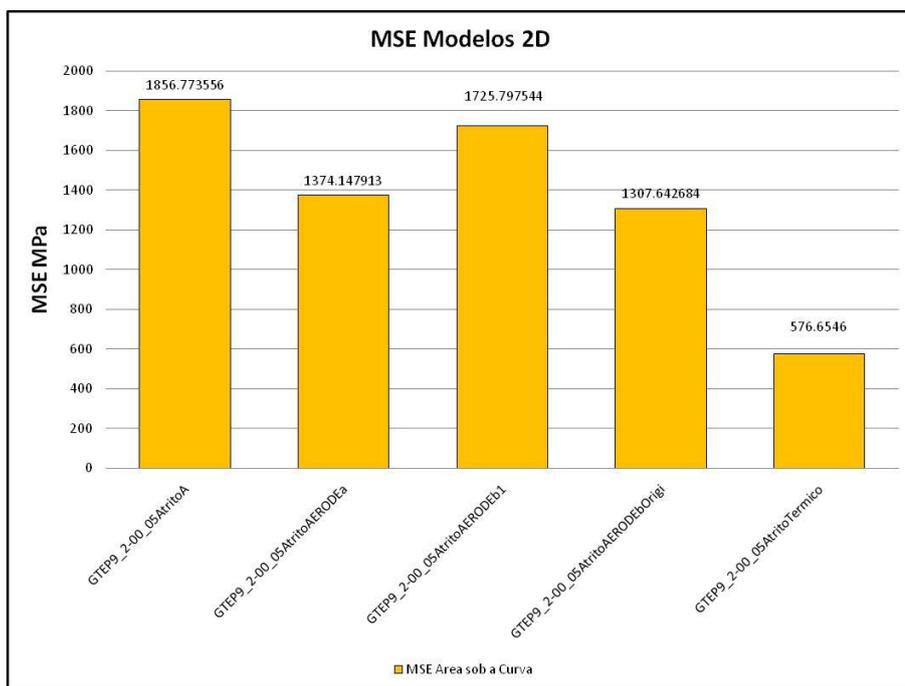


Figura 4.11: Resultados de MSE para os cinco modelos.

Das figuras anteriores pode-se dizer o seguinte:

- O modelo de “*superfícies fixas*” apresenta “maior rigidez”, pois o material é mantido a frente do cortador, enquanto que no modelo de erosão, o material é retirado à medida que o cortador avança.
- Os efeitos da temperatura nas forças de corte, na MSE e na geometria do chip são significantes. Os modelos mostram redução de 70% na MSE e na força de corte.
- Somente os modelos de “*superfícies fixas*” geram chips segmentados ou com forma de dentes numa de suas faces, nos outros modelos os chips foram contínuos.

4.3

Simulação do corte em rocha através do modelo de plasticidade de Drucker-Prager

As simulações de corte em rocha foram realizadas inicialmente com um modelo 2D com duas discretizações de malha, grossa e refinada, e considerando ainda duas condições de pressão de confinamento, 0 e 10 MPa. As demais características dos modelo 2D foram mantidas constantes.

Os modelos 3D de corte em rocha também foram executados para duas discretizações de malha, grossa e refinada, e duas condições de pressão de confinamento (0 e 10 MPa), mantendo também as demais características constantes do modelo.

A velocidade de corte adotada foi de 3m/s e todos os modelos utilizaram o esquema de modelo com erosão.

Na falta de dados de ensaios para a lei de Drucker-Prager, foi realizada uma aproximação dos dados de entrada necessários para o modelo através de uma retroanálise utilizando o próprio programa Abaqus. A retroanálise foi realizada simulando ensaios triaxiais de uma rocha submetida a pressões de confinamento de 0, 3.44, 10, 34.3 e 40 MPa.

Na Figura 4.14 (a) são mostradas as malhas de elementos finitos utilizada para simular o ensaio triaxial no programa Abaqus. Para simplificar o modelo, foi utilizado o estado axissimétrico, considerando apenas um elemento. A simulação foi realizada em duas etapas, primeiro foi aplicado a pressão de confinamento na

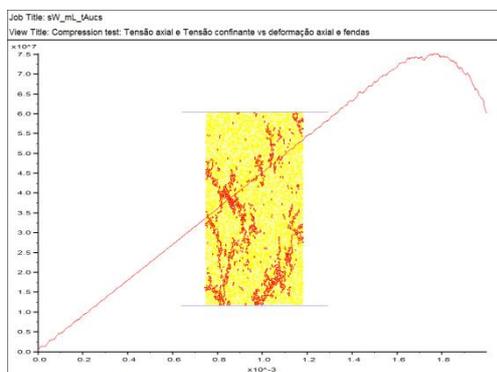
face superior e lateral do modelo, em seguida a tensão desviadora foi aplicada no topo do modelo.

Para introduzir a lei de Drucker-Prager na simulação são necessários, inicialmente, três parâmetros básicos: módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e ângulo de dilatância (ψ). Na lei de Drucker-Prager, quando um critério exponencial é adotado para definir a função de plastificação, torna-se necessário introduzir uma tabela contendo duas colunas, a primeira com a pressão de confinamento e a segunda com a tensão de escoamento.

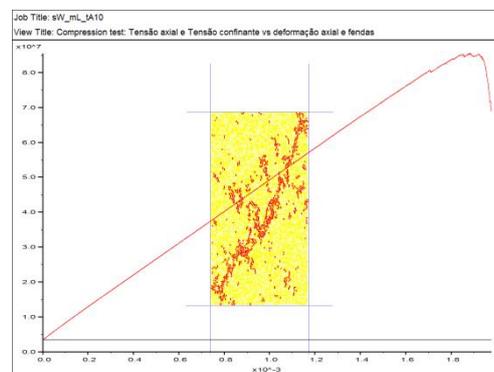
Os dados de pressão de confinamento e tensão de escoamento foram obtidos de resultados de ensaios triaxiais numéricos realizados no programa PFC2D (método dos elementos discretos – Itasca) pelo Grupo de Tecnologia e Engenharia de Petróleo (GTEP). As Figuras 4.12 (a) apresentam curvas tensão axial x deformação axial para o mármore de Cartago, obtidas do ensaio triaxial numérico realizado no programa PFC2D, para diferentes pressões de confinamento. As Figuras 4.12 (b) mostram como o conjunto de dados de tensões de escoamento (yield stress) para diferentes pressões de confinamento foi obtido, a partir dos resultados das curvas tensão axial x deformação axial.

O critério exponencial da função de plastificação é definido no programa Abaqus através da função (*DRUCKER PRAGER, shear criterion=exponent form, test data), que permite introduzir a função de plastificação do modelo através de dados experimentais (curvas tensão-deformação).

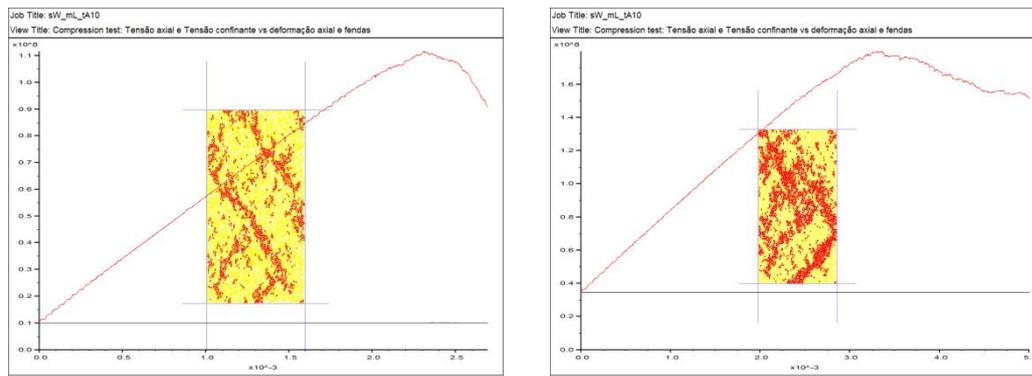
A Figura 4.14 (b) mostra as superfícies de plastificação obtidas dos dados experimentais e da aproximação do programa Abaqus, que utilizou o critério exponencial.



0 MPa

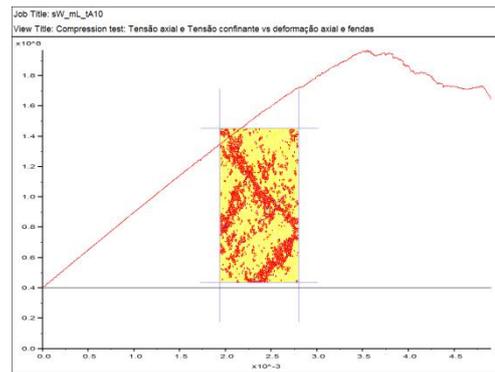


3.44 MPa



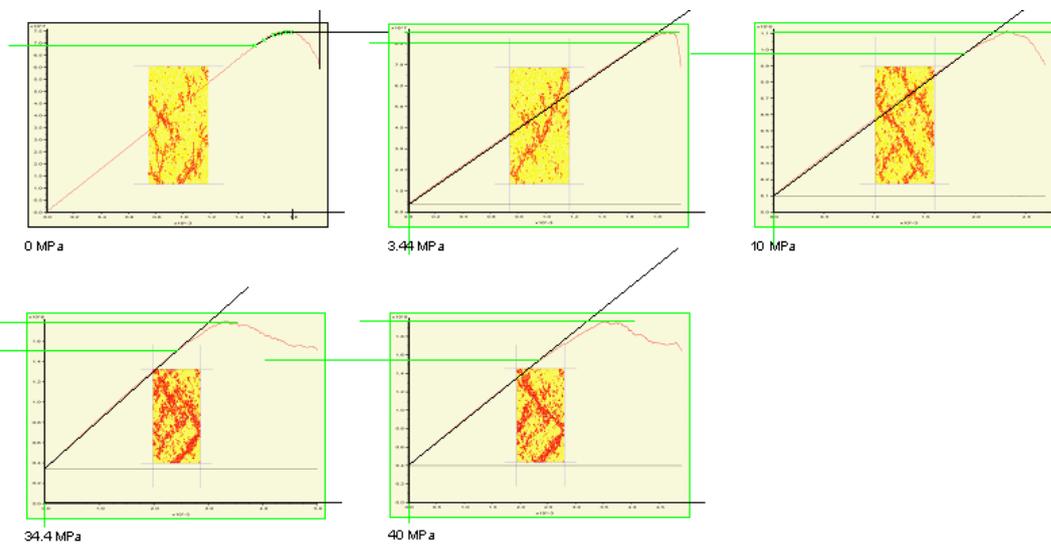
10 MPa

34,3 MPa



40 MPa

(a)



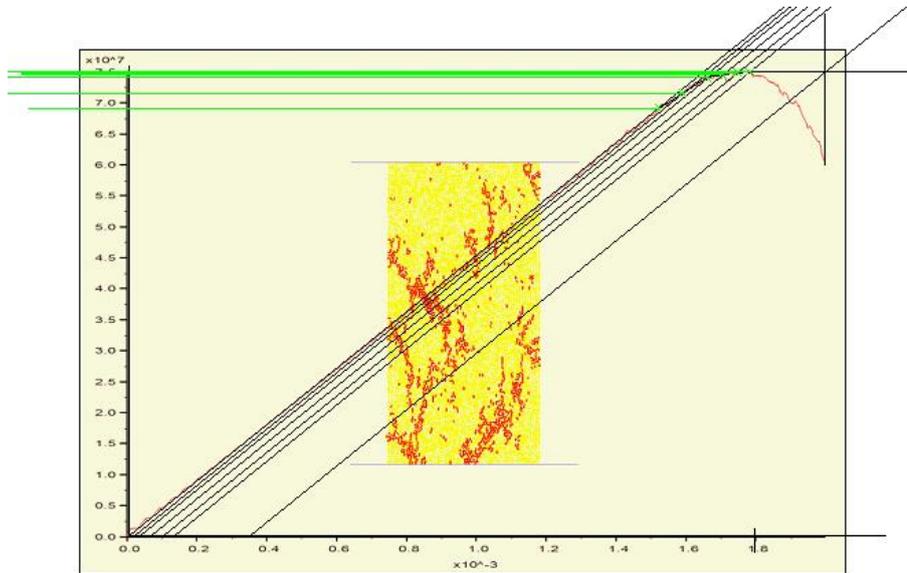
(b)

Figura 4.12: Curvas tensão-deformação obtidas de ensaios numéricos no programa PFC2D para o Mármore de Cartago para diferentes pressões de confinamento.

No programa Abaqus, uma lei de endurecimento pode ser introduzida na lei de plasticidade de Drucker-Prager através da função *DRUCKER PRAGER

HARDENING. O endurecimento pode ser dependente da taxa de deformação, porém esta dependência não foi implementada nos modelos estudados. Assim, quando este parâmetro é omitido, o modelo de endurecimento não é dependente da taxa de deformação.

Para introduzir a lei de endurecimento no modelo de plasticidade, é necessário montar uma tabela contendo na primeira coluna a tensão de escoamento e na segunda coluna, a correspondente deformação plástica. Portanto, o endurecimento (hardening) foi obtido da curva tensão-deformação para 0 MPa de pressão de confinamento. A Figura 4.13 mostra como os dados foram obtidos da curva tensão-deformação, para cada tensão escoamento (linha verde), uma deformação plástica correspondente foi tomada da curva.



0 MPa

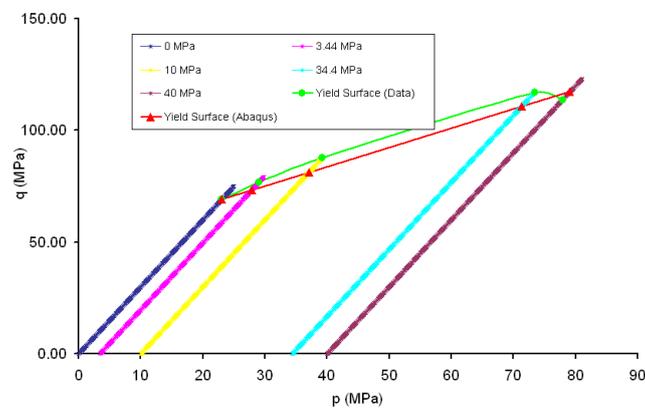
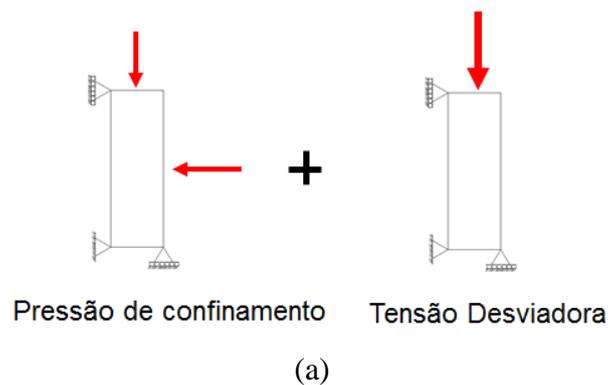
Figura 4.13: Dados obtidos para calibração da lei endurecimento da lei de Drucker-Prager para o Mármore de Cartago.

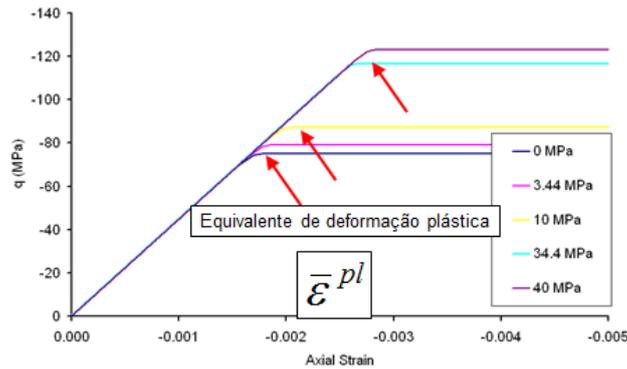
Na lei de Drucker-Prager está implementada um modelo de ruptura e dano progressivo, que permite especificar um ou mais critérios de início do dano (dúctil, cisalhamento e outros), porém, neste trabalho foi empregado apenas o critério dúctil. Depois do início do dano, a rigidez do material é reduzida progressivamente de acordo com a evolução de dano especificada. Neste modelo, os elementos que atingem o dano podem ser retirados ou mantidos na malha de

elementos finitos. Contudo, numa simulação de corte é necessário que os elementos sejam retirados da malha para simular o processo de raspagem de uma broca PDC.

Para definir o início do dano é utilizada a função (*Damage Initiation, criterion=Ductile). O critério Ductile especifica o início do dano através de uma tabela de duas colunas, na primeira coluna é introduzida a deformação plástica equivalente e na segunda a tensão triaxial ($-p/q$).

Neste trabalho, a deformação plástica equivalente no início do dano foi obtida através da Figura 4.14 (c), e corresponde à deformação plástica ao atingir a tensão constante. Os valores de deformação plástica equivalente e tensão triaxial ($-p/q$) foram obtidas para as pressões de confinamento de 0, 3.44, 10, 34.3 e 40 MPa.





(c)

Figura 4.14: Desenvolvimento da lei de Drucker-Prager. (a) Malha de elementos finitos para discretizar a amostra de rocha, (b) Gráfico p-q com as superfícies de plastificação experimental e ajustada pelo programa Abaqus e (c) Curvas tensão-deformação utilizadas para obter os valores de deformação plástica equivalente no início do dano.

Assim, a lei de Drucker-Prager foi implementada nos arquivos de entrada do programa Abaqus utilizando os parâmetros obtidos do ensaio triaxial numérico (retroanálise). Nos modelos simulados não foi considerado o modelo de dano progressivo.

A malha grossa de elementos finitos do modelo 2D, chamada de SC_2D1, é apresentada na Figura 4.15. A ferramenta foi discretizada com 55 nós e 40 elementos do tipo CPE4R (quatro nós bilinear, integração reduzida e controle de hourglass) e a peça com 444 nós e 396 elementos CPE4R. Este modelo foi chamado de SC_2D1.

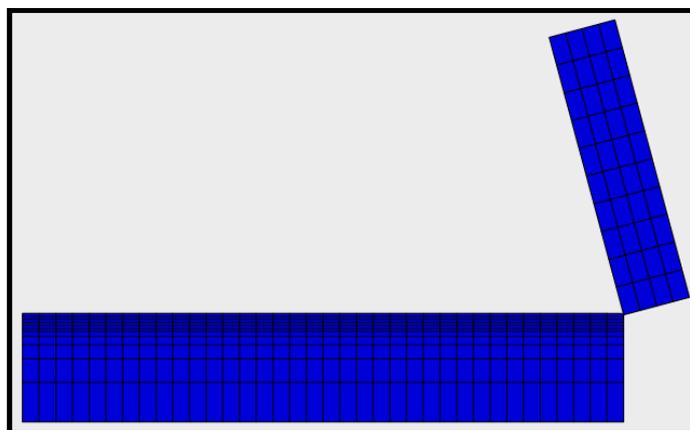


Figura 4.15: Malha grossa de elementos finitos para os modelos SC_2D1_(0 e 10 MPa).

Na figura 4.16 é apresentada a malha de elementos finitos do modelo 2D com malha refinada, chamada de SC_2D3. A ferramenta foi discretizada com 55 nós e 40 elementos CPE4R e a peça com 1308 nós e 1188 elementos CPE4R.

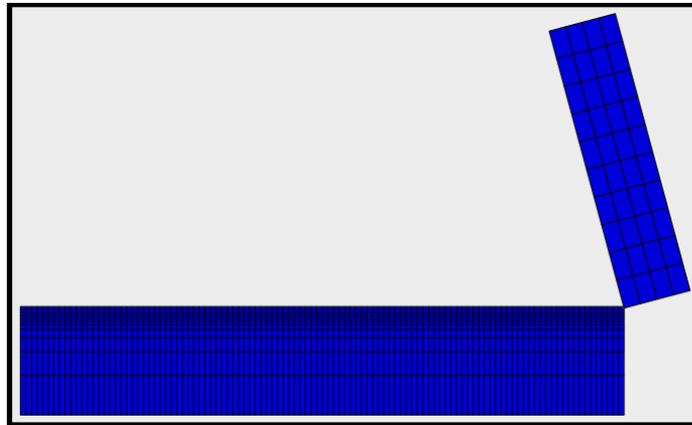


Figura 3: Malha refinada de elementos finitos para os modelos SC_2D3_(0 e 10 MPa)

Na tabela 4.5 é apresentado um resumo das principais características geométricas dos modelos 2D.

Tabela 4.5: Dados da geometria dos modelos SC_2D.

SC_2D(1-3)_(0-10)	
Profundidade de corte	0.0008 m
Ângulo de Corte (Rake Angle)	-15°
Velocidade de corte	3 m/s
Comprimento da amostra	0.0265 m
Altura da amostra	0.0048 m

De forma semelhante, os modelos 3D foram discretizados com duas malhas, grossa e refinada. O modelo de malha grossa é mostrado na Figura 4.17, sendo chamado de SC_Cir10. O modelo foi discretizado com 5289 nós e 4280 elementos, destes 3960 elementos são do tipo C3D8 (8-node linear brick) e 320 elementos são C3D6 (6-node linear triangular prism).

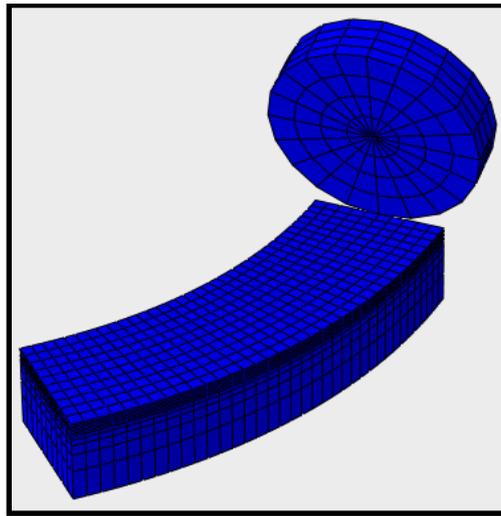


Figura 4.17: Malha grossa de elementos finitos utilizada nos modelos SC_Cir10_(0 – 10) MPa

A malha refinada, mostrada na Figura 4.18, possui a mesma geometria do modelo anterior. O modelo foi discretizado com 10041 nós e 8240 elementos, destes 7920 elementos são do tipo C3D8 (8-node linear brick) e 320 elementos são C3D6 (6-node linear triangular prism). Este modelo foi chamado de SC_Cir11.

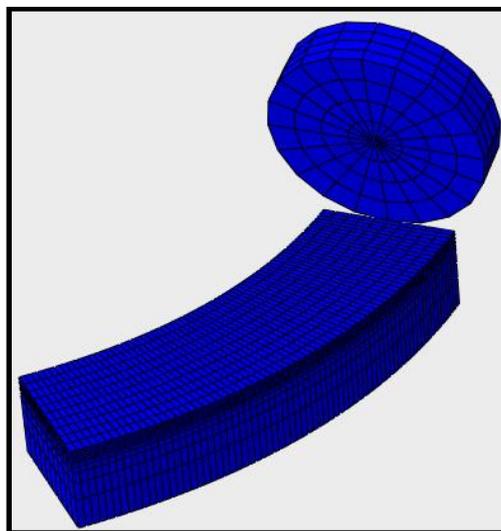


Figura 4: Malha “fina” de elementos finitos utilizada nos modelos SC_Cir11_(0 – 10) MPa.

Na tabela 4.6 é apresentado um resumo das principais características geométricas dos modelos 3D.

Tabela 4.6: Parâmetros da geometria dos modelos SC_Cir.

SC_Cir(10-11)_(0 - 10)	
Profundidade de corte	0.0008 m
Ângulo de Corte (Rake Angle)	-15°
Velocidade de corte	3 m/s
Comprimento da amostra	0.0265 m
Altura da amostra	0.0048 m
Largura da amostra	0.00801m
Raio de Corte	0.0337 m

Na tabela 4.7 é apresentado um resumo das características gerais dos modelos que foram executados para corte em rocha.

Tabela 2.7: Principais características geométricas e parâmetros dos modelos 2D e 3D para o corte em rocha com pressão de confinamento de 0 e 10 MPa.

Arquivo	Tipo	Geom.	Dano	Produtos	V _x	V _y	P _c
SC_2D1_0	Erode	2D	Progressivo (1E-18)	Forças e MSE	3m/s	0.15m/s	0 - 0.0008 m
SC_2D1_10	Erode	2D	Progressivo (1E-18)	Forças e MSE	3m/s	0.15m/s	0 - 0.0008 m
SC_2D3_0	Erode	2D	Progressivo (1E-18)	Forças e MSE	3m/s	0.15m/s	0 - 0.0008 m
SC_2D3_10	Erode	2D	Progressivo (1E-18)	Forças e MSE	3m/s	0.15m/s	0 - 0.0008 m
SC_Cir10_0	Erode	3D	Progressivo (1E-18)	Forças e MSE	3m/s	0.15m/s	0 - 0.0008 m
SC_Cir10_10	Erode	3D	Progressivo (1E-18)	Forças e MSE	3m/s	0.15m/s	0 - 0.0008 m
SC_Cir11_0	Erode	3D	Progressivo (1E-18)	Forças e MSE	3m/s	0.15m/s	0 - 0.0008 m
SC_Cir11_10	Erode	3D	Progressivo (1E-18)	Forças e MSE	3m/s	0.15m/s	0 - 0.0008 m

*(V_x e V_y são as velocidades da ferramenta em X e Y respectivamente, P_c é a profundidade de corte em m)

Uma inovação nestes modelos foi a introdução do efeito da pressão de confinamento, portanto o mesmo modelo foi executado sob condições de pressão atmosférica e pressão de confinamento de 10 MPa. Os nomes de arquivos que terminam com 0 e 10 correspondem a pressão de confinamento de 0 e 10 MPa, respectivamente. Por exemplo, o nome do arquivo SC_2D1_0 termina em zero, portanto foi executada a pressão atmosférica, enquanto que o arquivo SC_2D1_10 termina em 10, portanto foi executada a pressão de confinamento de 10 MPa.

A pressão de confinamento foi introduzida no modelo junto com o estado inicial de tensões, utilizando as funções do programa Abaqus *INITIAL CONDITIONS e *DSLOAD.

A pressão de confinamento e o estado inicial de tensões devem estar em equilíbrio. Portanto, são aplicados simultaneamente o estado de tensão utilizando a função *INITIAL CONDITIONS TYPE = STRESS e a pressão exercida pelo peso de lama de perfuração através da função *DSLOAD, aplicada em toda superfície da peça.

4.3.1

Forças e energia (MSE) nos modelos 2D (SC_2D1, SC_2D3) e 3D (SC_Cir10, SC_Cir11):

As forças de corte e a MSE dos modelos 2D e 3D que utilizam a lei de plasticidade de Drucker-Prager foram avaliadas para o volume total de material retirado da peça,. A motivação no desenvolvimento destes modelos foi avaliar o efeito da pressão de confinamento nas forças de corte e na MSE. Os resultados obtidos com estes modelos permitirão compreender e melhorar o processo de corte em rocha em condições atmosféricas e submetido à pressão de confinamento.

4.3.2

Forças, e MSE dos modelos 2D com dano Progressivo parâmetro 1E-18 (SC_2D1_0, SC_2D1_10, SC_2D3_0, SC_2D3_10):

Nestes modelos, a ferramenta (cortador) inicia o corte no topo da peça. A direção do movimento da ferramenta é horizontal e vertical até a metade do comprimento da peça, a partir deste ponto, o movimento é apenas horizontal.

Nestes modelos de corte em rocha foi observado um comportamento de ruptura frágil, diferente do comportamento observado nos modelos de corte em metal, que apresentam uma ruptura dúctil.

Na figura 4.19 são observados os diferentes estágios de avanço do cortador na peça, para o modelo SC_2D1_0, que utiliza a malha grossa e uma pressão de confinamento de 0 MPa,

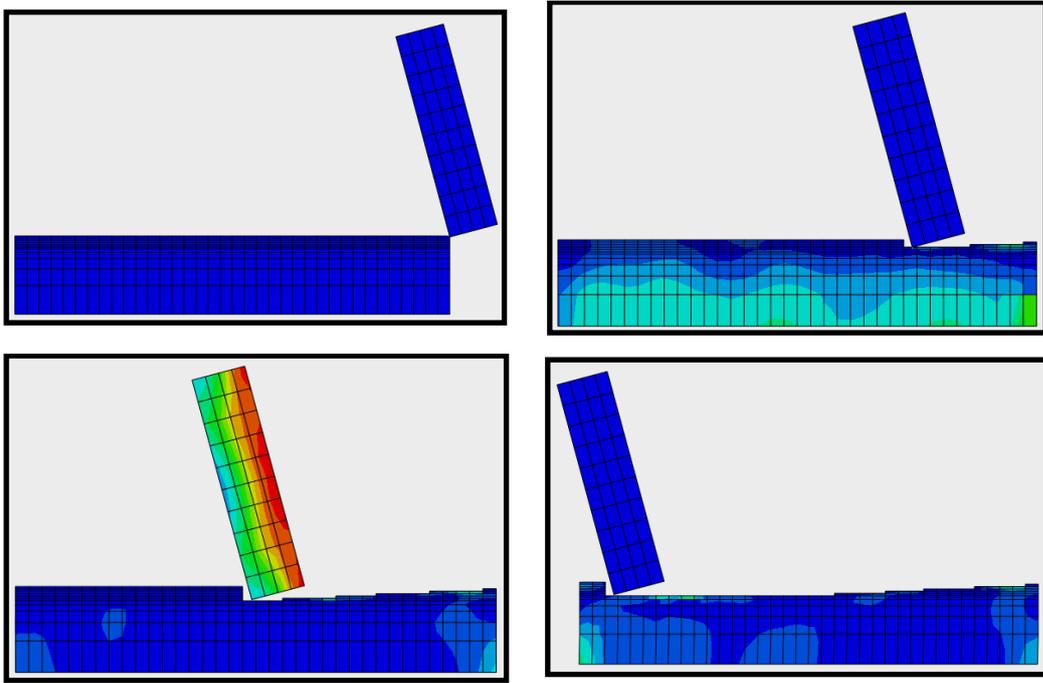
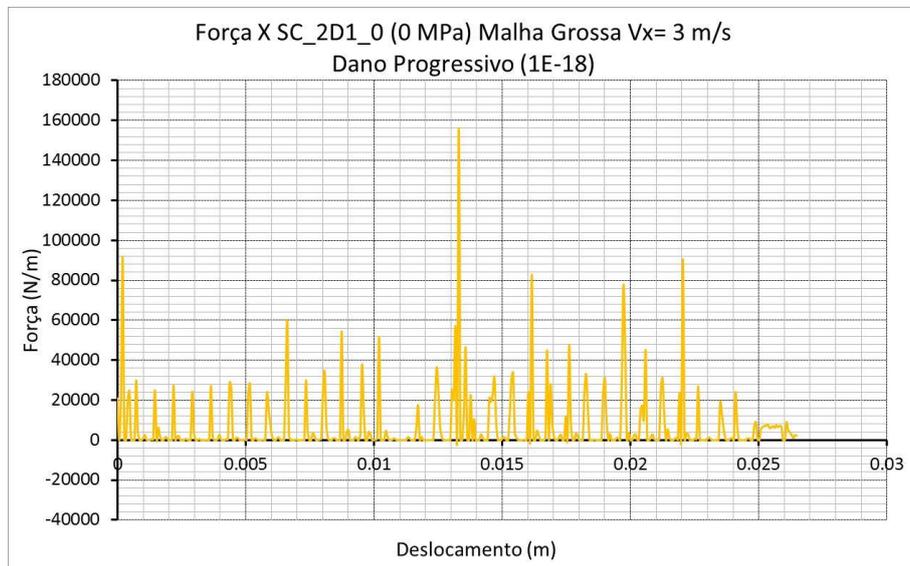
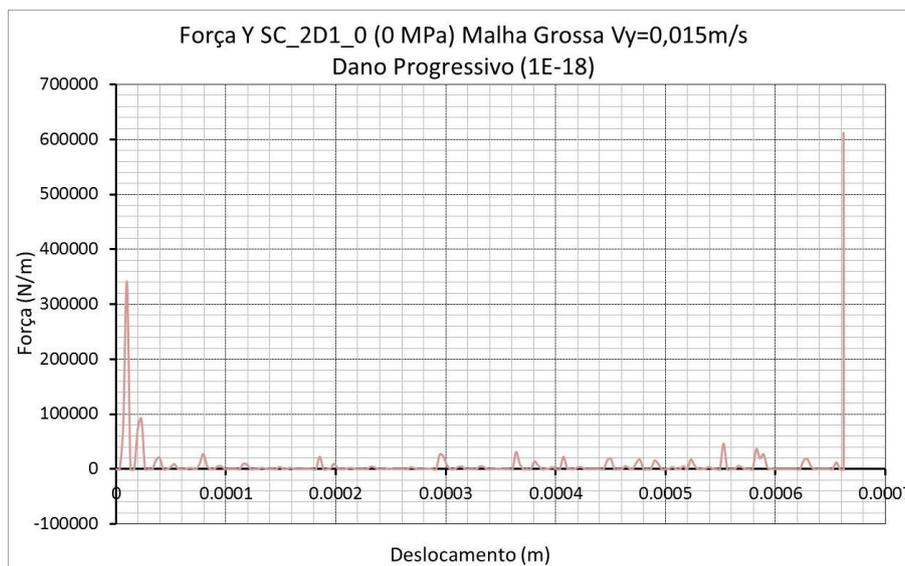


Figura 4.19: Diferentes estágios do modelo 2D SC_2D1_0 com malha grossa e sem pressão de confinamento.

Nas Figuras 4.20 (a) e (b) são plotadas as forças de corte na direção horizontal e vertical, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5: Forças de corte sem pressão de confinamento na direção: (a) horizontal e (b) vertical.

Como é possível observar, as magnitudes das forças de corte apresentam grande variação ao longo da direção do deslocamento da ferramenta. As forças de corte na direção horizontal apresentaram valores maiores, quando comparadas com as verticais. Qualitativamente, a forma das curvas de força de corte são semelhantes aos apresentados nos trabalhos de Jaime et al. (2010) e Tulu et al. (2008).

Com as forças de corte obtidas, foram calculadas as MSE geradas na direção horizontal e vertical. Estes valores foram somados para encontrar a MSE total, que corresponde a 1.15 MPa.

Dos gráficos da Figura 4.20 é possível observar que as forças de corte chegam muitas vezes à zero. Este fato está relacionado à retirada dos elementos que atingiram o dano durante a simulação. Assim, na ausência dos elementos a frente do cortador, não há nenhuma força de resistência ao movimento do cortador, levando à zero a força de corte. Para reduzir este efeito, a malha de elementos finitos deveria ser discretizada com elementos com dimensões próximos aos grãos da rocha.

Na figura 4.21 são apresentados os diferentes estágios do processo de corte do modelo SC_2D1_10. Este modelo é idêntico ao anterior, porém foi aplicado uma pressão de confinamento de 10 MPa,

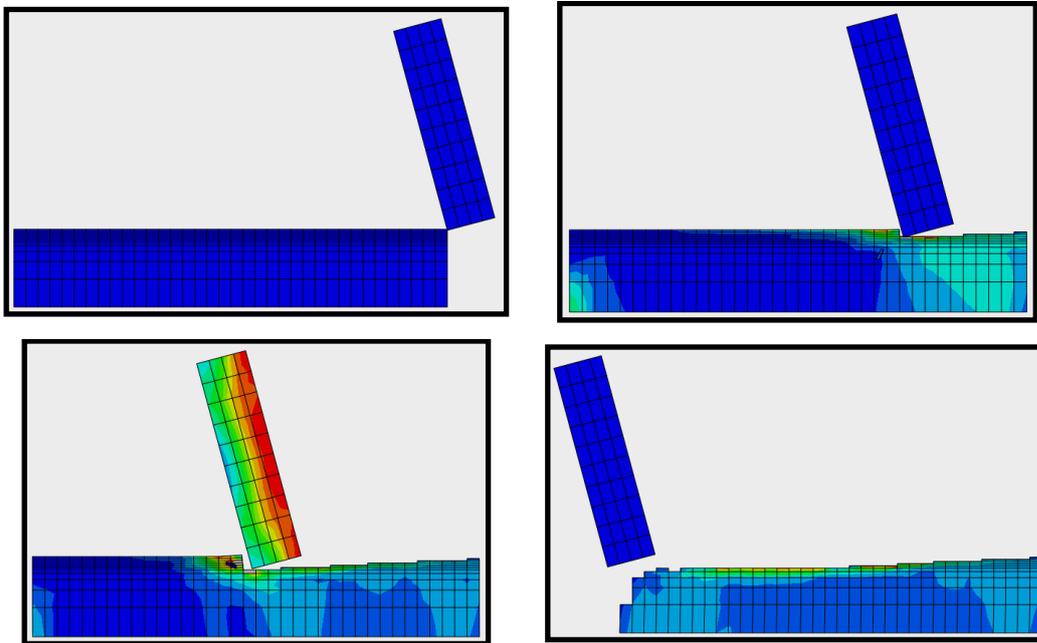
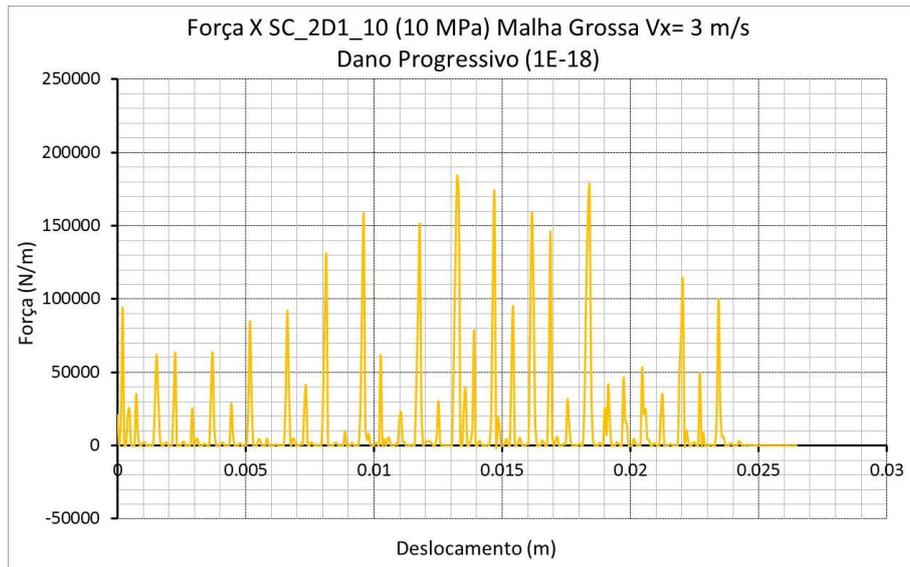
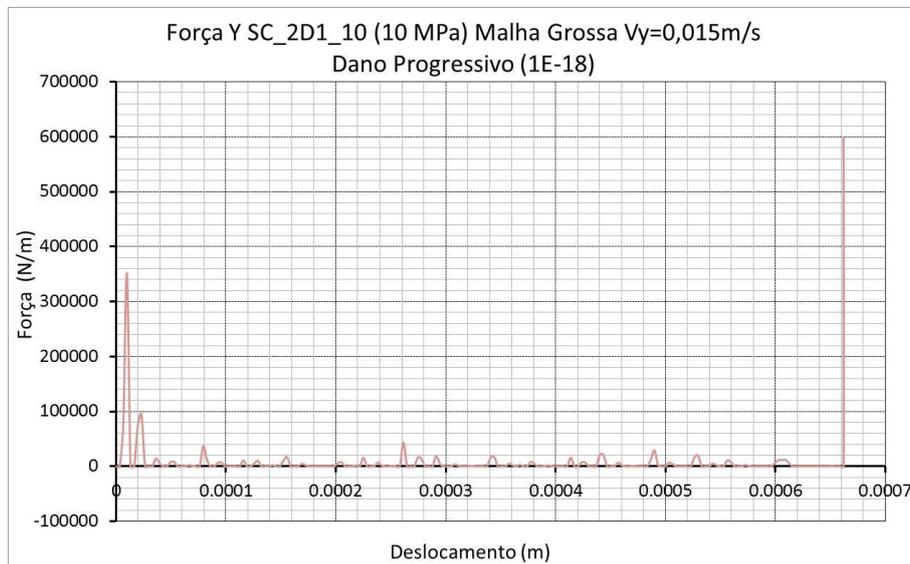


Figura 4.21: Diferentes estágios do modelo 2D SC_2D1_10 com malha grossa e pressão de confinamento de 10 MPa.

Nas Figuras 4.22 (a) e (b) são plotadas as forças de corte na direção horizontal e vertical, respectivamente. A magnitude das forças de corte mostra um aumento devido ao efeito da pressão de confinamento, observada nas curvas de força na direção horizontal e vertical. Neste modelo a MSE total calculada foi de 2.25 MPa.



(a)



(b)

Figura 6: Forças de corte com pressão de confinamento na direção: (a) horizontal e (b) vertical.

Na figura 4.23 são apresentados os diferentes estágios de corte do modelo SC_2D3_0 que foi discretizado com uma malha mais refinada, porém sem a aplicação da pressão de confinamento.

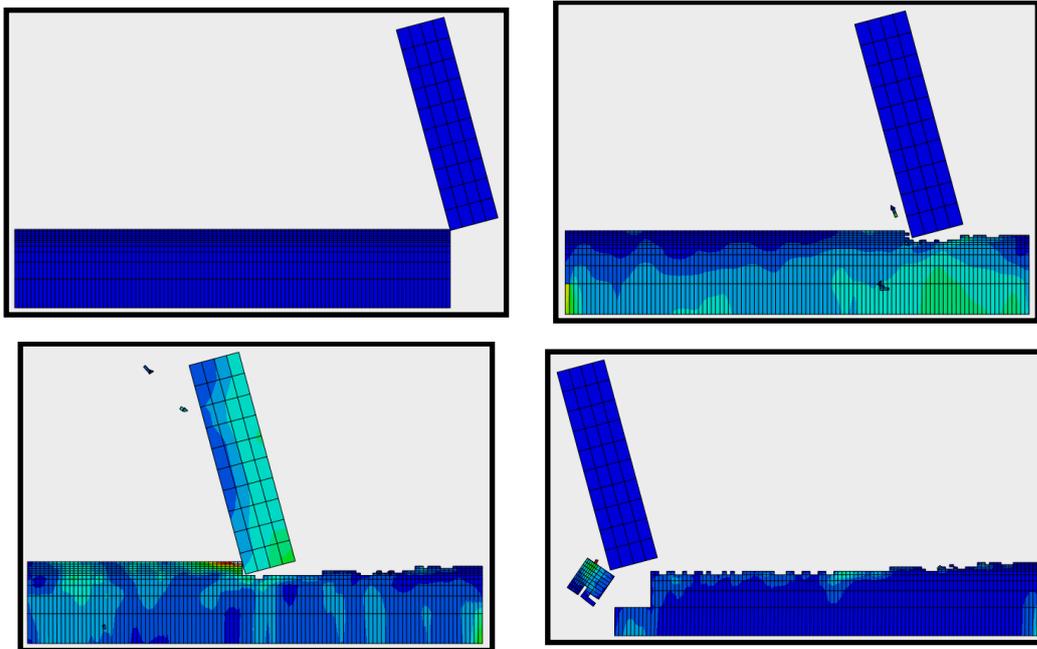
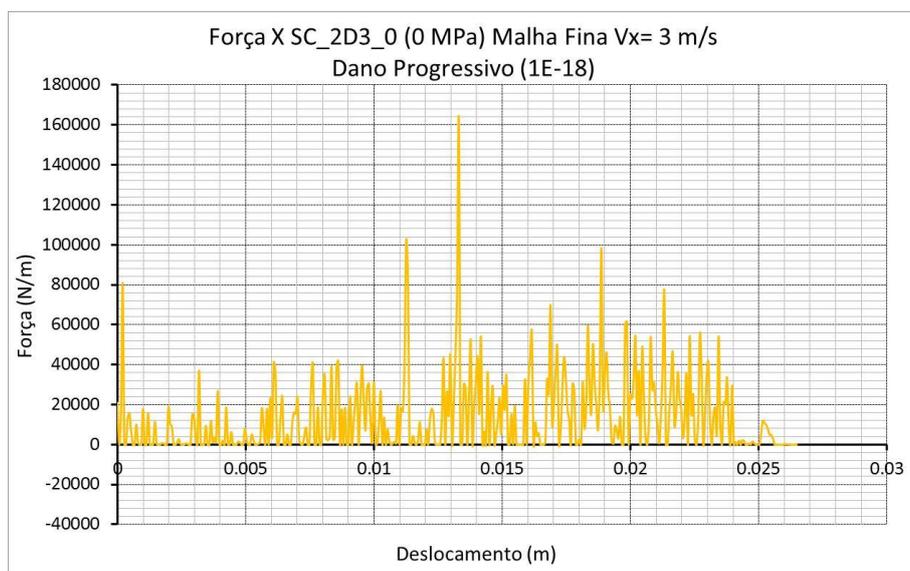
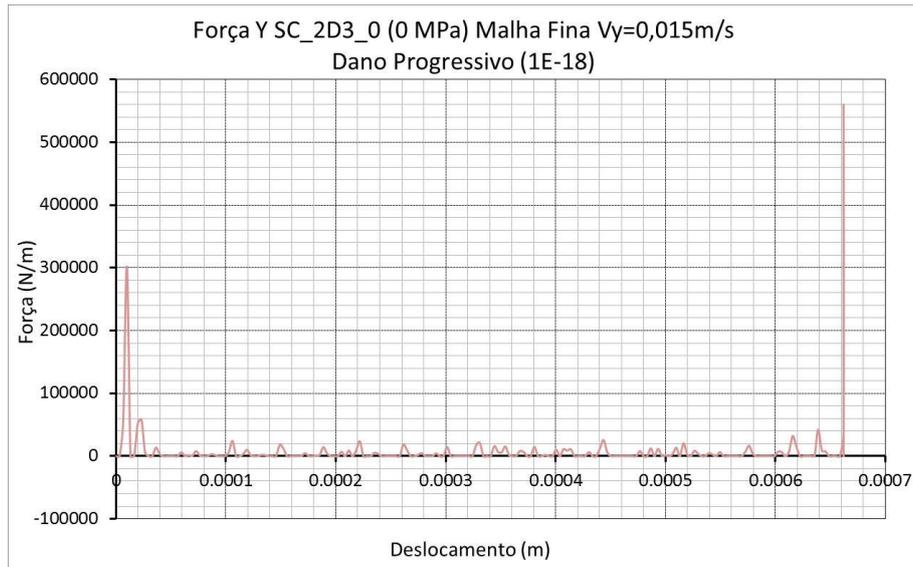


Figura 4.23: Diferentes estágios do modelo SC_2D3_0 com malha refinada e sem pressão de confinamento.

Nas Figuras 4.24 (a) e (b) são plotadas as forças de corte na direção horizontal e vertical, respectivamente. Os gráficos de forças apresentam um maior número de picos de força, que resultam no aumento da área abaixo da curva e consequentemente elevação nos valores da MSE. Para este modelo a MSE total calculada foi de 2.31 MPa.



(a)



(b)

Figura 7: Forças de corte sem pressão de confinamento na direção: (a) horizontal e (b) vertical.

Na figura 4.25 são apresentados os diferentes estágios de corte do modelo SC_2D3_10 que foi discretizado com uma malha mais refinada, além da aplicação da pressão de confinamento de 10 MPa.

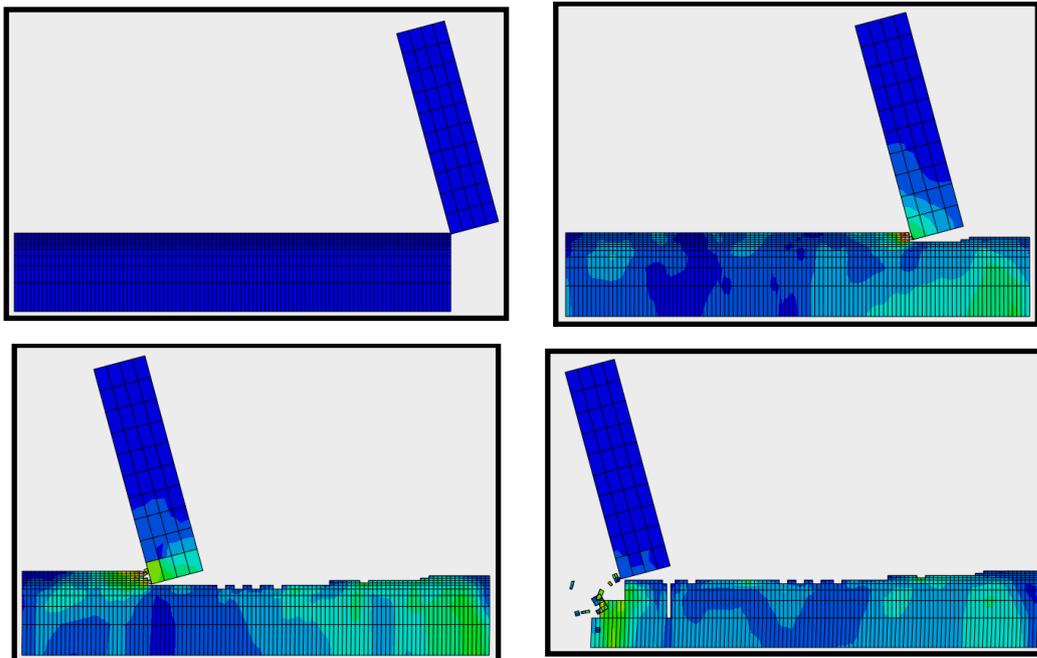
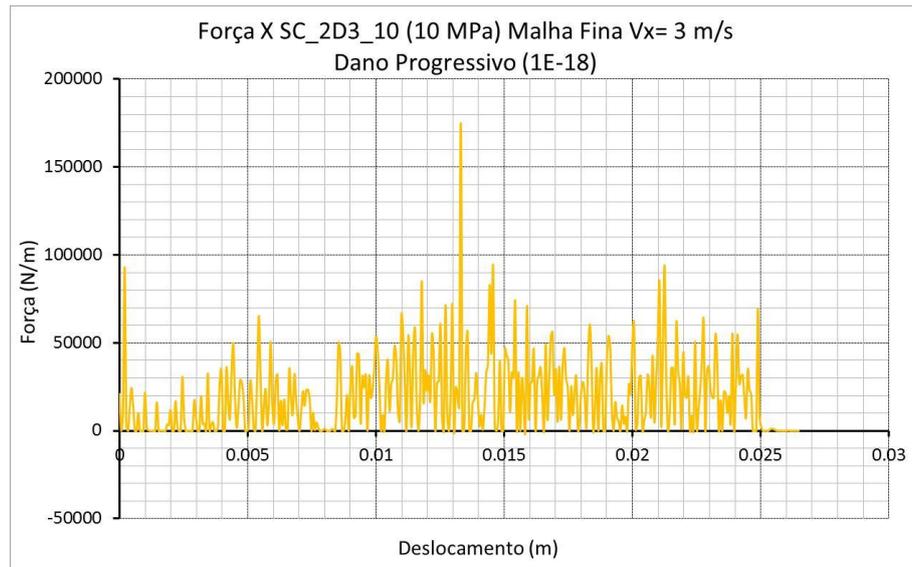
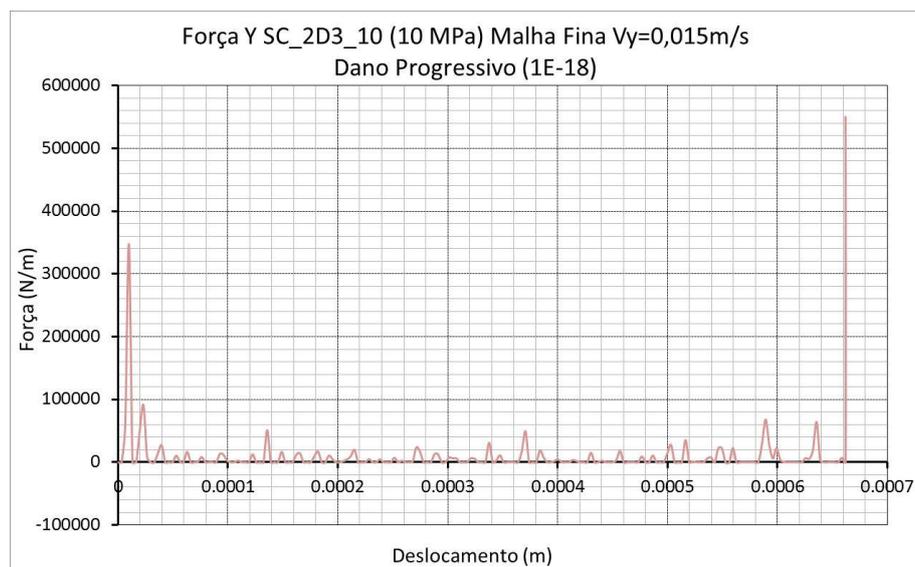


Figura 8: Diferentes estágios do modelo SC_2D3_10 com malha refinada e pressão de confinamento de 10 MPa.

Nas Figuras 4.26 (a) e (b) são plotadas as forças de corte na direção horizontal e vertical, respectivamente. Novamente, a magnitude das forças de corte mostra um aumento devido ao efeito da pressão de confinamento, observada nas curvas de forças na direção horizontal e vertical. Neste modelo a MSE total calculada foi de 3.27 MPa.



(a)



(b)

Figura 9: Forças de corte com pressão de confinamento na direção: (a) horizontal e (b) vertical.

4.3.3

Comparação das forças e MSE dos modelos 2D com dano Progressivo parâmetro $1E-18$ (SC_2D1_0, SC_2D1_10, SC_2D3_0, SC_2D3_10):

Após obter os resultados das forças de corte nas direções horizontais e verticais, foi realizada uma comparação entre os diferentes modelos analisados previamente.

Na figura 4.27 são comparados os resultados de força de corte horizontal de modelos com e sem pressão de confinamento, considerado a discretização de malha grossa SC_2D1.

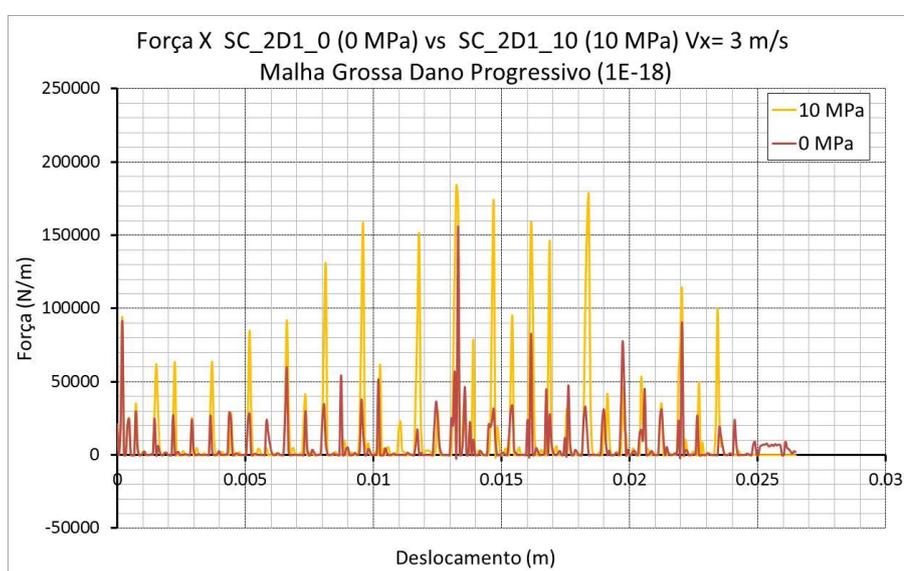


Figura 10: Comparação das forças de corte horizontal para modelos com e sem pressão de confinamento.

Como foi verificado anteriormente, pode-se observar a mudança no comportamento da magnitude das forças de corte nos modelos devido ao efeito exercido pela pressão de confinamento. O modelo que tem pressão confinante diferente de zero apresenta maiores valores de força e conseqüentemente de MSE, como era esperado.

Os mesmos efeitos são constatados nas forças de corte na direção vertical, a comparação é apresentada na Figura 4.28.

A MSE obtida em cada um destes modelos mostra o efeito da pressão de confinamento no mecanismo de corte. Como esperado, para maiores valores de

pressão de confinamento, o cortador precisa de maior energia para fazer o corte. O valor da MSE de cada um dos modelos simulados é mostrado na Figura 139.

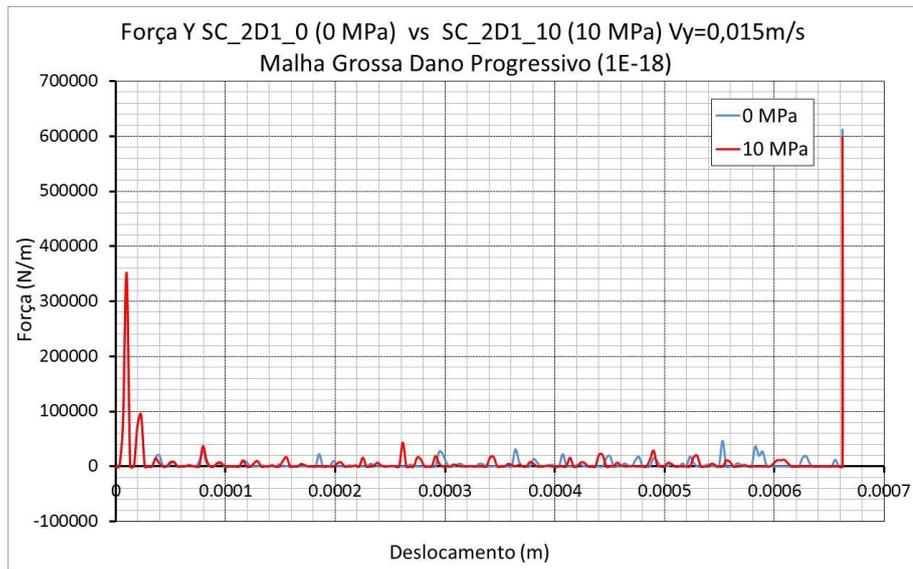


Figura 4.28: Comparação das forças de corte vertical para modelos com e sem pressão de confinamento.

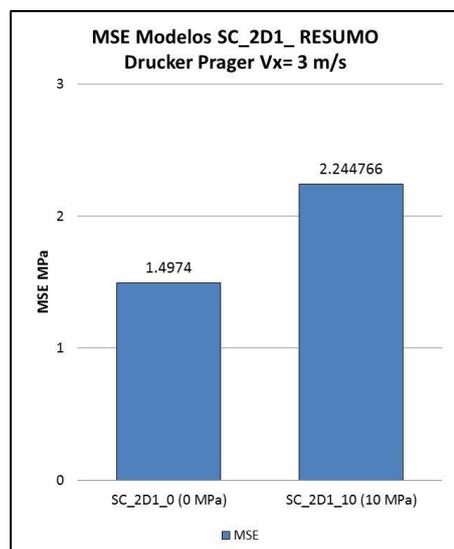


Figura 4.29: Comparação da MSE dos modelos SC_2D1_0 (0 MPa) e SC_2D1_10 (10 MPa) para a malha grossa.

O efeito do refinamento da malha de elementos finitos é mostrado na figura 4.30, onde são comparados os resultados de força de corte horizontal de modelos com e sem pressão de confinamento, para o modelo SC_2D3.

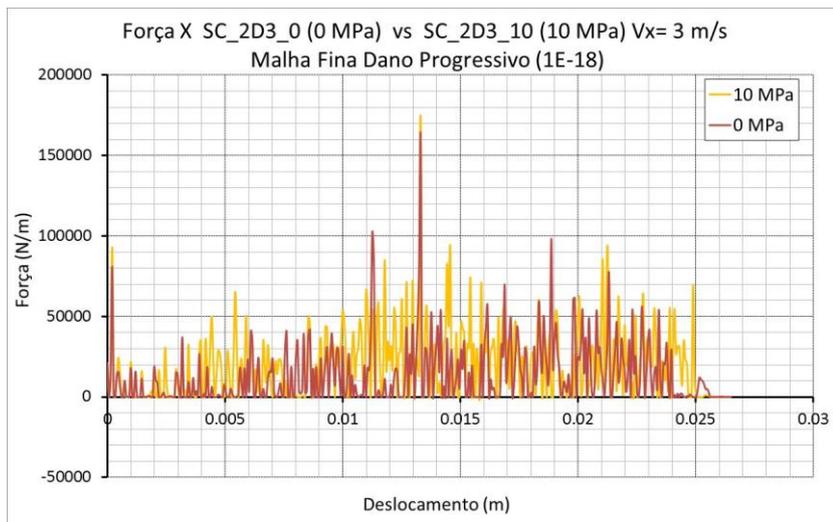


Figura 11: Comparação das forças de corte horizontal para modelos com e sem pressão de confinamento.

No gráfico força x deslocamento da Figura 4.30 é encontrado uma maior densidade de picos de força, quando comparada com a Figura 4.27. O efeito da pressão de confinamento também aparece claramente no gráfico.

O mesmo comportamento é observado nas forças de corte na direção vertical, como mostra a Figura 4.31. Na Figura 4.32 são apresentados os resultados de MSE para cada um dos modelos, com e sem pressão de confinamento.

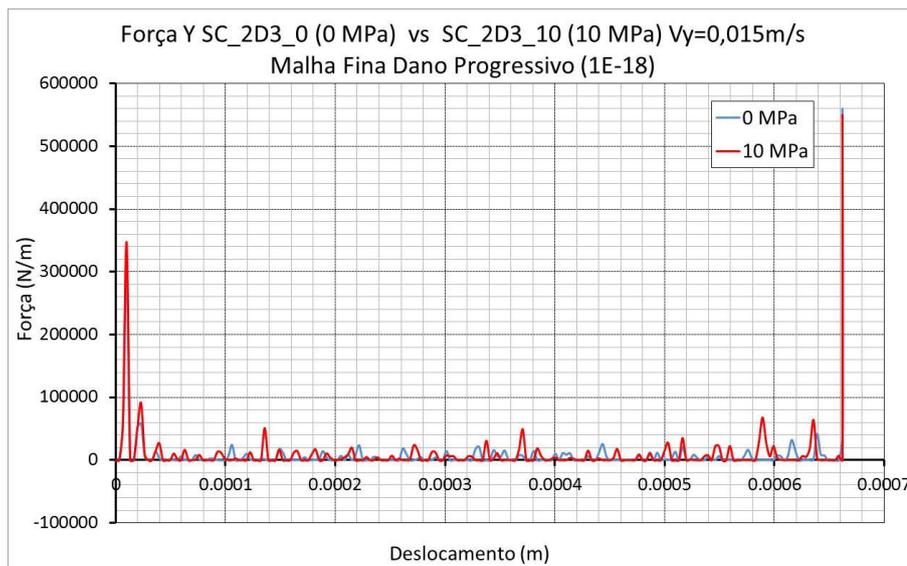


Figura 4.31: Comparação das forças de corte vertical para modelos com e sem pressão de confinamento.

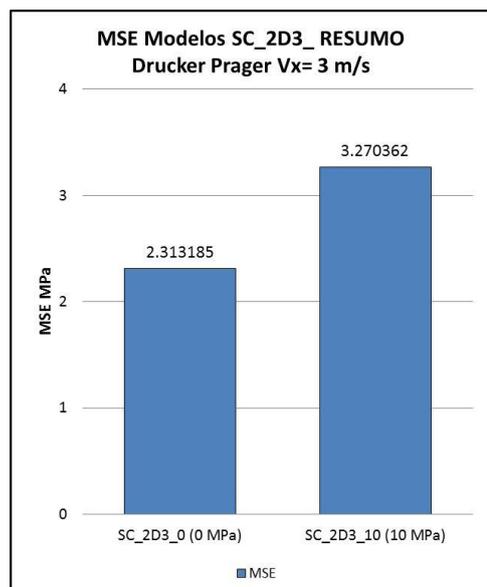
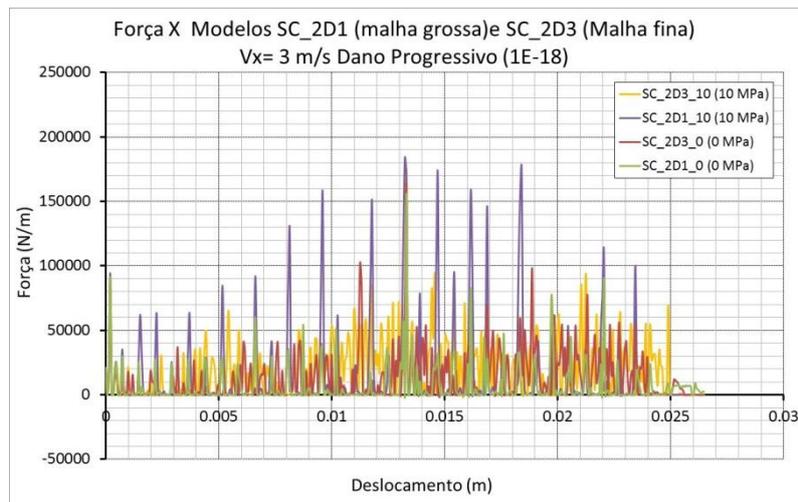


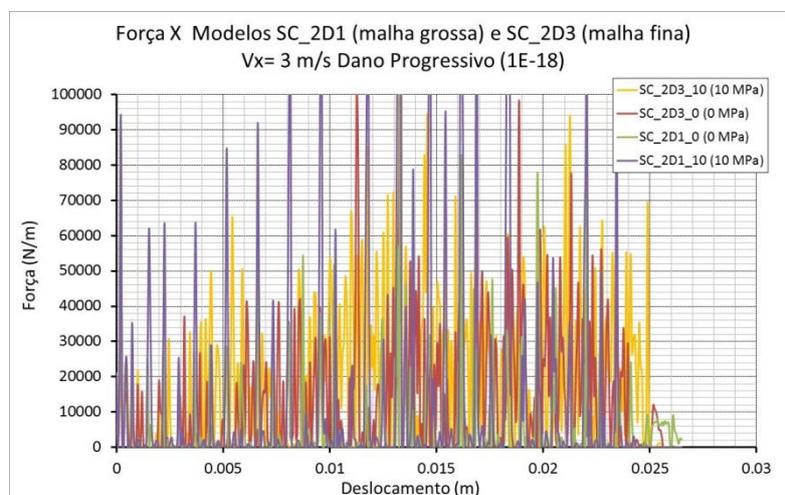
Figura 12: Comparação da MSE dos modelos SC_2D1_0 (0 MPa) e SC_2D1_10 (10 MPa) malha “refinada”.

Comparando os valores de MSE dos modelos de malha grossa e refinada na Figura 4.32, pode-se observar o efeito da discretização no maior valor de MSE. A malha mais refinada mais refinada apresentou maiores valores de MSE, quando comparados com os modelos que utilizaram a malha grossa. Contudo, malhas de elementos finitos mais refinadas elevam o tempo de processamento da análise. Assim, torna-se necessário a busca de uma discretização que combine resultados mais precisos com menor tempo computacional.

Na figura 4.33, são mostrados as comparações das forças na direção horizontal para todos os modelos 2D e na figura 4.34 comparações de MSE, também para todos os modelos 2D. Na Figura 4.33 (b) foi aumentada a escala do gráfico para melhorar a visualização da Figura 4.33 (a).



(a)



(b)

Figura 13: Comparação das forças de corte vertical para modelos com e sem pressão de confinamento (a) escala original e (b) escala ampliada.

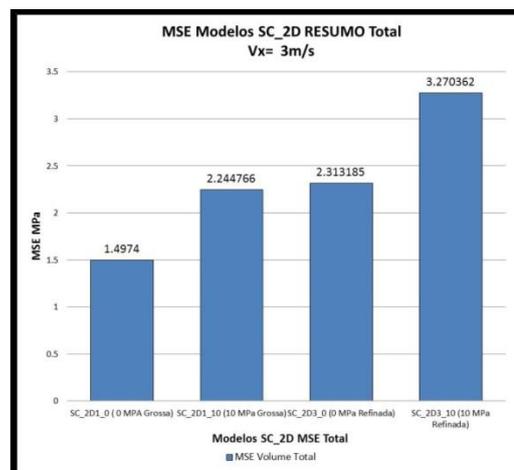


Figura 4.34: Comparação da MSE dos modelos SC_2D1 (0 e 10 MPa malha grossa) e SC_2D3 (0 e 10 MPa malha refinada).

Os resultados da Figura 4.34 comprovam que os modelos implementados no programa Abaqus levam em consideração o efeito da discretização da malha de elementos finitos e o efeito da pressão de confinamento. Os modelos com malhas mais discretizadas e com pressões de confinamento aplicadas apresentaram maiores valores de MSE.

4.3.4

Forças e MSE dos modelos 3D com dano Progressivo parâmetro 1E-18 (SC_Cir10_0, SC_Cir10_10, SC_Cir11_0, SC_Cir11_10):

A lei de Drucker-Prager foi implementada também nos modelos 3D. Semelhante aos modelos 2D, foi adotado um esquema de dano imediato. O esquema de corte também é semelhante aos modelos anteriores, o início do corte ocorre no topo do modelo, posteriormente a ferramenta se desloca na horizontal e vertical até a metade do comprimento da peça, e a segunda metade da peça é percorrida com profundidade constante. Na figura 4.35 são observados os diferentes estágios de avanço do cortador no modelo SC_Cir10_0. O modelo utiliza uma malha grossa e não foi aplicado pressão de confinamento.

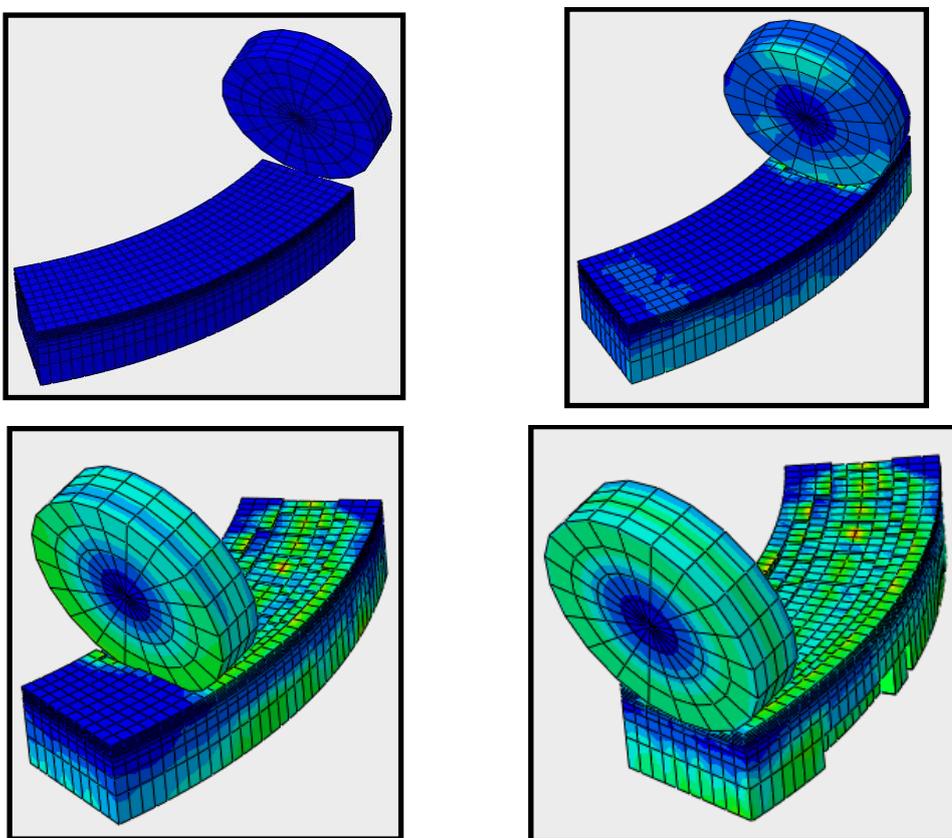
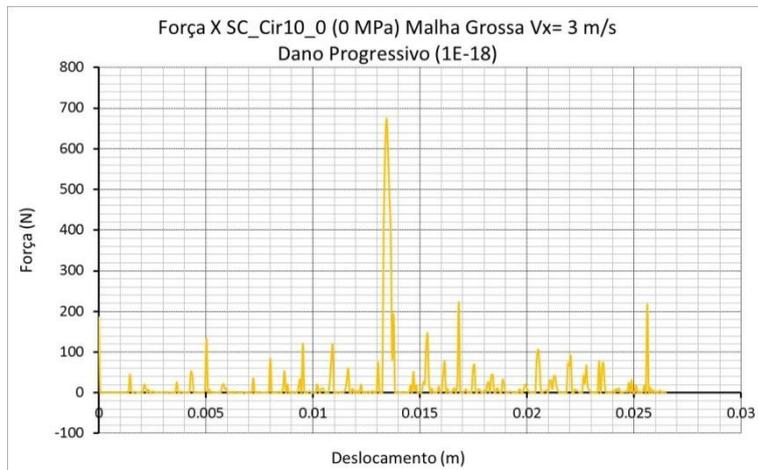
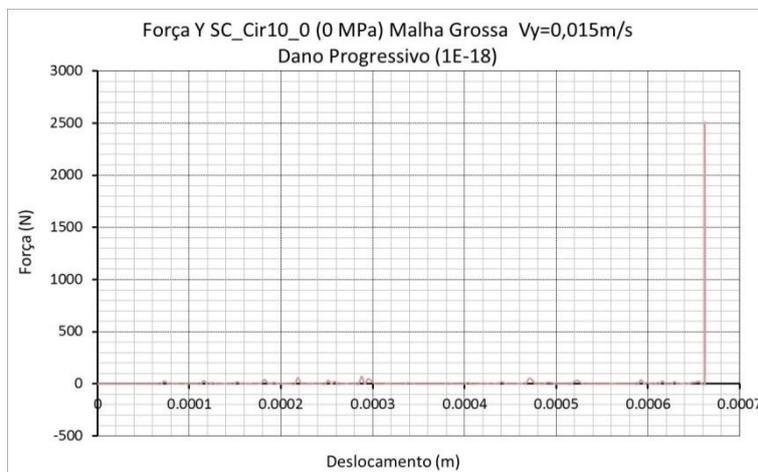


Figura 14: Diferentes estágios do modelo 3D SC_Cir10_0 com malha grossa e pressão de confinamento de 0 MPa.

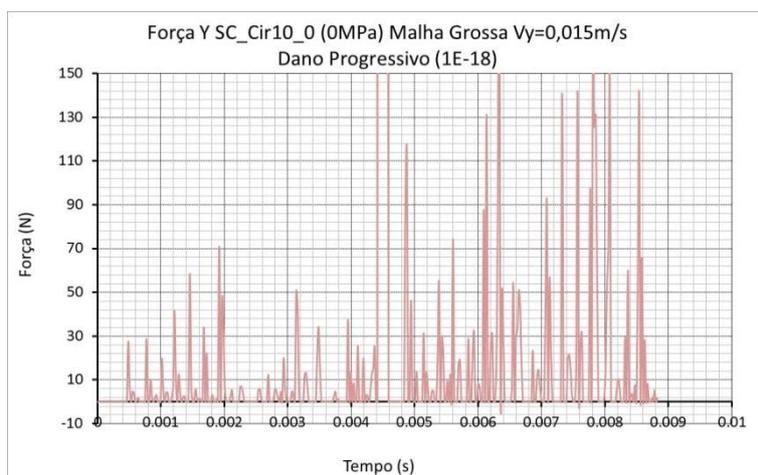
Nas Figuras 4.36 (a), (b) e (c) são plotadas as forças de corte na direção horizontal, na direção vertical e uma ampliação do gráfico das forças na direção vertical, respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.36: Força de corte na direção: (a) horizontal, (b) vertical e (c) ampliação do gráfico da força de corte na direção vertical.

Nos modelos 3D, as forças de corte apresentam também forma semelhante aos encontrados nos trabalhos de Jaime et al. (2010) e Tulu et al. (2008). Neste modelo a MSE total calculada foi de 3.58 MPa.

Nos modelos 3D, as forças também chegam a zero frequentemente, como foi observado nos modelos 2D. Este fato está relacionado à retirada dos elementos que atingiram o dano. Assim, na ausência dos elementos a frente do cortador, não há nenhuma força de resistência ao movimento do cortador, levando à zero a força de corte. Quando o cortador alcança um novo elemento, a força de corte aumenta novamente. Assim, para manter a ferramenta de corte sempre em contato com um elemento, idealmente os elementos devem ter a dimensão dos grãos da rocha.

Na figura 4.37 são observados os diferentes estágios de avanço do cortador no modelo SC_Cir10_10. O modelo utiliza uma malha grossa e sem pressão de confinamento.

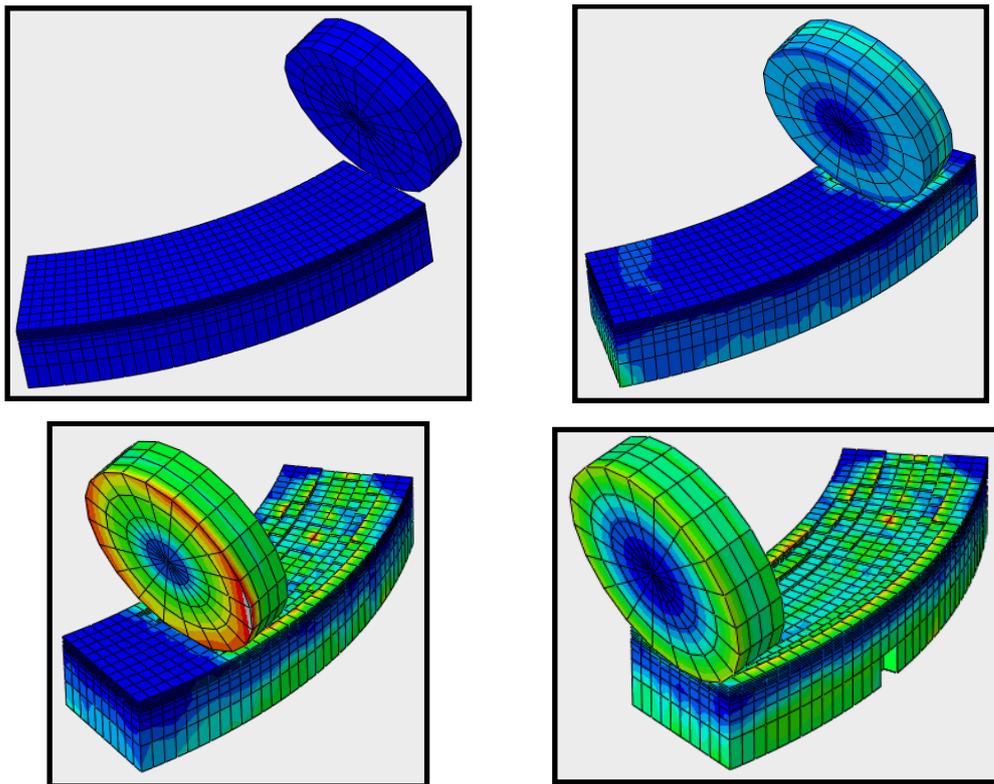
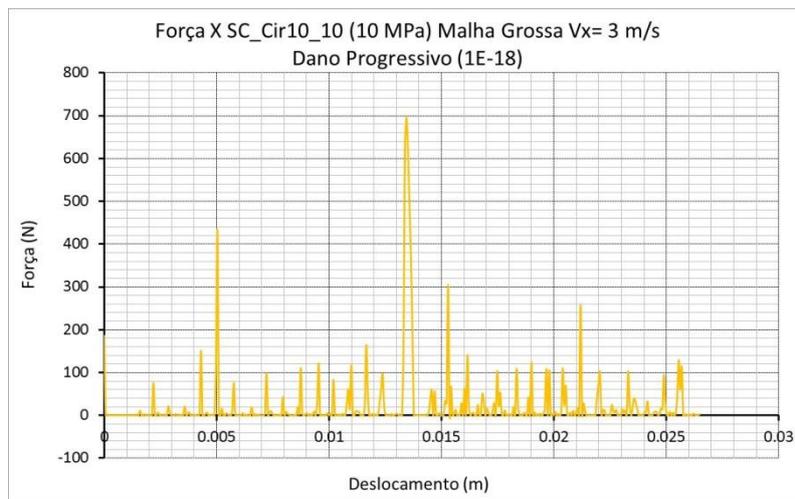


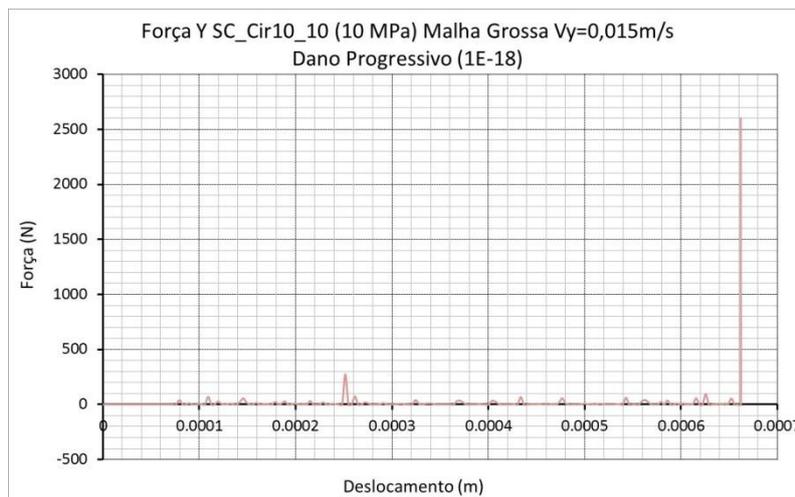
Figura 4.37: Diferentes estágios do modelo 3D SC_Cir10_10 com malha grossa e pressão de confinamento de 10 MPa.

Na figura 4.38 são apresentadas as forças obtidas no modelo SC_Cir10_10. Semelhante aos modelos 2D, a magnitude das forças de corte apresenta um acréscimo devido ao efeito da pressão de confinamento exercida na peça, observado nas forças de corte nas direções horizontal e vertical.

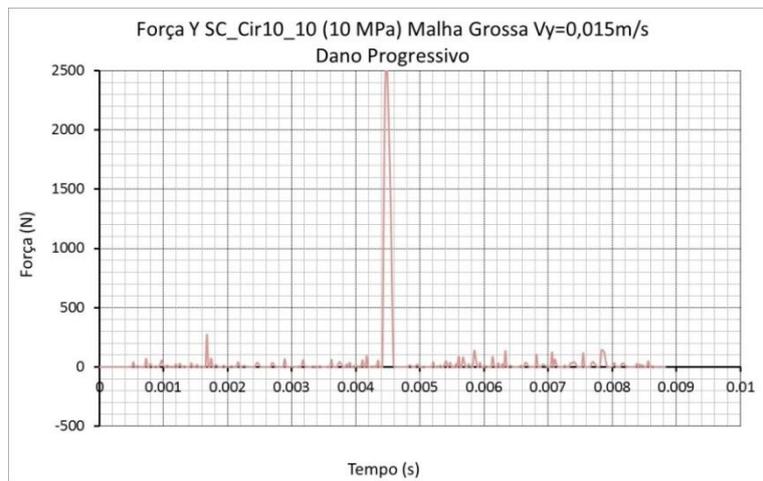
Como observado em todos os modelos executados nesta pesquisa, a magnitude das forças de corte na direção horizontal é superior às forças na direção vertical.



(a)



(b)



(c)

Figura 15: Força de corte na direção: (a) horizontal, (b) vertical e (c) ampliação do gráfico da força de corte na direção vertical.

Uma mudança abrupta na magnitude da força de corte na direção vertical foi observada na metade do comprimento da peça, onde a ferramenta deixa de deslocar na direção vertical e passa a cortar com profundidade constante. Neste modelo a MSE total calculada foi de 4.30 MPa. Na figura 4.39 são apresentados os diferentes estágios de corte do modelo SC_Cir11_0, que utiliza uma malha refinada e não há pressão de confinamento aplicado.

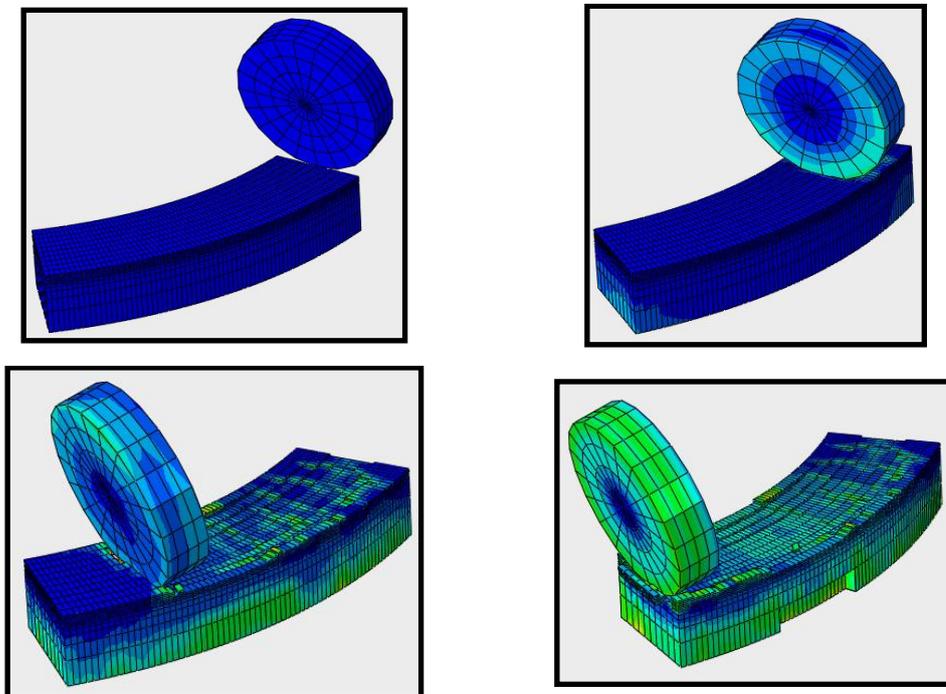
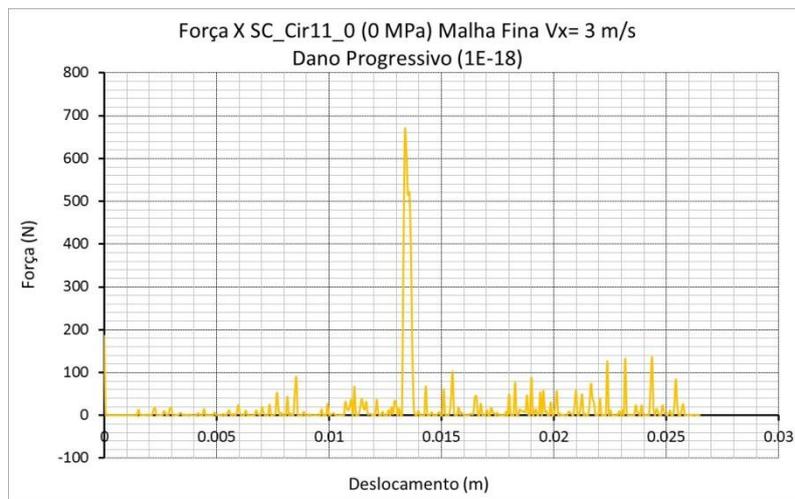


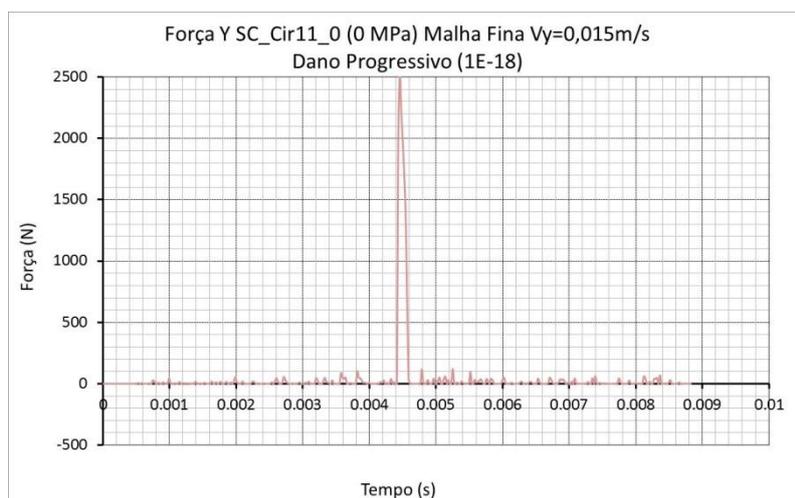
Figura 16 Diferentes estágios do modelo SC_Cir11_0 com malha refinada e pressão de confinamento de 0 MPa.

As forças de corte obtidas no SC_Cir11_0 são apresentadas na Figura 4.40. Semelhante aos modelos 2D, a malha mais refinada resulta em um número maior de picos de força, portanto uma maior discretização aumenta a área sob a curva e os valores de força de corte do modelo, fato que vai elevar o valor de MSE.

Como verificado nos modelos anteriores, pode-se observar na metade da simulação a presença de forças de corte com maior magnitude. Para este modelo a MSE total calculada foi de 3.19 MPa.



(a)



(b)

Figura 17: Força na direção: (a) horizontal e (b) vertical no modelo com malha refinada SC_Cir11_0 sem pressão de confinamento.

Na figura 4.41 são apresentados os diferentes estágios de corte do modelo SC_Cir11_10, que utiliza uma malha refinada e uma pressão de confinamento de 10 MPa.

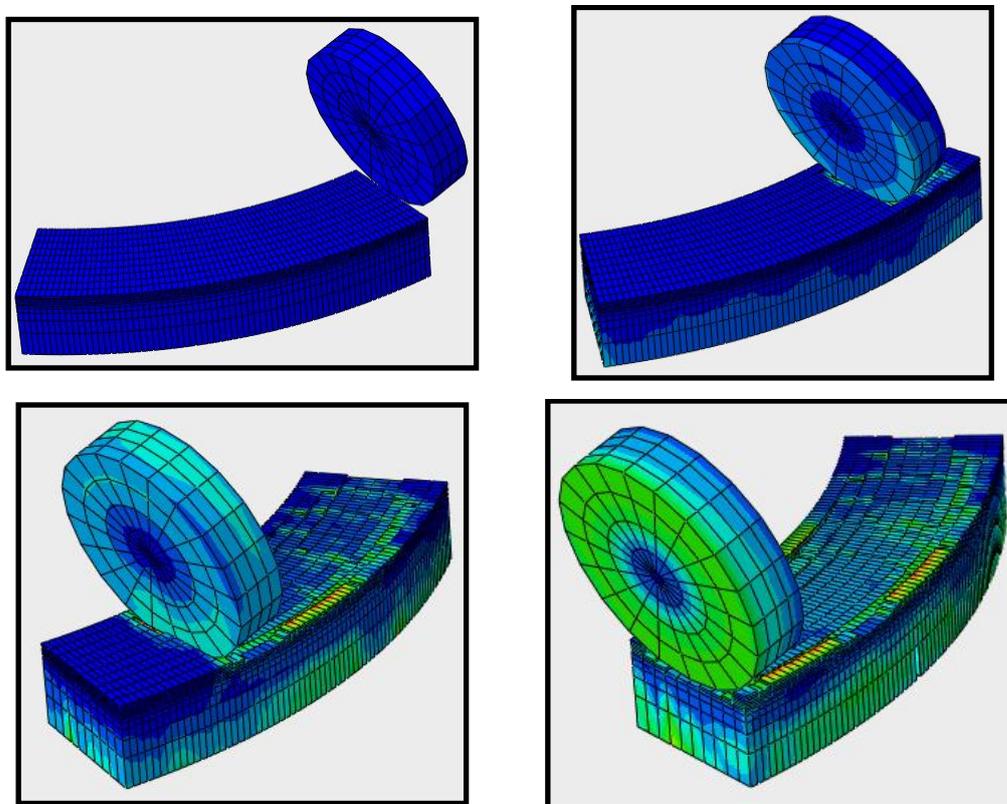
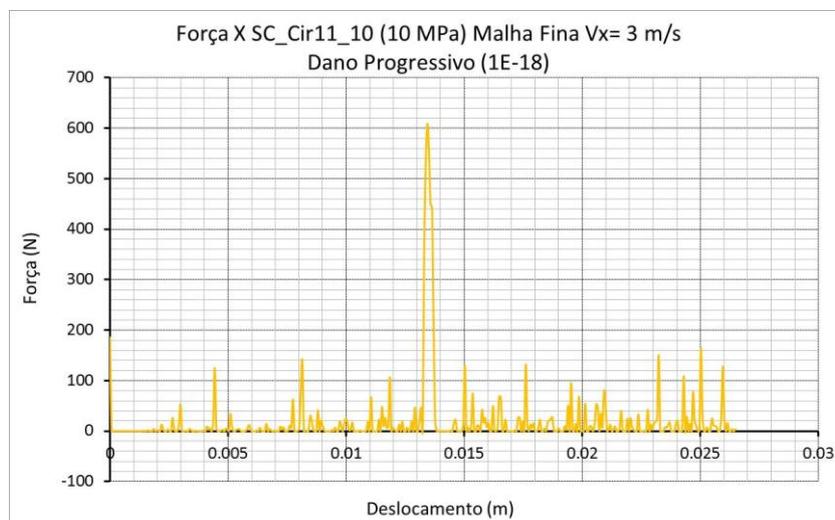
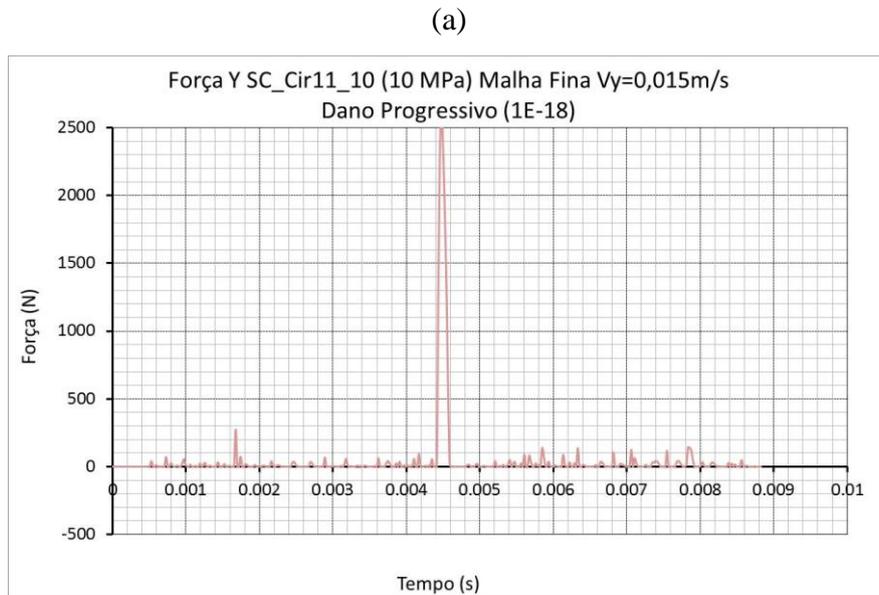


Figura 18: Diferentes estágios do modelo SC_Cir11_10 com malha refinada e pressão de confinamento de 10 MPa.

As forças obtidas na simulação da geometria SC_Cir11_10 são apresentadas na Figura 4.42.





(b)

Figura 19 Força na direção: (a) horizontal e (b) vertical no modelo com malha refinada SC_Cir11_0 com pressão de confinamento de 10 MPa.

Nestes gráficos, é observado o aumento na magnitude da força de corte, quando comparado com o modelo que não tem pressão de confinamento aplicada, porém com a mesma geometria. Para este modelo a MSE total calculada foi de 3.60 MPa.

4.3.5 Comparação das forças e MSE dos modelos 3D com dano Progressivo parâmetro 1E-18 (SC_Cir10_0, SC_Cir10_10, SC_Cir11_0, SC_Cir11_10)

Após obter os resultados das forças de corte nas direções horizontais e verticais, foi realizada uma comparação entre os diferentes modelos analisados previamente.

Na Figura 4.43 é apresentada a comparação das forças de corte do modelo SC_Cir10 na direção horizontal com a malha grossa.

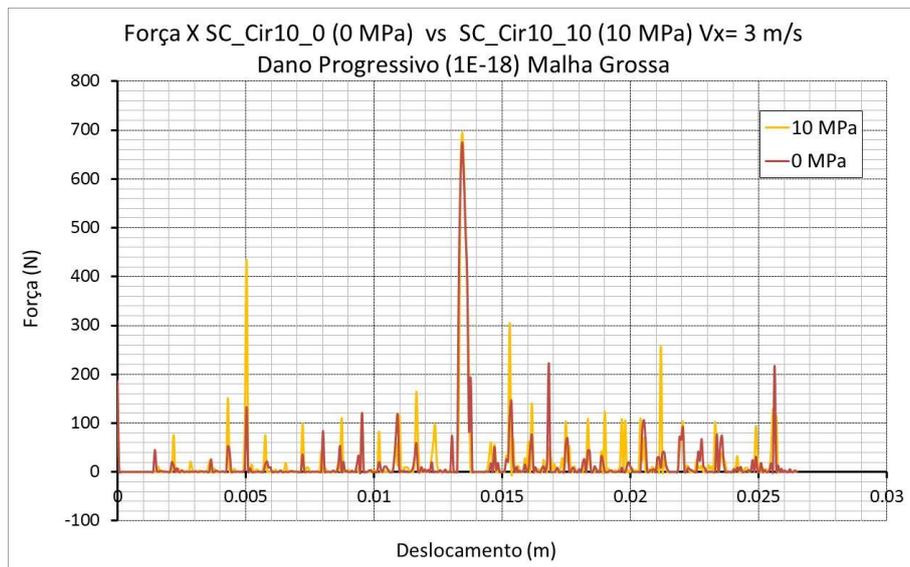
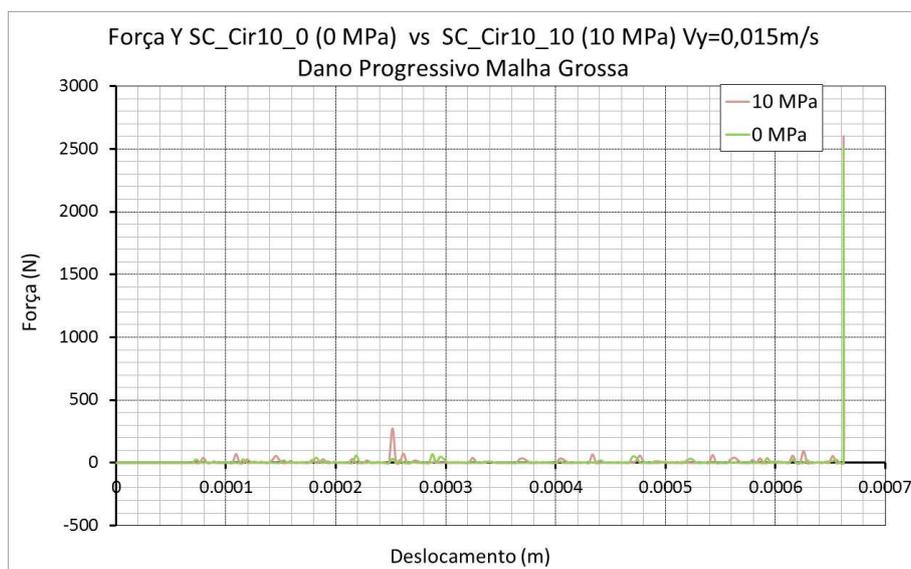


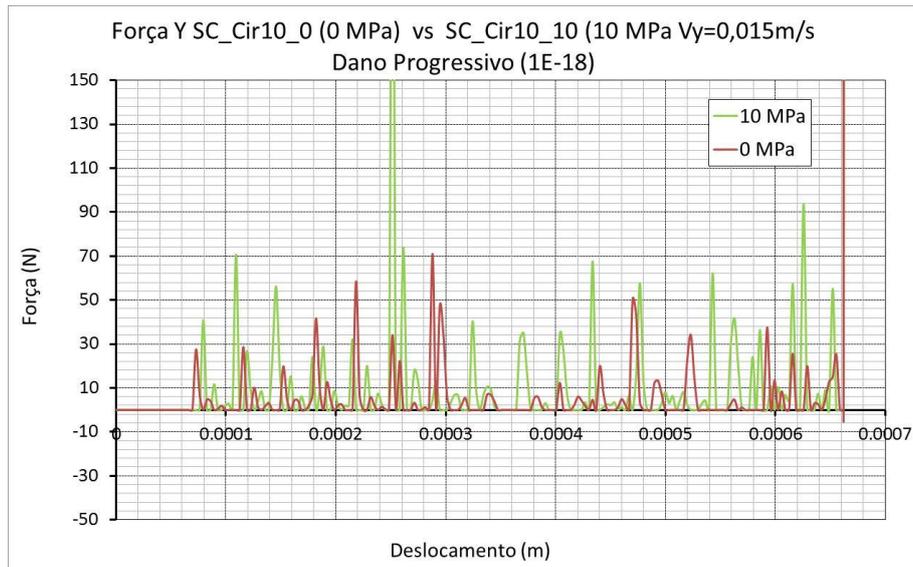
Figura 20: Comparação das forças de corte horizontal para modelos com e sem pressão de confinamento.

Os resultados da Figura 4.43 mostram a mudança no comportamento e na magnitude das forças de corte dos modelos devido ao efeito exercido pela pressão de confinamento. O modelo com pressão de confinamento diferente de zero apresenta maiores valores de força de corte e conseqüentemente de MSE, como era esperado.

Os mesmos efeitos são observados nas forças de corte na direção vertical, comparação apresentada na figura 4.44. A MSE obtida de cada um destes modelos é apresentada na Figura 4.45.



(a)



(b)

Figura 21 Comparação das forças de corte horizontal para modelos com e sem pressão de confinamento (a) escala original e (b) escala ampliada.

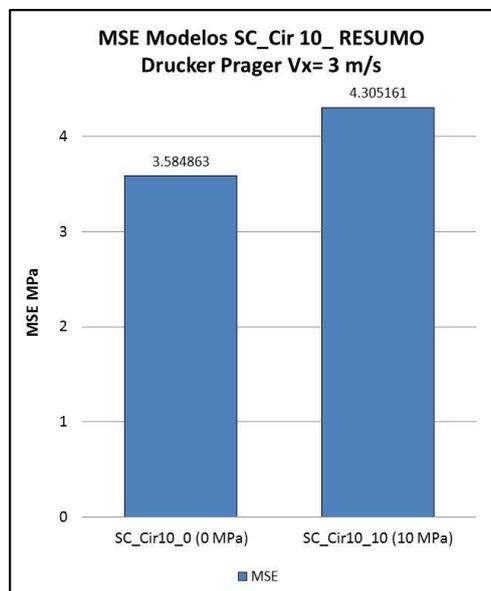


Figura 22: Comparação de MSE dos modelos SC_Cir10_0 (0 MPa) e SC_Cir10_10 (10 MPa) malha grossa.

Semelhante aos modelos anteriores, a MSE do modelo com pressão de confinamento é maior, quando comparada ao modelo sob condições atmosféricas.

Os resultados de força de corte horizontal do modelo discretizado com a malha refinada são mostrados na figura 156, onde são comparados os resultados de força de corte horizontal de modelos com e sem pressão de confinamento, para o modelo SC_Cir11.

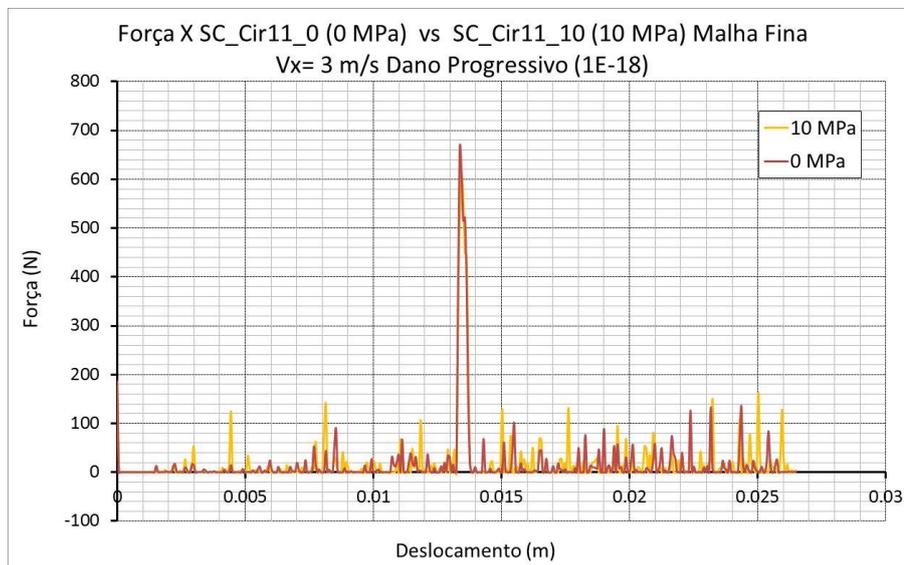
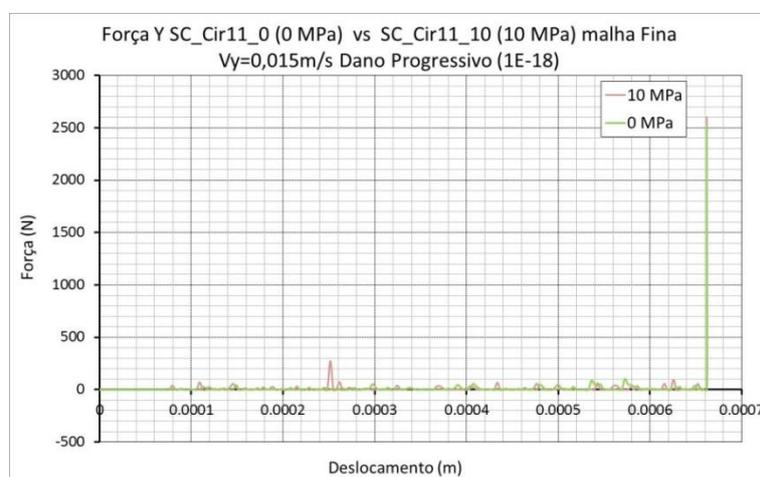


Figura 23: Comparação das forças de corte horizontal para modelos com e sem pressão de confinamento.

Embora a Figura 4.46 apresente uma maior quantidade de picos nas forças de corte, a magnitude delas apresenta uma queda, quando comparado com as forças de corte dos modelos de malha grossa. O mesmo comportamento foi observado nas forças de corte na direção vertical, como mostra a Figura 4.47. A Figura 4.48 apresenta os resultados de MSE nos modelos de malha refinada.



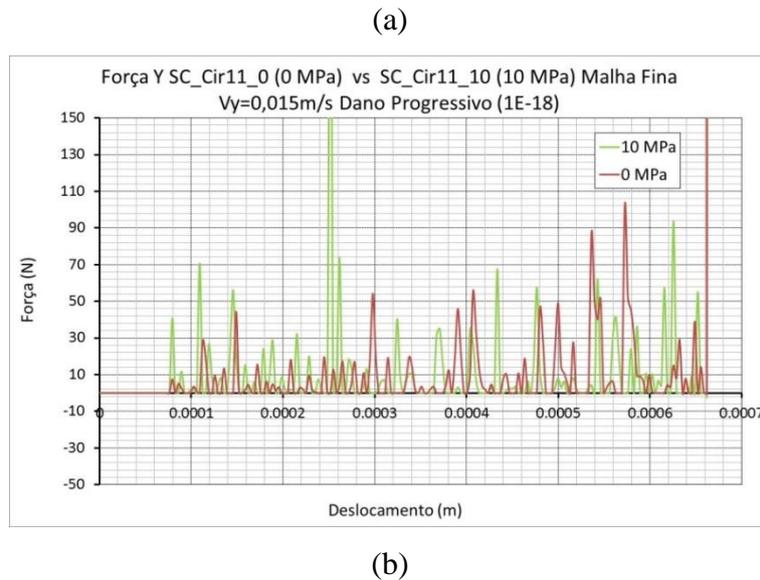


Figura 24: Comparação das forças de corte vertical para modelos com e sem pressão de confinamento (a) escala original e (b) escala ampliada.

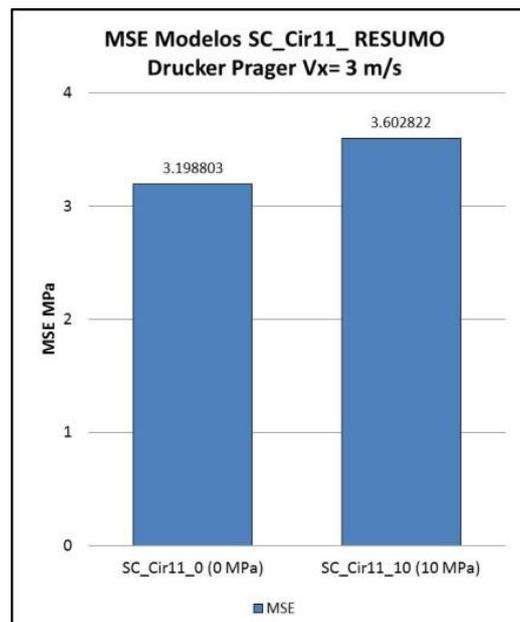
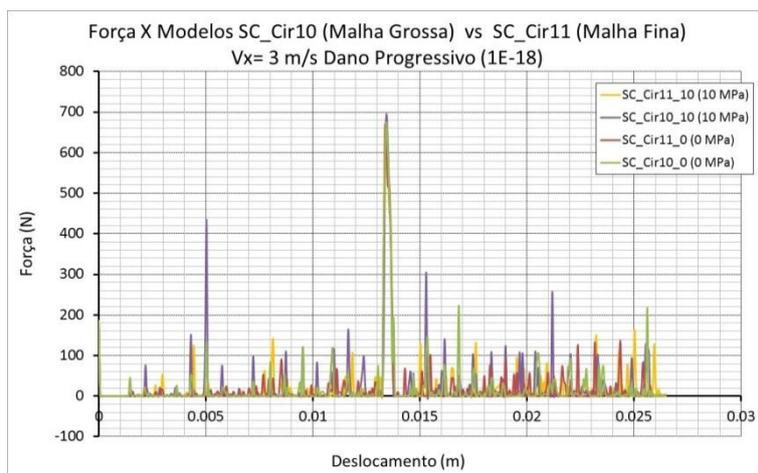


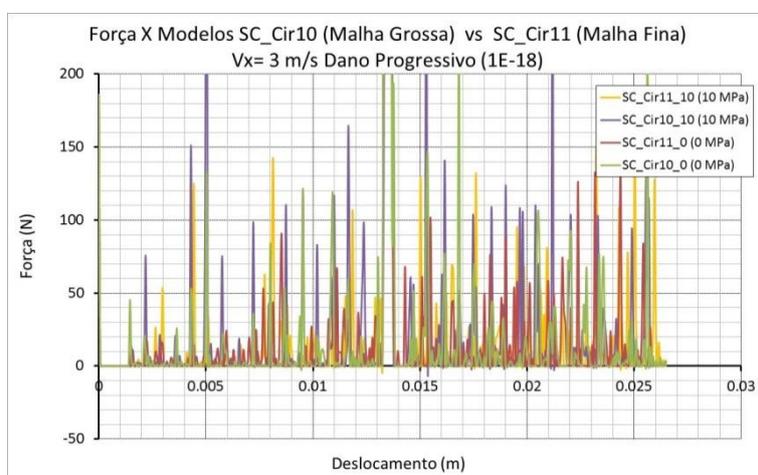
Figura 25 Comparação da MSE dos modelos SC_Cir11_0 (0 MPa) e SC_Cir11_10 (10 MPa) malha “refinada”.

Observando os gráficos de MSE dos modelos de malha grossa e refinada, o efeito da discretização nestes modelos é contraditório, esperavam-se maiores valores de força e de MSE para os modelos mais discretizados (como ocorrido nos modelos 2D), porém foi observado uma queda nos valores de MSE e da força de

corde. Na Figura 4.49 (a) e (b) é apresentada uma comparação gráfica das forças na direção horizontal de todos os modelos 3D e na Figura 4.50 de MSE.



(a)



(b)

Figura 26: Comparação das forças na direção horizontal dos modelos SC_Cir10 (0 e 10 MPa) e SC_Cir11 (0 e 10 MPa).

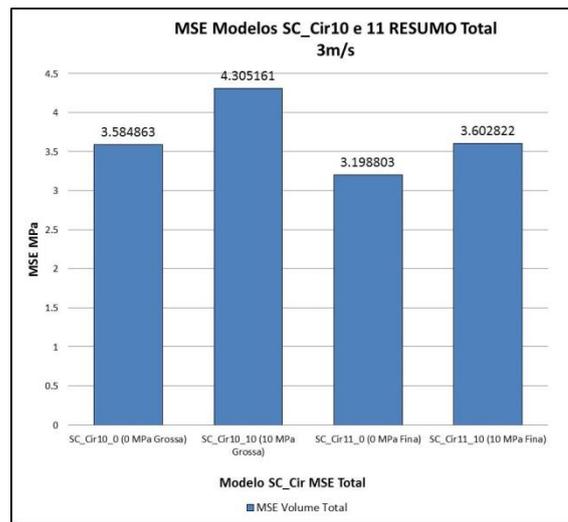


Figura 27: Comparação de MSE dos modelos SC_Cir10 (0 e 10 MPa) e SC_Cir11 (0 e 10 MPa).