7 Simulação Física

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos em ensaios realizados em cubos de aresta de 0.05m e furo interno de 12 mm. A célula poliaxial utilizada nos ensaios foi desenvolvida pela PUC e o Cenpes e pode ser observada conforme Figura 70. Foram realizados ensaios com carregamento biaxial para observar como as deformações ao redor de cavidade circular se iniciam e se propagam ao longo do carregamento imposto durante o ensaio. Como apenas foi possível realizar acompanhamento visual durante os ensaios, antes e depois do mesmo os corpos de prova cúbicos foram tomografados. Assim poderse-ia obter a área plastificada devido aos ensaios e posteriormente através de simulações numéricas simular o comportamento observado.

Também serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados em amostras cilíndricas de parede espessa, com comprimento de 101.6mm, diâmetro externo de 50.8mm e os diâmetros internos de 12.7mm, 17mm e 25.4mm . A célula utilizada pode ser levada ao tomógrafo, conforme Figura 100, e assim foi possível realizar o acompanhamento em tempo real das deformações que ocorrem ao redor da cavidade ao longo do carregamento imposto durante o ensaio.

7.1. Ensaios na Célula Poliaxial

A célula poliaxial, desenvolvida em conjunto com a PUC e o Cenpes, se encontra apresentada na Figura 70. Na mesma pode se aplicar tensões em cada uma das suas arestas até 41.4MPa aproximadamente. Neste estudo, as amostras confeccionadas consistem em cubo de aresta de 0.05m aproximadamente.

Os ensaios na célula foram realizados a fim de simular o estado de deformação plana que ocorre em poços de petróleo, conforme Figura 73. É possível aplicar três tensões distintas na célula, no caso apenas duas foram aplicadas. Pois a célula não possui instrumentação, ou seja, não mede as deformações da aresta, nem era possível instrumentar o furo da amostra para medir a deformação ao longo do mesmo. Caso fosse possível medir a deformação

ao longo do eixo do furo, poder-se-ia capturar a evolução do mecanismo de ruptura. Como não era possível, uma das faces da célula poliaxial foi mantida aberta para que visualmente o processo de ruptura fosse observado.

Fato este que implicou na garantia apenas do estado de tensão plana, talvez pela simetria da amostra, o mecanismo de ruptura observado na porção central do furo se aproxime do estado de deformação plana, conforme Figura 72, por isto este intervalo foi priorizado na simulação numérica.

Além disto, houve o mecanismo de ruptura por tração, conforme Figura 73, já que uma das faces não possui qualquer confinamento e onde pode se observar o aparecimento de fraturas perpendicular a esta direção, ou seja, na direção de menor tensão aplicada, no caso a tensão é nula [5]. Fato este que já havia sido observado em experimentos com carregamento biaxial por Föppl [5], conforme Figura 32.



Figura 70 – Foto do conjunto célula, linhas de pressão e amostra do ensaio poliaxial.



Figura 71 – Exemplo para estado de tensão normal de três opções de direção para perfurar o poço e as tensões no *far field*.



Figura 72 – Mecanismo de ruptura ao cisalhamento para estado de tensão normal de três opções de direção para perfurar o poço e as tensões no *far field*.



Figura 73 – Vista da ruptura por tração obtida através da tomografia da seção da amostra cúbica CP-01 após ensaio poliaxial.

A única condição de contorno imposta foi às tensões aplicadas nas faces da seção, conforme descritas abaixo. A tensão σ_1 é sempre aplicada no eixo convencionado como y, e a σ_2 no eixo x. Foram realizados ensaios cuja relação entre $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ variou entre um e três, conforme Tabela 4, a fim de se obter diferentes mecanismos de ruptura conforme teoria e ensaios apresentado nas seguintes referências: [21], [22], [24] e [26]. Orelha de cachorro Guispide



(b)

Figura 74 – (a) Modos de rupturas tipo orelha de cachorros e cúspide [24] e (b) Modo de ruptura tipo espiral.

A fim de se obter o modo de ruptura denominado de *breakout* com formato de orelha de cachorro, conforme Figura 75 até Figura 78 e Figura 83 até Figura 89, cujo mecanismo de ruptura é por cisalhamento foi realizado ensaio com relação de tensões $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ de 2:1, como no CP-01 e CP-08.

Com o objetivo de capturar outro modo de ruptura denominado de *breakout* com formato de cúspide, cujo mecanismo de ruptura é por *splitting* foram realizados ensaios cuja relação de tensões $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ é de 3:1, como no CP-07 e CP-13.

Para observar um terceiro modo de ruptura denominado de *breakout*, porém com formato de uma espiral, ou seja, ao redor de toda cavidade circular, foram realizados ensaios cuja relação de tensões $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ é de 1:1, como no CP-04.

T i	DI		
Testo	Bloco	\mathbf{Q}_{1} (MPa)	$\sigma_2(MPa)$
CP-01	А	22.35	11.53
CP-04	А	4.49	3.73
CP-07	А	13.36	4.27
CP-08	А	14.38	7.36
CP-13	А	20.39	7.43

Tabela 4 – Relação de ensaios poliaxiais e sua respectiva tensão maior e menor de ruptura.

A seguir serão apresentadas as tomografias a seção ao longo do eixo do poço a cada 1.25mm antes e depois do ensaio, e zoom das seções onde ocorreu ruptura do tipo *breakout*, conforme Figura 75 até Figura 95, dos seguintes corpos de prova: CP-01, CP-04, CP-08 e CP-13.

Não serão apresentadas as tomografias do CP-07, pois o corpo de prova ficou totalmente destruído após o ensaio o que inviabilizou a comparação antes e depois através da tomografia.

Com cunho ilustrativo é apresentada um foto antes e depois do ensaio ser realizado do CP-13, conforme Figura 96 e Figura 97.

Será anexada ao trabalho a reconstrução 3D das tomografias dos ensaios CP-01, C1P-04, CP-08 e CP-13, em arquivo magnético, pois este trabalho de reconstrução gerou um filme para cada ensaio.



Figura 75 – Tomografia do CP-01 antes do ensaio poliaxial- Bloco A.



Figura 76 – Tomografia do CP-01 depois do ensaio poliaxial- Bloco A.



Figura 77 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-01 @ -37.50mm – Bloco A.



Figura 78 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-01 @ -38.75mm Bloco A.



Figura 79 – Tomografia do CP-04 antes do ensaio poliaxial- Bloco A.



Figura 80 – Tomografia do CP-04 depois ensaio poliaxial – Bloco A.



Figura 81 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-04@ -35mm loco A.



Figura 82 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-04@ -36.25mm Bloco A.



Figura 83 – Tomografia do CP-08 antes do ensaio poliaxial – Bloco A.



Figura 84 – Tomografia do CP-08 depois do ensaio poliaxial – Bloco A.



Figura 85 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-08@ -15mm Bloco A.



Figura 86 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-08@ -16.25mm Bloco A.



Figura 87 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-08@ -17.50mm Bloco A.



Figura 88 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-08@ -18.75mm Bloco A.



Figura 89 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-08@ -20.00mm Bloco A.



Figura 90 – Tomografia do CP-13 antes do ensaio poliaxial- Bloco A.



Figura 91 – Tomografia do CP-13 depois do ensaio poliaxial – Bloco A.



Figura 92 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-13@ -2.50mm Bloco A.



Figura 93 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-13@ -3.75mm Bloco A.



Figura 94 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-13@ -35.00mm Bloco A.



Figura 95 - Comparativo entre antes e depois do ensaio poliaxial do CP-13@ -36.25mm Bloco A.



Figura 96 – Foto CP-13, ensaio triaxial verdadeiro – Bloco A.



Figura 97 - Foto CP-13 vista do breakout do ensaio triaxial verdadeiro - Bloco A.

Conforme pode se observar nas tomografías apresentadas acima apenas foi possível observar um modo de ruptura denominado orelha de cachorro. Fatores que podem ter contribuído, referentes aos CP-07, CP-13 e CP-04, para a não observância de mecanismos de ruptura distintos dos denominados orelha de cachorro: comprimento característico da partícula não ser relevante para o material utilizado nos ensaios, trajetória de tensões aplicadas tenha que ser distinta da aplicada, a relação de tensão apresentar contraste superior a 3, para o formato de cúpisde, a relação comprimento característico e raio do poço ser maior para majorar os efeitos do tensor-momento e até mesmo o fato de outro mecanismo de ruptura, o de tração, existir, já que duas das seis arestas da célula foram mantidas abertas.

Como o ensaio realizado na célula poliaxial não possui instrumentação, como já mencionado, adotou-se a estratégia de tomografar cada cubo antes e depois do ensaio. Para o ar, o valor padrão é de -1000HU. Foi convencionado que a escala de cor correspondente ao "vazio" é entre -1000HU e -500HU, a partir daí foram selecionadas as seções de interesse dos corpos-de-prova CP-01, CP-04, CP-08 e CP-13, e das mesmas foram obtidas as áreas correspondente ao ar, ou seja, vazio, antes e depois do ensaio poliaxial, conforme Tabela 5. Então a diferença de área depois e antes corresponde a área onde ocorreu mecanismo de ruptura conforme equação 226.

Na Tabela 5, foi destacado em amarelo a área plastificada correspondente a porção central do corpo de prova cúbico, que foi priorizada devido ao fato de estar mais próximo da porção central do corpo de prova. A área plastificada observada nas tomografias do CP-01, CP-08 e CP-13 serão comparadas com as áreas plastificadas obtidas através de simulação numérica a ser apresentada no capítulo seguinte.

 $\acute{A}reaPlástificada(\%) = \frac{\acute{A}reaDepois - \acute{A}reaAntes}{\acute{A}reaAntes}.100$ ------226

	r 		Área Tomógrafo		
Testo	Bloco	Z (mm)	Antes (mm ²)	Depois (mm ²)	Plastificada (%)
CP-01	A	<mark>-36.25</mark>	<mark>117.47</mark>	<mark>131.026</mark>	<mark>11.54</mark>
CP-01	А	-37.5	117.3	125.36	6.87
CP-01	А	-38.75	-	121.45	-
CP-01	А	-40	115	118.52	3.06
CP-01	А	-41.25	111.22	117.96	6.06
CP-04	А	-33.75	123.732	126.728	2.42
CP-04	А	-35	123.579	132.755	7.43
CP-04	А	-36.25	123.391	141.706	14.84
CP-08	А	-15	116.457	140.76	20.87
CP-08	А	-16.25	117.383	135.66	15.57
CP-08	А	-17.5	115.39	126.51	9.64
CP-08	А	-18.75	115.97	126.16	8.79
CP-08	А	-20	116.87	125.6	7.47
CP-08	А	-21.25	118.17	124.25	5.15
CP-08	А	-22.5	117.59	122.62	4.28
CP-08	A	<mark>-23.75</mark>	<mark>118.34</mark>	<mark>119.93</mark>	<mark>1.34</mark>
CP-13	А	-1.25	120.78	143.93	19.17
CP-13	А	-2.5	120.62	125.67	4.19
CP-13	А	-3.75	119.86	123.07	2.68
CP-13	A	<mark>-3.25</mark>	<mark>117.37</mark>	<mark>117.47</mark>	<mark>0.09</mark>
CP-13	A	<mark>-33.75</mark>	<mark>118.71</mark>	<mark>121.12</mark>	2.03
CP-13	А	-35	120.23	123.94	3.09
CP-13	А	-36.25	119.8	130.07	8.57

Tabela 5 – Relação de ensaios poliaxiais e sua respectiva área antes e depois do ensaio e a área plastificada em percentual.

7.2.Ensaio Cilíndrico de Parede Espessa (TWC)

No bloco B foram realizados seis ensaios de TWC, sendo que cada dois ensaios possuíam uma relação de OD: ID, sendo estas: 1:4, 1:3 e 1:2. O comprimento da amostra cilíndrica é de 101.6mm, o diâmetro externo de 50.8mm e os diâmetros internos utilizados foram de 12.7mm, 17mm e 25.4mm.

No ensaio de parede espessa só é possível aplicar um carregamento axissimétrico. Na célula utilizada pode-se aplicar tensão confinante e axial independentemente, porém não foi realizado um ensaio hidrostático propriamente dito. E sim foram realizados ensaios em que se aplicou conjuntamente uma tensão axial e confinante (radial) até aproximadamente 4.3 MPa. Após este passo, foi acrescida a tensão confinante para observar o início e a evolução do mecanismo de ruptura na cavidade circular. Como foram utilizadas bombas manuais ENERPAC, conforme Figura 100, para aplicar pressão, não foi possível estabelecer um taxa contínua de acréscimo de tensão ao longo do tempo.

O ensaio de parede espessa cilíndrica foi realizado dentro do tomógrafo, para observar: quando o mecanismo de ruptura se inicia, como o mesmo evolui e a resistência limite do material, conforme Figura 99. Primeiramente foi realizada a montagem do conjunto e o mesmo foi colocado no tomógrafo, conforme Figura 101, e então foi obtida uma imagem da seção transversal da amostra a fim de verificar a condição inicial do plugue e também verificar o posicionamento da mesma.

Então se aplicou concomitantemente a tensão axial e a tensão confinante, com o cuidado de manter sempre a tensão confinante maior que a tensão axial. Já que a célula possui um multiplicador de pressão, conforme Figura 98, e por isto cada acréscimo unitário de pressão axial exercido manualmente pela bomba no atuador equivale em acréscimo de pressão axial aplicada na amostra de 6.25 vezes ao acréscimo de pressão exercido no atuador, conforme Figura 98.

$P_{aplicada} = \frac{F_{aplic}}{A} \dots$	···227
$\sigma_{axial} = \frac{F_{axial}}{a}$	···228
$F_{aplicada} = F_{axial}$	···229

Substituindo a equação 227 na 228 temos:

$$\sigma_{axial} = P_{aplicada} \frac{A}{a} \dots 230$$



Figura 98 – Detalhe da câmara de tensão axial no projeto da célula.



Figura 99 – (a) Modo de ruptura tipo cúspide (b) Modo de ruptura tipo orelha de cachorro e (c) Modo de ruptura tipo espiral [30].

Foi então acrescida apenas a tensão confinante em estágios, e a cada estágio pré-definido conforme relação OD: ID (diâmetro externo e interno) uma tomografia é realizada para verificar as deformações, induzidas no furo interno da amostra devido às tensões aplicadas, e a evolução do mecanismo de ruptura.

Foram realizados seis ensaios de TWC, conforme Tabela 6, cada dois com uma relação OD: ID, sendo estas 1:2, 1:3 e 1:4, a fim de observar os mecanismos de rupturas, conforme Figura 99.

Serão descritos todos os seis ensaios a fim de observar as diferenças da evolução do mecanismo de ruptura e o efeito de escala no parâmetro de resistência da rocha TWC.

Testo	Testo	Bloco	OD: ID
CP-18	TWC-03	В	1:2
CP-16	TWC-06	В	1:2
CP-15	TWC-02	В	1:3
CP-14	TWC-05	В	1:3
CP-10	TWC-01	В	1:4
CP-12	TWC-04	В	1:4

Tabela 6 - Relação de ensaios TWC e respectivas relações OD: ID.



Figura 100 - Foto conjunto célula triaxial e bombas ENERPAC na mesa do tomógrafo.



Figura 101 – Foto conjunto célula triaxial e bombas ENERPAC que será tomografado.

7.2.1.Descrição dos ensaios TWC

A seguir será apresentada a tabela com o passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou tensão confinante e tomografias realizadas para o CP-10 (TWC-01).

Tabela 7 – Passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou confinante para CP-10 – Bloco B.

Tomografia	$\sigma_{axial}(MPa)$	$\sigma_{\text{confinante}}(\text{MPa})$
1 ^a	0	0
2 ^a	8.6	8.6
3 ^a	6.0	13.8
4 ^a	6.9	17.2
5 ^a	6.9	20.7
6 ^a	5.6	24.1
7 ^a	5.6	27.6
8 ^a	6.5	31.0
9 ^a	6.9	34.5
10 ^a	5.2	37.9
11 ^a	5.6	41.4
12 ^a	4.7	42.8
13ª	4.7	44.1

Abaixo são apresentadas as seguintes tomografias: 1^a, 2^a, 11^a, 12^a e 13^a, conforme Figura 102 até Figura 106, e duas fotos onde é possível visualizar o breakout ao longo do eixo do poço do CP-10, conforme Figura 107 e Figura 108.



Piloto inicial

Figura 102 – Seção transversal do corpo de prova antes do ensaio TWC do CP-10 – TWC-01- Bloco B.



Figura 103 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-10, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 8.6MPa- TWC-01- Bloco B.



Figura 104 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-10, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante 41.4MPa- TWC-01- Bloco B.



Figura 105 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-10, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 42.8MPa – TWC-01- Bloco B.



Figura 106 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-10, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 44.1MPa – TWC-01- Bloco B.



Figura 107 – Fotografia de seção transversal, onde se observa breakout, ao eixo do poço após ensaio do CP-10 – TWC-01- Bloco B.



Figura 108 – Fotografia com vista lateral da seção transversal, a fim de observar uma das bandas de cisalhamento ao longo do eixo do poço após ensaio do CP-10 – TWC-01-Bloco B

A tabela abaixo apresenta o passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou tensão confinante e tomografias realizadas para o CP-15 (TWC-02). Tabela 8 – Passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou confinante para CP-15 – Bloco B.

Tomografia	σ_{axial} (MPa)	$\sigma_{\text{confinante}}$ (MPa)
1 ^a	0	0
2ª	0	0
3 ^a	6.0	20.7
4 ^a	6.0	27.6
5 ^a	6.5	31.0
6 ^a	6.0	34.5
7ª	6.3	35.9
8 ^a **	6.3	35.9

A seguir são apresentadas a 1^a, 2^a, 7^a e 8^a tomografia, conforme da Figura 109 até a Figura 112 e duas fotos onde é possível visualizar o breakout ao longo do eixo do poço do CP-15, conforme Figura 113 e Figura 114.

**Tomografia da seção transversal da amostra após ensaio.

Piloto Inicial



Figura 109 – Seção transversal do corpo de prova antes do ensaio TWC do CP -15-TWC-02-Bloco B.


Figura 110 –Tomografia das seções perpendiculares do CP-15, do ensaio TWC, realizadas antes de se aplicar tensão confinante-TWC-02 - Bloco B.



Figura 111 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-15, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 35.9MPa – TWC-02-Bloco B.



Figura 112 – Seção transversal do corpo de prova depois do ensaio TWC do CP-15 – TWC-02-Bloco B.



Figura 113 – Fotografia de seção transversal, onde se observa breakout, ao eixo do poço após ensaio do CP-15 – TWC-02- Bloco B.



Figura 114 – Fotografia com vista lateral da seção transversal, a fim de observar uma das bandas de cisalhamento ao longo do eixo do poço após ensaio do CP-15 – TWC-02-Bloco B

A Tabela 9 apresenta o passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou tensão confinante e tomografias realizadas para o CP-18 (TWC-03).

Tabela 9 – Passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou confinante para CP-18 – Bloco B.

Tomografia	σ (MDa)	σ (MDa)
Tomografia	O_{axial} (IVIF a)	O _{confinante} (IVIF a)
1 ^a	0	0
2ª	0	0
3 ^a	6.0	13.8
4 ^a	5.6	17.2
5 ^a	6.2	22.0
6 ^a	5.8	24.1
7 ^a	5.8	25.5
8 ^a **	5.8	25.5

Abaixo se encontra a 1ª, 2ª, 7ª e 8ª tomografia, conforme da Figura 115 até a Figura 118.

Figura 115 – Seção transversal do corpo de prova antes do ensaio TWC do CP -18-TWC-03-Bloco B.



Figura 116 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-18, do ensaio TWC, realizadas antes de se aplicar tensão confinante- TWC-03- Bloco B.



Figura 117 –Tomografia das seções perpendiculares do CP-18, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 25.5MPa - Bloco B.



Figura 118 – Seção transversal do corpo de prova depois do ensaio TWC do CP-18 – TWC-03 -Bloco B.

O passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou tensão confinante e tomografias realizadas para o CP-12 (TWC-04) se encontram na Tabela 10. Na 18^a tomografia houve um alívio de 0.7MPa na tensão confinante devido ao

processo de ruptura, apesar de se ter aplicado 41MPa, após a tomografia o manômetro registrava 40.3MPa. Já na 19^a e 20^a apenas houve um alívio de 0.3MPa então a pressão após respectiva tomografia era de 40.7MPa.

Tabela 10 – Passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou confinante para CP-12 – Bloco B.

Tomografia	σ_{axial} (MPa)	$\sigma_{\text{confinante}}(\text{MPa})$
1^{a}	0	0
2ª	0	0
3 ^a	5.2	20.7
4 ^a	5.6	27.9
5 ^a	5.8	31.0
6 ^a	5.8	31.7
7 ^a	5.8	32.4
8 ^a	5.8	33.4
9 ^a	5.9	34.1
10 ^a	5.9	34.8
11 ^a	6.0	35.9
12 ^a	6.0	36.6
13 ^a	6.0	37.6
14 ^a	6.0	37.9
15 ^a	6.0	39.0
16 ^a	6.1	39.7
17 ^a	6.1	40.3
18 ^a	6.2	41.0
19 ^a	6.2	41.0
20ª	6.2	41.0
21 ^a **	6.2	41.0

São apresentadas a 1^a, 2^a, 17^a,18^a, 19^a, 20^a e 21^a tomografia, conforme da Figura 119 até a Figura 125 e duas fotos onde é possível visualizar o breakout ao longo do eixo do poço do CP-15, conforme Figura 126 e Figura 127.



Figura 119 – Seção transversal do corpo de prova antes do ensaio TWC do CP -12-TWC-04-Bloco B.

Piloto Inicial



Figura 120 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-12, do ensaio TWC, realizadas antes de se aplicar tensão confinante- TWC-04- Bloco B.



Figura 121 –17^a Tomografia das seções perpendiculares do CP-12, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 40.3 MPa – TWC-04-Bloco B.



Figura 122 –18ª Tomografia das seções perpendiculares do CP-12, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 41 MPa – TWC-02-Bloco B.



Figura 123 –19^a Tomografia das seções perpendiculares do CP-12, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 41 MPa – TWC-04-Bloco B.



Figura 124 –20ª Tomografia das seções perpendiculares do CP-12, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 41 MPa – TWC-04-Bloco B.



Figura 125 – Seção transversal do corpo de prova depois do ensaio TWC do CP-12 – TWC-04 -Bloco B.



Figura 126 – Fotografia de seção transversal, onde se observa breakout, ao eixo do poço após ensaio do CP-12 – TWC-04- Bloco B.



Figura 127 – Fotografia com vista lateral da seção transversal, a fim de observar uma das bandas de cisalhamento ao longo do eixo do poço após ensaio do CP-12 – TWC-04-Bloco B.

A Tabela 11 apresenta o passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou tensão confinante e tomografias realizadas para o CP-14 (TWC-05). Também na 11^a, 12^a e 13^a se observou pequeno alívio de tensão.

Tabela 11 – Passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou confinante para CP-14 – Bloco B.

Tomografia	σ_{axial} (MPa)	$\sigma_{\text{confinante}}$ (MPa)
1 ^a	0	0
2ª	0	0
3 ^a	4.7	13.8
4 ^a	5.2	20.7
5 ^a	5.2	27.6
6 ^a	5.2	31.4
7 ^a	5.2	32.4
8 ^a	5.0	33.1
9 ^a	5.0	33.8
10 ^a	5.0	34.5
11 ^a	5.0	34.8
12ª	5.0	35.2
13ª	5.0	35.2
14 ^a **	5.0	35.2

A seguir são apresentadas a 1^a, 2^a, 10^a, 11^a, 12^a, 13^a e 14^a tomografia, conforme da Figura 128 até a Figura 134 e duas fotos onde é possível visualizar o breakout ao longo do eixo do poço do CP-15, conforme Figura 135 e Figura 136.

Piloto Inicial



Figura 128 – Seção transversal do corpo de prova antes do ensaio TWC do CP -14-TWC-05-Bloco B.



Figura 129 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-14, do ensaio TWC, realizadas antes de se aplicar tensão confinante- TWC-05- Bloco B.



Figura 130 –Tomografia das seções perpendiculares do CP-14, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 34.5 MPa – TWC-05-Bloco B.



Figura 131 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-14, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 34.8 MPa – TWC-05-Bloco B.



Figura 132 –12ª Tomografia das seções perpendiculares do CP-14, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 35.2 MPa – TWC-05-Bloco B.



Figura 133 –13^a Tomografia das seções perpendiculares do CP-14, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 35.2 MPa – TWC-05-Bloco B.



Figura 134 – Seção transversal do corpo de prova depois do ensaio TWC do CP-14 – TWC-05 -Bloco B.



Figura 135 – Fotografia de seção transversal, onde se observa breakout, ao eixo do poço após ensaio do CP-14 – TWC-05- Bloco B.



Figura 136 – Fotografia com vista lateral da seção transversal, a fim de observar uma das bandas de cisalhamento ao longo do eixo do poço após ensaio do CP-14 – TWC-05-Bloco B.

O passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou tensão confinante e tomografias realizadas para o CP-16 (TWC-06) são apresentados na Tabela 12. Tabela 12 – Passo a passo dos incrementos de tensão axial e/ou confinante para CP-16 – Bloco B.

Tomografia	$\sigma_{axial}(MPa)$	$\sigma_{\text{confinante}}(\text{MPa})$
1 ^a	0	0
2ª	0	0
3 ^a	4.3	6.9
4 ^a	4.8	13.8
5 ^a	5.0	17.6
6 ^a	5.0	20.7
7 ^a	5.0	21.0
8 ^a	5.0	21.4
9 ^a	5.0	21.9
10 ^a	5.0	22.4
11 ^a	5.0	22.8
12 ^a	5.0	23.4
13 ^a **	5.0	23.4

São apresentadas as 1^a, 2^a, 10^a, 11^a, 12^a e13^a tomografias conforme da Figura 137 até a Figura 141.

Piloto Inicial



Figura 137 –Seção transversal do corpo de prova antes do ensaio TWC do CP -16-TWC-06-Bloco B.



Figura 138 – Tomografia das seções perpendiculares do CP-16, do ensaio TWC, realizadas antes de se aplicar tensão confinante- TWC-06- Bloco B.



Figura 139 –Tomografia das seções perpendiculares do CP-14, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 22.8 MPa – TWC-05-Bloco B.



Figura 140 –Tomografia das seções perpendiculares do CP-16, do ensaio TWC, realizadas com tensão confinante de 23.4 MPa – TWC-06-Bloco B.

Figura 141 – Seção transversal do corpo de prova depois do ensaio TWC do CP-14 – TWC-05 -Bloco B.



Figura 142 – Fotografia de seção transversal, onde se observa breakout, ao eixo do poço após ensaio do CP-16 – TWC-06- Bloco B.



Figura 143 – Fotografia com vista lateral da seção transversal, a fim de observar uma das bandas de cisalhamento ao longo do eixo do poço após ensaio do CP-16 – TWC-06-Bloco B.

O modo de ruptura depende do tipo de material, do comprimento característico e do diâmetro do furo interno [24] e [30]. Para estimar um protocolo de ensaio, para os corpos de prova CP-10, CP-15 e CP-18, foi necessário estimar suas respectivas resistências para ruptura do material no ensaio de TWC. A partir desta estimativa foi estabelecido como seria aplicado o carregamento durante o ensaio para poder observar o início e evolução da formação das bandas de cisalhamento ao redor da cavidade.

Para estimar a resistência de TWC foi utilizada a correlação de Tronvoll [32], conforme equação 231, e Wilson [33],conforme equação 232. Como ambas as correlações utilizam a resistência a compressão uniaxial para estimar TWC, os ensaios uniaxiais realizados no bloco B forma utilizados para tal. A correlação de Wilson apresentada na equação 232 se encontra em psi e a correlação de Tronvoll apresentada na equação 231 se encontra em MPa.

O relatório técnico de análise de produção de areia no campo de Saint Malo no Golfo do México[34], Palmer et Higgs mostram o gráfico apresentado por Willson [33], será utilizado neste estudo, e por isto se encontra em psi, conforme Figura 147. Trata-se de um slide de apresentação que cruza os dados dos ensaios de TWC contra os dados de UCS, juntamente com uma curva de correlação cuja equação não é fornecida. Não há muita informação acerca da origem dos dados empregados na correlação. Ajustando-se uma nova curva de potência pelos dados chega-se a uma curva similar à de Willson, que fornece a resistência TWC em psi, conforme 232. Neste gráfico foi acrescentada a correlação de Tronvoll, já convertida para psi e os ensaios de TWC realizados neste estudo.

A partir dos ensaios realizados de TWC nos CP-10, CP-15 e CP-18, foram realizados mais três ensaios, CP-12, CP-14 e CP-16, cada qual com a mesma relação de OD:ID para cada corpo de prova mencionado acima. Como já era conhecida a resistência para cada relação de OD:ID, os próximos ensaios foram realizados de modo que o incremento de pressão fosse mais lento próximo a resistência do TWC esperado, fato que permitiu observar melhor a evolução do mecanismo de ruptura e estimar com maior precisão a tensão em que se inicia o mesmo.

Portanto será apresentado na Figura 147 uma coletânea de ensaios de TWC -UCS, com os ajustes propostos por Wilson e Tronvoll e valores de TWC para os seis ensaios realizados. Dos três primeiros ensaios, CP-10, CP-15 e CP-18, a resistência se refere à maior tensão que a cavidade suporta antes de romper, com exceção do CP-10 que não rompeu pelo fato que a pressão de trabalho da célula é de 35MPa e não poder-se-ia exceder este valor. Referentes aos três últimos ensaios, CP-12, CP-14 e CP-16, serão apresentada valores de TWC onde se iniciou o mecanismo de ruptura e o valor máximo que a cavidade suporta antes de romper.

Realmente se esperava que existisse um fator de escala com a relação OD:ID, e como conhecido da geotecnia, para problemas de cavidade circular, conforme a relação OD:ID aumenta, a resistência da rocha a ruptura diminui, fato observado na Figura 147.

Os resultados de resistência obtidos através dos ensaios de TWC para OD/ID igual a 3 se encontram na porção central entre a correlação de Tronvoll e Wilson, mais próximo um pouco da correlação de Wilson. Fato esperado já que a coletânea de ensaios de TWC tem relação de OD/ID igual a 3 [34].

Já para os ensaios de TWC com OD/ID 4 os resultados se encontram bem próximos da correlação de Tronvoll, fato que nos induz a crer que a correlação do mesmo super dimensiona os valores de resistência, ao menos para este material.

Já os resultados dos ensaios de TWC, cujo OD/ID é 2, apresentaram valores inferiores a correlação de Tronvoll fato que era de se esperar.

Percebe-se também que a resistência da rocha é função da trajetória de tensões e da duração do ensaio, ou seja, do tempo, devido às diferenças entre os resultados provenientes dos três primeiros ensaios e dos três últimos ensaios. Já que os primeiros ensaios possuíram maiores incrementos de carregamento e por isto menor tempo de ensaio. Já os últimos ensaios os incrementos de carregamentos foram maiores no início do ensaio e quando o carregamento aplicado se aproximava do valor esperado de resistência do ensaio de TWC, eram aplicados valores de incremento de carregamento bem pequenos para se observar melhor o início e o desenvolvimento das bandas cisalhante, e por isto os ensaios eram mais longos isto para valores próximos da ruptura

É possível observar que ocorre mudança no formato das bandas cisalhantes com relação ao tamanho do diâmetro do furo, ou mais especificamente, com a relação comprimento específico e raio do furo, conforme equação 233. A concavidade da banda cisalhante passa de convexa a côncava conforme a relação
mencionada acima aumenta, ou seja, o raio do furo diminui, conforme Figura 144 até Figura 146.

Já que o material utilizado nestes ensaios é proveniente do mesmo bloco e similares, por isto acreditasse que possuam o mesmo valor de comprimento específico em todos os corpos de prova. Ao supor que o comprimento característico do material seja o mesmo para os diversos corpos-de-prova apenas tem-se uma variável que é o diâmetro do furo, dai se observar que quanto maior a relação OD/ID maiores os efeitos da microestrutura, ou seja, da rotação das partículas.

Como apresentado por Rocio [13] o modelo de Bogdanova e Lippmann Modificado reproduz o modo de ruptura referente a uma cúspide. Acredita-se que pelo fato de existir parâmetros intrínsecos do material nas leis constitutivas do modelo e de existir duas funções de escoamento e de potencial plástico. O primeiro par de funções corresponde ao contínuo clássico e o segundo par corresponde apenas aos efeitos da microestrutura. O fato de ter duas funções de escoamento e de potencial plástico elimina a necessidade de se utilizar vetores h_i . Pois estes vetores são obtidos a partir de uma função de distribuição de probabilidade uniforme para ocorrência de contatos entre partículas vizinhas, isso para a microestrutura representativa de maneira média do meio de Cosserat[12]. Daí acredita-se que o modelo consegue representar de maneira mais precisa a localização da deformação quando a partícula do meio exerce fator preponderante no processo.

 $TWC = 6.0841(UCS)^{0.6346}$ $TWC = 127.2UCS^{0.5212}$ $R_i = \frac{l}{r}$ Onde:

l: comprimento característico; e

r : raio interno do furo.





TWC-01_44.1MPa_@33.75mm_CP-10 TWC-04_41MPa_@33.75m_CP-12

Figura 144 – Tomografia de uma seção transversal do CP-10 e CP-12- Bloco B.



(a) TWC-02_35.9MPa_Seções nas seguintes profundidades: 20.0, 25.0 e 85.0mm_CP-15



(b) TWC-05_35.2MPa_Seções nas seguintes profundidades: 37.5, 62.5 e 92.5mm_CP-14 Figura 145 – Tomografia de três seções transversais do CP-15 e CP-14- Bloco B.



(a) TWC-03_25.5MPa_Seções nas seguintes profundidades: 10.0 e 36.25mm_CP-18





Figura 146 – Tomografia de duas seções transversais do CP-18 e de três seções transversais do CP-16- Bloco B.



Figura 147 – Ajuste da relação TWCxUCS de Tronvoll e Wilson e dados obtidos da literatura e dos ensaios realizados no Botucatu do Bloco B.