



Dario Prada Parra

Análise numérica e experimental do canhoneio a laser em rochas carbonáticas

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga
Co-orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr

Rio de Janeiro
Setembro de 2016



Dario Prada Parra

Análise numérica e experimental do canhoneio a laser em rochas carbonáticas

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Sergio Barreto da Fontoura

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Luiz Carlos Guedes Valente

WSN Sistemas de Monitoração Ltda.

Dr. Paulo Dore Fernandes

Petróleo Brasileiro

Prof. Cícero Martelli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Sully Milena Mejia Quintero

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC –Rio

Rio de Janeiro, 29 de setembro de 2016

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Dario Prada Parra

Graduou-se em Engenharia Mecânica no Departamento de Engenharia Mecânica da UIS (Universidad Industrial de Santander) localizada em Bucaramanga, Colômbia, em 2007. Para a dissertação de mestrado na PUC-Rio, trabalhou no desenvolvimento de um sensor de fibra óptica para determinar mudanças de fase do dióxido de carbono (CO₂).

Ficha Catalográfica

Prada Parra, Dario

Análise numérica e experimental do canhoneio a laser em rochas carbonáticas / Dario Prada Parra ; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga ; co-orientador: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. – 2016.

174 f. ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Perfuração a laser de rochas. 3. Canhoneio a laser. 4. Técnicas de canhoneio. 5. Rochas carbonáticas. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Vargas Jr., Eurípedes do Amaral. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

A meus pais Darío e Graciela e irmãos pelo apoio,
Força e confiança

Agradecimentos

Ao Deus criador de tudo, por estar sempre a meu lado, acompanhando-me no dia a dia e dando força e coragem para não desistir em mim caminho para atingir meu sonho.

Agradeço a minha mãe Graciela por seu amor e dedicação, sem ela não fosse possível para mim atingir meus sonhos.

A meus irmãos Patrícia, Jorge e Eliana, pelo apoio incondicional na realização deste trabalho

Ao meu orientador Professor Arthur Braga e co-orientador Professor Eurípedes do Amaral Vargas pelo estímulo, dedicação e conhecimentos compartilhados para a realização deste trabalho.

A Bruno Silva por sua grande ajuda, tempo e colaboração.

Ao Nilthson Noureña e Juliana Meza por sua ajuda incondicional nos momentos mais difíceis.

Ao Cesar, Neileth e Dona Araceli, por sua amizade e colaboração incondicional.

A Paula Gouvêa pelo grande apoio e orientação durante a realização desta tese

Aos meus amigos da pós graduação do DEM, especialmente a Pedro Tobar, William, Jose e Eric, que sempre estiveram ao meu lado me ajudando sempre que foi possível.

Ao Rodrigo e Sully pelo apoio e colaboração no corte e instrumentação dos corpos de prova.

A os funcionários do laboratório de estruturas do departamento de engenharia civil da PUC Rio, especialmente a Marques, José Nilson e Euclides.

Ao Hugo Gomes e todo o pessoal do laboratório de sensores da fibra ótica (LSFO)

A os funcionários do departamento de engenharia mecânica da PUC Rio, que sempre me auxiliaram em tudo o que precisei.

Aos professores da Engenharia Mecânica da PUC Rio pelos ensinamentos transmitidos.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A todos os que de certa forma contribuíram e acompanharão a cumprir este grande objetivo.

Resumo

Parra, Dario Prada; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Análise numérica e experimental do canhoneio a laser em rochas carbonáticas.** Rio de Janeiro, 2016. 174p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Atualmente, os lasers de alta potência estão sendo testados pela indústria de petróleo como ferramentas de perfuração. Isto ocorre visando dois objetivos fundamentais: (i) aumentar a eficiência na perfuração de poços (maior taxa de penetração) e (ii) melhorar o controle da geometria do corte de revestimento no processo de canhoneio de poço. Este trabalho tem como objetivo contribuir para a tecnologia de canhoneio a laser em rochas carbonáticas através do desenvolvimento de técnicas para aumentar o volume de rocha removida por unidade de tempo. Estudou-se o comportamento termomecânico das rochas carbonáticas quando um laser é utilizado como ferramenta de perfuração no processo de canhoneio. Este conhecimento, obtido através de experimentos e simulações, forneceu dados para a otimização dos parâmetros de perfuração. Foram investigadas as condições de perfuração estática (não há movimentação do feixe do laser) e dinâmica (o feixe do laser percorre uma trajetória espiral). Além disso, foram investigados os resultados da perfuração sob pressão atmosférica e também utilizando uma câmara de pressão projetada para emular a pressão confinante do reservatório. Foram realizados testes experimentais de perfuração a laser com corpos de prova feitos a partir da rocha Bege Bahia. O Bege Bahia é um afloramento utilizado para simular as rochas encontradas nos reservatórios do Pré-sal. A análise destes corpos de prova foi feita através de inspeção e da caracterização por microtomografia, permitindo observar e caracterizar as propriedades da rocha, além da zona termicamente afetada (ZTA), características geométricas do furo, e valores da energia específica da perfuração. Estes resultados foram comparados com resultados obtidos através de simulações. Na modelagem numérica, o processo de canhoneio foi simulado pelo método de elementos finitos através de um modelo termomecânico elástico transiente axissimétrico que verificou as condições de perfuração. O modelo numérico permitiu observar o comportamento das tensões e temperaturas nos testes que envolvem altas temperaturas e altas pressões. Estas grandezas são usualmente

difíceis de serem medidas em ensaios experimentais e, portanto, não foram observadas nos ensaios experimentais discutidos nesta tese. Também foram obtidos através da modelagem numérica valores para propriedades da rocha e da zona termicamente afetada (ZTA), características geométricas do furo, e valores da energia específica da perfuração. Os resultados numéricos obtidos foram comparados com resultados dos ensaios experimentais. Os resultados obtidos mostraram que a condição de perfuração dinâmica consegue remover uma quantidade maior de material e produzir uma ZTA maior em Comparação com o teste estático, gerando uma melhor relação tempo x potência. Os testes estáticos e dinâmicos permitiram se chegar às condições de canhoneio mais eficientes para a perfuração da rocha. A análise de tensões do modelo mostrou uma correlação compatível com o perfil do dano encontrado nos ensaios experimentais.

Palavras-chave

Perfuração a laser de rochas; Canhoneio a laser; Técnicas de canhoneio;
Rochas carbonáticas;

Abstract

Parra, Dario Prada; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Numerical and experimental analysis of laser-based perforation in carbonate rocks.** Rio de Janeiro, 2016. 174p. Tese de Doutorado— Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Currently, the petroleum industry is testing high power lasers as drilling tools. The use of these lasers for this application has two main reasons: (i) to increase the efficiency of well drilling (higher penetration rate) and (ii) to improve the control of the geometry of the hole in the casing during the perforation process of the well. The present thesis has the purpose of contributing to the laser perforation technology in carbonate rocks by developing techniques to increase the volume of rock removed by unit of time. The thermo-mechanical behavior of the carbonate rocks was studied when a laser is used as the drilling tool in the perforation process. This knowledge, obtained through experiments and simulations, supplied data for the optimization of the drilling parameters. Both static (the laser beam does not move) and dynamic (the laser beam moves in a spiral trajectory) drilling conditions were investigated. Also investigated were drilling conditions under atmospheric pressure and under high pressure, where a pressure chamber designed to emulate pressure conditions of reservoirs was used. Experimental tests were performed by laser drilling samples made of Bege Bahia rock. This rock is used to simulate rocks found in pre-salt reservoirs. The analysis of these samples was performed through inspection and microtomography characterization, allowing the observation of properties of the rocks and of the heat affected zone (HAZ), geometric characteristics of the hole, and values of the drilling specific energy. These results were compared to the results obtained by simulations. In the numerical modeling, the perforation process was simulated with the finite element method through a transient axisymmetric thermo-mechanical elastic model that verified the drilling conditions. The numerical model allowed the observation of the behavior of the tensions and temperatures in tests involving high temperatures and pressures. These properties are usually difficult to measure in experimental tests and, therefore, were not measured during the experimental tests discussed in this thesis. Also obtained by numeric modeling were: properties of the rock and of the HAZ, geometric

characteristics of the hole, and values of the drilling specific energy. The numeric results obtained were compared to the experimental results. The results obtained showed that the dynamic drilling condition is able to remove a larger amount of material and produce a larger HAZ, compared to the static condition, thus generating a better time x power relation. The static and dynamic tests allowed reaching more efficient conditions for rock drilling. The analysis of the tension of the model showed a compatible correlation with the damage profile found in the experimental tests.

Keywords

Laser drilling; laser-based perforation; perforation techniques; carbonate rock;

Sumário

1	Introdução	22
1.1.	Motivação	24
1.2.	Objetivos	24
1.3.	Composição da tese	25
2	Revisão Bibliográfica	27
2.1.	Rochas Carbonáticas	27
2.1.1.	Principais minerais carbonáticos	28
2.1.2.	Classificação geral das rochas carbonáticas	30
2.2.	Técnicas tradicionais de perfuração	31
2.3.	Canhoneio	33
2.4.	Laser	36
2.4.1.	Tipos de Laser	37
2.4.2.	Parâmetros importantes na perfuração a laser	39
2.5.	O laser na indústria do petróleo	41
2.6.	Energia específica (caso estático)	45
2.7.	Energia específica de corte (caso dinâmico)	49
3	Procedimento Experimental e Modelagem	53
3.1.	Caraterização Petrofísica	53
3.1.1.	Porosidade e Permeabilidade	54
3.1.2.	Ensaio de Resistência	55
3.2.	Preparação dos corpos de prova	56
3.3.	Microtomografia (MRX)	57
3.3.1.	Processamento e análise digital de imagens	60
3.4.	Montagem experimental	62
3.4.1.	Bancada experimental	62
3.4.2.	Câmara de pressão	64
3.5.	Simulação	66
3.5.1.	Modelagem por elementos finitos	66

3.5.2. Modelo Numérico	67
4 Resultados e Análise	77
4.1.1. Análise Quantitativa (método Rietveld)	78
4.1.2. Análise Termogravimétrica (TG)	79
4.1.3. Lente de distância focal de imagens	80
4.2. Resultados da Perfuração do Teste estático	82
4.2.1. Teste estático de 2s, 10s e 20s sem pressão radial	82
4.2.2. Teste estático de 2s,10s e 20s segundos com pressão radial 6,89 MPa	83
4.3. Resultados da Perfuração do Teste dinâmico	84
4.3.1. Teste dinâmico de 100 segundos sem pressão radial e um com um avanço	84
4.3.2. Teste dinâmico de 100 segundos com pressão radial 6,89 MPa e com um avanço	86
4.3.3. Teste dinâmico de 200 segundos sem pressão radial e dois avanços	86
4.3.4. Teste dinâmico de 200 segundos com pressão radial 6,89 MPa e dois avanços	87
4.3.5. Teste dinâmico de 200 segundos com pressão radial 10,34 MPa e dois avanços	88
4.4. Resumo dos resultados dos testes dinâmico	89
4.5. Microtomografias do teste estático sem pressão e com pressão	91
4.5.1. Microtomografias do teste de 10 segundos sem pressão	92
4.5.2. Microtomografias do teste de 10 segundos com pressão radial de 6,89 MPa	96
4.5.3. Microtomografias do teste de 2 segundos com pressão radial de 13,78 MPa	99
4.5.4. Microtomografias do teste de 5 segundos com pressão radial de 13,78 MPa	102

4.5.5. Microtomografias do teste de 20 segundos com pressão radial de 13,78 MPa	105
4.6. Microtomografias do teste dinâmico com pressão de 6,89 MPa	107
4.7. Resumo dos resultados das microtomografias	111
4.8. Resultados da Modelagem Numérica do Teste Estático	114
4.8.1. Teste estático 2 segundos sem pressão radial	114
4.8.2. Teste estático 2 segundos com pressão radial	121
4.8.3. Teste estático 10 segundos sem pressão radial	127
4.8.4. Teste estático 10 segundos com pressão radial	133
4.8.5. Teste estático 20 segundos sem pressão radial	140
4.8.6. Teste estático 20 segundos com pressão radial	145
4.9. Comparação entre os resultados das microtomografias e a modelagem numérica do teste estático	150
4.10. Resultados da Modelagem Numérica do Teste Dinâmico	152
4.10.1. Teste Dinâmico 100 segundos sem pressão radial	152
4.10.2. Teste Dinâmico 100 segundos com pressão radial	159
4.11. Comparação entre os resultados das microtomografias e da modelagem numérica do teste dinâmico	167
5 Conclusões e Recomendações	169
6 Referencias bibliográficas	172

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Relação entre potência e energia específica.....	46
Tabela 2 - Dados técnicos do Laser.....	63
Tabela 3 - Valor das constantes termomecânicas utilizados no modelo.....	71
Tabela 4 - Análise semiquantitativa do Bege Bahia.....	78
Tabela 5 - Análise qualitativa do Bege Bahia.....	78
Tabela 6 - Valores dos testes estáticos sem pressão.....	83
Tabela 7 - Valores dos testes estáticos com pressão radial de 6,89MPa.....	84
Tabela 8 - Valores dos testes dinâmicos de 100s sem pressão.....	85
Tabela 9 - Valores dos testes dinâmicos de 100s com pressão radial de 6,89MPa.....	86
Tabela 10 - Valores dos testes para a perfuração de 200s (dois avanços) sem pressão.....	87
Tabela 11 - Valores dos testes de 200s..... com pressão radial de 6,89MPa (dois avanços).....	88
Tabela 12 - Valores dos testes de 200s..... com pressão radial de 10,34MPa (dois avanços).....	89
Tabela 13 - configuração das condições de aquisição do microtomógrafo.....	92
Tabela 14 - Valores de volume de furo e zona termicamente afetada.....	95
Tabela 15 - Valores de volume de furo e zona termicamente afetada.....	99
Tabela 16 - Valores de volume de furo e zona termicamente afetada.....	102
Tabela 17 - Valores do furo e da zona termicamente afetada.....	104
Tabela 18 - Valores do volume de furo e zona termicamente afetada.....	107
Tabela 19 - Valores do volume de furo e de ZTA.....	111
Tabela 20 - Resumo dos resultados experimentais através da microtomografia.....	112
Tabela 21 - Comparação dos resultados obtidos pelos métodos da glicerina e da microtomografia, sem pressão radial.....	113
Tabela 22 - Compara os resultados obtidos pelos métodos..... da glicerina e da microtomografia com pressão radial.....	114
Tabela 23 - Valores obtidos dos raios pelos métodos da modelagem e da microtomografia.....	151
Tabela 24 - Resume dos valores da obtidos pelos métodos da modelagem e microtomografia.....	168

Lista de Figuras

Figura 1 - Localização do Pré-sal no Brasil (área na cor rosa).....	
(Schlumberger 2008).....	22
Figura 2 - Profundidade do Pré-sal no Brasil. (Schlumberger 2008).....	23
Figura 3 - Amostra de calcita.	28
Figura 4 - Amostra de Argonita.....	29
Figura 5 - Amostra de Dolomita.....	30
Figura 6 - Classificação das rochas carbonáticas (Ahr, 2008).	30
Figura 7 - Mecanismo básicos de perfuração
Fonte adaptado de (Maurer, 1980).	32
Figura 8 - Mecanismo de fragmentação térmica (spallation).....	
(Xu, Chicago 2004).	33
Figura 9 - Processo de canhoneio.....	34
Figura 10 - Classificação do canhoneio.....	
a) Underbalance, b) Overbalance, c) Extreme Overbalance.	35
Figura 11 - Funcionamento básico de um laser de estado sólido.	37
Figura 12 - Radiação do laser fonte adaptado.	38
Figura 13 - Classificação do laser baseado na fonte,.....	
natureza de emissão e comprimento de onda.	39
Figura 14 - Distância focal e diâmetro do feixe.	41
Figura 15 - Energia específica vs percentagem da potência.....	
Fonte: Salehi et al (2007).	46
Figura 16 - Parâmetros de perfuração.	47
Figura 17 - Áreas de corte diferentes.	48
Figura 18 - Parâmetros da energia específica de corte.	49
Figura 19 - Sistema de corte em túnel.	52
Figura 20 - Representação esquemática do ensaio.	55
Figura 21 - Corpos de prova Bege Bahia.	56
Figura 22 - Digitalização da imagem e o modelo 3D (Gomes, 2001).....	58
Figura 23 - Microtomógrafo Zeiss Xradia 510 (Zeiss., 2015).	58
Figura 24 - Interior do microtomógrafo Zeis Xradia 510 Versa.	59
Figura 25 - Amostras microfotografadas.....	59

Figura 26 - Rotina de blocos para processamento digital de imagens.....	60
Figura 27 - Fluxograma dos testes de laboratório.	62
Figura 28 - Software de controle do laser.	63
Figura 29 - Montagem experimental do laser.....	64
Figura 30 - Vaso de pressão.	65
Figura 31 - Bancada experimental para teste com pressão.....	65
Figura 32 - Representação do modelo Axissimetrico.....	68
Figura 33 - Modelo axissimetrico em coordenadas cilíndricas.	69
Figura 34 - Condições de contorno térmicas e mecânicas.....	70
Figura 35 - Condutividade térmica em função da temperatura.	71
Figura 36 - Massa específica em função da temperatura.....	72
Figura 37 - Expansão térmica em função da temperatura.	72
Figura 38 - Calor específico em função da temperatura.....	73
Figura 39 - Modulo de elasticidade em função da temperatura.	73
Figura 40 - Ilustração da aplicação da fonte de calor sem pressão radial.	74
Figura 41 - Ilustração da fonte de calor com pressão radial.....	75
Figura 42 - Ilustração do modelo dinâmico sem pressão radial externa.	75
Figura 43 - Ilustração do modelo dinâmico com pressão radial externa.	76
Figura 44 - Perfil de perda de massa do Bege Bahia.....	80
Figura 45 - Densidade de potência em função da área de incidência e a potência.....	81
Figura 46 - Densidade de potência em função do ponto focal e a potência.	81
Figura 47 - Trajetória espiral.....	85
Figura 48 - Energia específica de corte vs Tipo de teste.....	90
Figura 49 - Profundidade vs Tipo de teste.....	90
Figura 50 - Corpo de prova microtomografiado antes da perfuração.....	93
Figura 51 - vista superior e imagem 3D depois de furado o corpo de prova.....	93
Figura 52 - Corte frontal da imagem.	94
Figura 53 - Profundidade da perfuração para 10s sem pressão.	94
Figura 54 - Análise digital de imagem.	95
Figura 55 - Reconstrução em 3D do corpo de prova antes da perfuração.....	96
Figura 56 - Vista superior e imagem 3D do corpo de prova furado.....	97
Figura 57 - Corte frontal apresentando os diâmetros externo e interno.	97
Figura 58 - Corte frontal apresentando a profundidade da perfuração.....	98

Figura 59 - Análise digital da imagem.	99
Figura 60 - Imagem 3D e corte frontal do corpo de prova depois da perfuração.	100
Figura 61 - Diâmetro e geometria da perfuração.	100
Figura 62 - Profundidade da perfuração para um tempo de 2s.	101
Figura 63 - Análise das imagens para calcular o volume do furo e a ZTA.	101
Figura 64 - Reconstrução em 3D do corpo de prova irradiado por 5s.	102
Figura 65 - Diâmetro externo da perfuração.	103
Figura 66 - Geometria e profundidade do corpo irradiado por 5s.	103
Figura 67 - Análise e processamento para calcular o volume do furo e ZTA da perfuração.	104
Figura 68 - Imagem 3D e corte frontal do corpo de prova irradiado por 20s.	105
Figura 69 - Diâmetro externo e interno da perfuração.	106
Figura 70 - Corte frontal e profundidade da perfuração.	106
Figura 71 - Análise das imagens para calcular o volume do furo e ZTA.	107
Figura 72 - Imagem em 3D e corte do corpo de prova irradiado por 100s.	108
Figura 73 - Vista superior do corpo de prova perfurado.	108
Figura 74 - Geometria da perfuração do corpo de prova de 100s.	109
Figura 75 - Profundidade do corpo de prova irradiado por 100s.	110
Figura 76 - Análise das imagens para calcular o volume e ZTA da perfuração..	110
Figura 77 - Parâmetros dos testes estáticos.	112
Figura 78 - Perfil de temperatura para um tempo irradiado de 2s.	115
Figura 79 - Distribuição de temperatura no instante 2s.	116
Figura 80 - Perfil da tensão radial para a perfuração de 2s.	116
Figura 81 - Distribuição da tensão radial no instante de 2s.	117
Figura 82 - Gráfico bidimensional da tensão radial em função da temperatura..	118
Figura 83 - Perfil da tensão circunferencial na perfuração de 2s.	119
Figura 84 - Distribuição da tensão circunferencial da perfuração de 2s.	120
Figura 85 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial..... em função da temperatura.	121
Figura 86 - Perfil de temperatura para a perfuração de 2s com pressão radial....	122
Figura 87 - Distribuição de temperatura no instante de 2s da perfuração com pressão radial.	122
Figura 88 - Perfil da tensão radial da perfuração de 2s com pressão radial.	123

Figura 89 - Distribuição da tensão radial no instante de 2s,.....	
com pressão radial.	124
Figura 90 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante de 2s.....	125
Figura 91 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 2s	
com pressão radial.	125
Figura 92 - Distribuição da tensão circunferencial no instante 2s.....	
com pressão radial.	126
Figura 93 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial.....	
no instante de 2s com pressão radial.	127
Figura 94 - Perfil de temperatura da perfuração de 10s sem pressão.....	128
Figura 95 - Distribuição da temperatura no instante de 10s sem pressão.....	128
Figura 96 - Perfil da tensão radial na perfuração de 10s sem pressão.....	129
Figura 97 - Distribuição da tensão radial no instante de 10s sem pressão radial.....	130
Figura 98 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante 10s	
sem pressão.....	131
Figura 99 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 10s sem pressão..	132
Figura 100 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 10s.....	
sem pressão.....	132
Figura 101 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial.....	
no instante de 10s sem pressão.	133
Figura 102 - Perfil de temperatura da perfuração 10s com pressão.	134
Figura 103 - Distribuição de temperatura no instante de 10s com pressão.	134
Figura 104 - Perfil da tensão radial da perfuração de 10s com pressão.	135
Figura 105 - Distribuição da tensão radial no instante de 10s.....	
com pressão radial.	136
Figura 106 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante 10s	
com pressão.	137
Figura 107 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 10s	
com pressão.	138
Figura 108 - Distribuição da tensão circunferencial no instante 10s.....	
com pressão.	139
Figura 109 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial.....	
no instante 10s com pressão.	140
Figura 110 - Perfil de temperatura da perfuração de 20s sem pressão.....	141

Figura 111 - Distribuição da temperatura no instante de 20s sem pressão.	141
Figura 112 - Perfil da tensão radial na perfuração de 20s sem pressão.....	142
Figura 113 - Distribuição da tensão radial da perfuração de 20s sem pressão....	142
Figura 114 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante de 20s.....	143
Figura 115 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 20s sem pressão.	144
Figura 116 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 20s.....	144
Figura 117 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial.....	
no instante de 20s sem pressão.	145
Figura 118 - Perfil da temperatura da perfuração de 20s com pressão radial.	146
Figura 119 - Distribuição da temperatura no instante de 20s com pressão.	146
Figura 120 - Perfil de tensão radial na perfuração de 20s com pressão radial. ...	147
Figura 121 - Distribuição da tensão radial no instante de 20s.....	
com pressão radial.	147
Figura 122 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante de 20s.....	
com pressão.	148
Figura 123 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 20s	
com pressão.	149
Figura 124 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 20s.....	
com pressão radial.	149
Figura 125 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial no instante de 20s	
com pressão radial.	150
Figura 126 - Comparação dos raios entre a modelagem e a microtomografia.	151
Figura 127 - Perfil de temperatura do teste dinâmico de 100s	
sem pressão radial.....	153
Figura 128 - Distribuição da temperatura no instante de 100s sem pressão.	153
Figura 129 - Perfil da tensão radial da perfuração de 100s sem pressão.....	154
Figura 130 - Distribuição da tensão radial no instante de 100s sem pressão.	155
Figura 131 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante	
de 100s sem pressão.	156
Figura 132 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 100s	
sem pressão.....	156
Figura 133 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 100s.....	
sem pressão.....	157

Figura 134 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial.....	
no instante de 100s sem pressão.	158
Figura 135 - Distribuição da tensão axial no instante de 100s sem pressão.....	159
Figura 136 - Perfil da temperatura do teste dinâmico de 100s	
com pressão radial.	160
Figura 137 - Distribuição da temperatura no instante de 100s	
com pressão radial.	160
Figura 138 - Perfil da tensão radial da perfuração de 100s	
com pressão radial.	161
Figura 139 - Distribuição da tensão radial no instante de 100s.....	
com pressão radial.	162
Figura 140 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante de 100s.....	
com pressão radial.	163
Figura 141 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 100s	
com pressão radial.	164
Figura 142 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 100s.....	
com pressão radial.	165
Figura 143 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial.....	
no instante de 100s com pressão radial.	166
Figura 144 - Distribuição da tensão Axial no instante de 100s.....	
com pressão radial.	167
Figura 145 - Comparação dos raios e a profundidade	
entre a modelagem e a microtomografia.	168

Nomenclatura

EE – Energia específica

EEC – Energia Específica de Corte

ROP – *Rate of Penetration*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

MIRACL – *Mid-infrared advanced chemical laser*

COIL – *Chemical Oxygen Iodine Laser*

HF – Fluoreto de hidrogênio

DF – Fluoreto de deutério

HPFL – High Power Fiber Laser

ZTA Zona Termicamente Afetada

1

Introdução

Os reservatórios de rochas carbonáticas são considerados de grande importância na produção mundial de petróleo e gás, já que seus poços produtores detêm uma alta percentagem da produção mundial de petróleo. Estes reservatórios são caracterizados por sua complexidade, devido a sua variada heterogeneidade. No Brasil estes reservatórios apresentam um importante desafio, mediante a nova descoberta de petróleo no Pré-sal.

O Pré-sal encontra-se localizado no litoral brasileiro, a 200 km da costa, exigindo grandes esforços em pesquisa e desenvolvimento de tecnologia para extrair petróleo e gás natural de seus reservatórios.

A região, que tem recebido destaque pelas recentes descobertas da Petrobras, encontra-se no subsolo oceânico na área que engloba três bacias sedimentares: Santos, Campos e Espírito Santo. O Pré-sal estende-se do norte da Bacia de Campos ao sul da Bacia de Santos, e desde o Alto Vitória (Espírito Santo) até o Alto de Florianópolis (Santa Catarina), como pode ser observado na Figura 1.



Figura 1 - Localização do Pré-sal no Brasil (área na cor rosa) (Schlumberger 2008)

No Brasil, o conjunto de campos petrolíferos do Pré-sal situa-se abaixo de lâminas d'água cuja espessura varia de 1.000 a 2.000 metros, e entre 4.000 e 6.000 metros de profundidade do subsolo (Figura 2). O petróleo encontrado nesses campos é catalogado segundo a escala API (*American Petroleum Institute*) como um óleo de média e alta qualidade (óleo leve acima de 30 °API e óleo médio entre 21 °API e 30 °API) (Thomas, 2001)

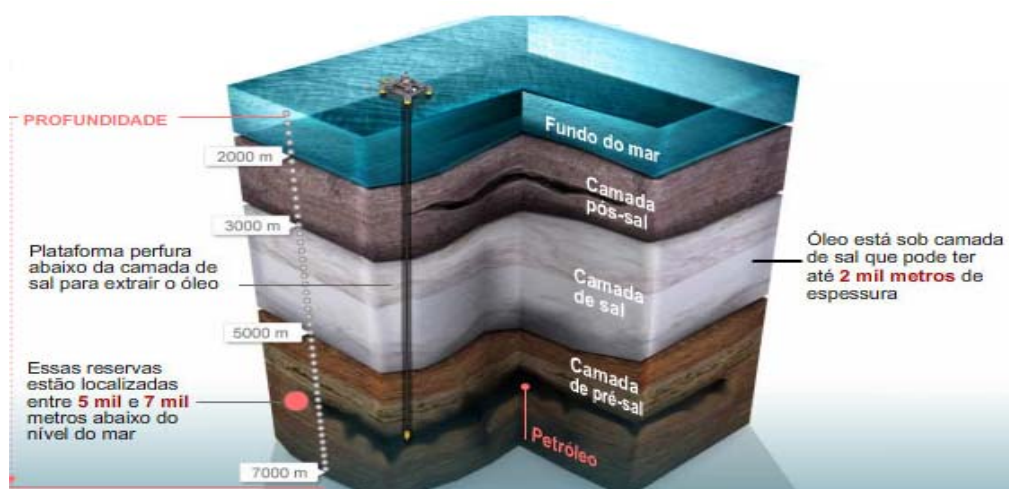


Figura 2 - Profundidade do Pré-sal no Brasil. (Schlumberger 2008)

Para atingir os objetivos propostos na extração do petróleo do Pré-sal, é necessário o desenvolvimento e otimização de técnicas que sejam capazes de viabilizá-lo, maximizando o fator de recuperação do campo.

Este estudo propõe uma nova técnica de estimulação de poço, utilizando o laser de diodo, capaz de aumentar a produtividade do poço. A utilização deste laser na perfuração estabelece canais de alta condutividade para o escoamento de fluidos entre o reservatório e o poço, facilitando o escoamento de fluido da rocha para o poço.

A tecnologia a laser é relativamente nova, tendo sido testada inicialmente na indústria militar para a detecção e destruição de mísseis, e agora está sendo testada na indústria do petróleo como ferramenta de perfuração e completção de poços. Algumas vantagens desta tecnologia para perfuração de rochas são: maior controle na geometria da perfuração, maior exatidão na perfuração do furo, capacidade de

perfurar diferentes tipos de rochas sem a necessidade de substituição da ferramenta, redução do peso da coluna de perfuração, aumento da eficiência de perfuração, aproveitamento no monitoramento *in-situ* do material perfurado, etc.

1.1. Motivação

Atualmente, há um crescente aumento da demanda na produção de petróleo e gás no Brasil. Este fato está ligado diretamente com as grandes descobertas dos reservatórios carbonáticos do Pré-sal. Este tipo de reservatório apresenta baixas taxas de penetração para perfuração com broca, obrigando assim, grandes investimentos em desenvolvimento e implementação de novas tecnologias por parte das empresas envolvidas.

Uma possível alternativa à perfuração com broca é a tecnologia a laser, que apresenta múltiplas vantagens capazes de oferecer à indústria do petróleo uma significativa redução nos custos e aumento da produtividade dos poços produtores, consequentemente, aumentando a margem de lucro.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para a tecnologia de canhoneio a laser em rochas carbonáticas através do desenvolvimento de uma técnica dinâmica para aumentar o volume de rocha removida por unidade de tempo. Este estudo pretende contribuir para a substituição da atual técnica de canhoneio pelo canhoneio a laser.

Um dos objetivos específicos do presente trabalho foi estudar o comportamento termomecânico das rochas carbonáticas quando um laser é utilizado como ferramenta de perfuração no processo de canhoneio. Este conhecimento foi obtido através de simulações e experimentos, e forneceu dados para a otimização dos parâmetros de perfuração.

Para os experimentos, foi projetada e desenvolvida uma bancada experimental para simular diferentes pressões de confinamento do corpo de prova, permitindo observar o comportamento da rocha quando ela interage com o laser sob condições de pressão similares às do reservatório.

Além disso, foi investigada a eficiência do laser no processo do canhoneio em rochas carbonáticas, tendo sido realizados diversos ensaios do tipo estáticos e dinâmicos (movimentação do feixe do laser), além de ensaios sob pressão atmosférica e sob pressão de valores similares aos encontrados nos reservatórios do Pré-sal.

A metodologia desenvolvida para alcançar os objetivos do presente trabalho está descrita a seguir:

Devido à impossibilidade de se obter uma amostra da rocha carbonática do Pré-sal, nos ensaios experimentais foi utilizada a rocha carbonática Bege Bahia, uma vez que esta rocha é de fácil obtenção e manuseio na preparação das amostras. O Bege Bahia é um afloramento utilizado para simular as rochas encontradas nos reservatórios do Pré-sal.

No método de elementos finitos foi realizada a análise numérica do modelo axissimétrico acoplado termomecanicamente para simular o comportamento termomecânico da rocha em vários cenários de pressão (pressão atmosférica e diferentes pressões de confinamento) e de movimentação (dinâmico e estático). Foram utilizados parâmetros intrínsecos de densidade, potência e distância focal.

Neste trabalho, todas as análises numéricas foram desenvolvidas na plataforma computacional ABAQUS 6.11, que serviu como um programa interativo para o acompanhamento das análises. Isto permitiu melhorar o cálculo das temperaturas e tensões, além de permitir o levantamento de dados que poderão ser utilizados em futuras pesquisas.

Finalmente, os dados coletados experimentalmente nos testes estáticos e dinâmicos foram comparados com os resultados da análise numérica.

1.3. Composição da tese

O capítulo 1 aborda esta introdução, na qual foi apresentada a pesquisa, a motivação, o objetivo geral e os objetivos específicos. O restante desta tese foi estruturado em mais cinco capítulos.

O capítulo 2 apresenta o estudo das rochas carbonáticas, as técnicas tradicionais de perfuração, a operação de canhoneio, e o estado da arte da perfuração de rochas utilizando lasers. Este capítulo discute desde o primeiro estudo

que introduziu a utilização de lasers na indústria do petróleo em 1997, até as pesquisas atuais. Finalmente, são discutidos a energia específica e a energia específica de corte como indicador da eficiência do processo de canhoneio.

O capítulo 3 apresenta a caracterização petrofísica do afloramento Bege Bahia como rocha usada nos testes de perfuração a laser, e a preparação dos corpos de prova. O capítulo também discute a microtomografia, uma técnica não destrutiva que permite a caracterização de parâmetros micro estruturais da rocha, além do processamento digital de imagens como ferramenta fundamental para calcular o volume removido e a zona termicamente afetada. Finalmente, são descritos a bancada experimental e a modelagem por elementos finitos do processo de perfuração a laser.

No capítulo 4, são apresentados os resultados das análises petrofísicas e da modelagem da fonte de calor como ferramenta de perfuração. Além disso, são discutidos os resultados experimentais e da modelagem numérica

Por fim, no capítulo 5, encontram-se a conclusão do trabalho e as recomendações para trabalhos futuro.

2

Revisão Bibliográfica

2.1. Rochas Carbonáticas

As rochas carbonáticas têm grande importância na indústria do petróleo, pois aproximadamente 50% das reservas mundiais de petróleo estão contidas em reservatórios carbonáticos. No Brasil, estima-se que 60% das reservas de petróleo estejam contidas em reservatórios carbonáticos, incluindo o Pré-sal. Por estes motivos, conhecer as propriedades físicas destas rochas é de grande importância (Schlumberger 2008).

As rochas carbonáticas são uma classe de rochas sedimentárias de origem química ou bioquímica, caracterizadas por sua anisotropia e seu sistema complexo de poros, originados em consequência de processos como a diagênese ou litificação, faturamento e dolomitização (diagênese de carbonatos). Seu processo de formação ocorreu há milhões de anos atrás, através do transporte de materiais e deposição em outras rochas pré-existentes (Ahr, 2008). O transporte pode ocorrer de quatro formas: 1. Soluções dissolvidas na água; 2. Pela ação de organismos vivos presentes na água; 3. Dissolvido por outros fluidos; e 4. Mecanicamente.

As rochas carbonáticas são compostas por mais de 50% de minerais carbonáticos, que resultam da combinação do radical $(\text{CO}_3)^{2-}$ com metais e metaloides, ou da reação do ácido carbônico com esses elementos. São exemplos: Calcita (CaCO_3); Argonita (CaCO_3); Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e, em menores proporções, a Siderita (FeCO_3), Ankerita ($\text{Ca,MgFe}(\text{CO}_3)_4$), e a Magnesita MgCO_3 .

O carbonato de cálcio (CaCO_3) se apresenta em mais de uma estrutura cristalina; isto significa que é encontrado em formas que têm composição química idêntica, porém diferentes estruturas cristalinas. Este fenômeno é conhecido como polimorfismo. As formas polimórficas do carbonato de cálcio são: calcita, aragonita e vaterita.

O processo de perfuração a laser em rochas carbonáticas apresenta uma dissociação térmica devido a sua composição química e mineralógica. Esta

dissociação produz CO_2 e óxido de cálcio, como apresenta a equação 1. Além disso, não apresenta fusão do carbonato. Esta dissociação é apresentada a temperaturas menores que 1473K, que podem ser observadas na análise térmica diferencial (DTA).



2.1.1. Principais minerais carbonáticos

A seguir, as principais características dos minerais carbonáticos são apresentadas.

Calcita (CaCO_3): provém do latim “calx” que significa cal viva, é a forma polimórfica mais estável do carbonato de cálcio, e reage fortemente com o ácido clorídrico. A calcita apresenta uma grande variedade de formas e cores, sendo a cor branca a mais representativa. Tal fato se deve principalmente às impurezas dos íons metálicos associados (Argilominerais). Suas propriedades físicas típicas são a clivagem perfeita, cristalografia trigonal, dureza Mohs igual a 3, e densidade relativa $2,71 \text{ g/cm}^3$.

O emprego mais importante da calcita é na fabricação de cimento e CaO para argamassa. A calcita é a principal matéria-prima do cimento e, quando aquecida a aproximadamente 900°C , perde CO_2 e se converte em cal vivo (CaO). Na figura 3 apresenta-se uma imagem de uma amostra de calcita.



Figura 3 - Amostra de calcita.

Aragonita (CaCO_3): é uma das formas cristalinas do carbonato de cálcio, juntamente com a calcita. Apresenta um brilho vítreo e sua coloração é não-uniforme, devido às impurezas. Suas principais propriedades são clivagem imperfeita, cristalografia ortorrômbica, dureza Mohs entre 3,5 e 4, e densidade relativa $2,94 \text{ g/cm}^3$. A figura 4 apresenta uma amostra de Aragonita.



Figura 4 - Amostra de Argonita.

Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): um mineral composto de cálcio e carbonato de magnésio. É produzido através da substituição feita por meio da troca de íons de cálcio e de magnésio da rocha calcária (CaCO_3). Sua coloração característica é branca, rósea, cinzenta e verde, com brilho vítreo. A dolomita é um minério das rochas sedimentares e metamórficas que tem várias aplicações industriais. Apresenta propriedades físicas características como a clivagem perfeita, cristalografia trigonal, dureza Mohs entre 3 e 4, e densidade relativa $2,85 \text{ g/cm}^3$. Este é um dos principais minerais encontrados nas rochas chamadas dolomita e metadolomias, como também em siltitos e mármore, onde a calcita é o principal mineral presente.

Este minério é usado como fundente na fabricação metalúrgica, na preparação de revestimentos refratários de conversores, e como rocha de construção. Está totalmente proibido como concreto mineral clínquer por seu conteúdo de MgO e

devido à sua alta expansividade. Na figura 5 encontra-se um exemplo de amostra de dolomita.



Figura 5 - Amostra de Dolomita.

2.1.2. Classificação geral das rochas carbonáticas

A classificação das rochas carbonáticas são fundamentadas em características como: composição, tipo de poro, textura, tipo de grão, fábrica e diagênese (Akbar et al., Tucker 1990).

Existem diversas classificações para as rochas carbonáticas. Arh (2008) propõe uma subdivisão baseada em fatos como: textura, padrões de crescimento biológico e origem da deposição biológica (ver figura 6).

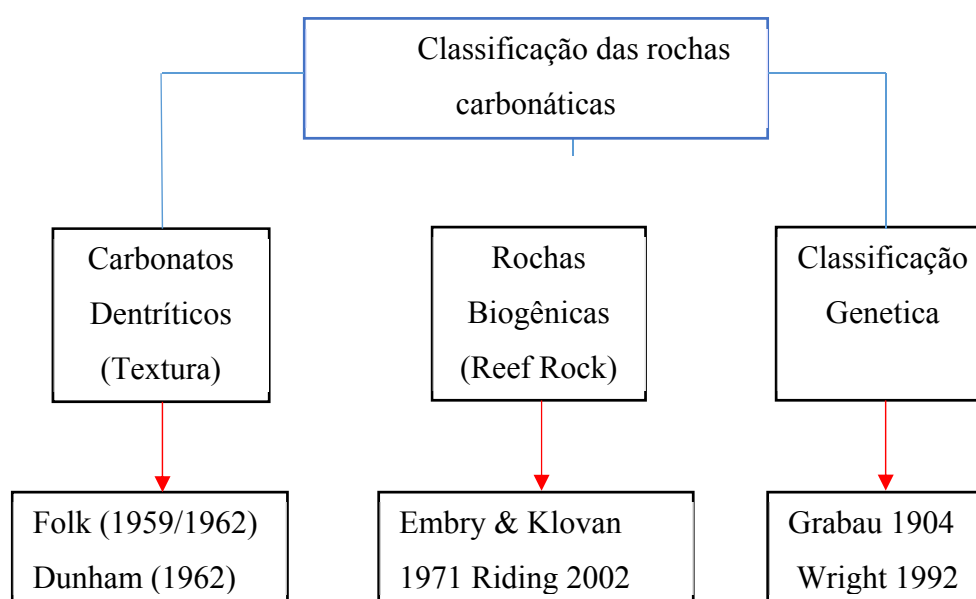


Figura 6 - Classificação das rochas carbonáticas (Ahr, 2008).

A primeira classificação dos carbonatos foi feita por Grabau (1904). Esta classificação foi uma forma confusa e pouco popular. Posteriormente, Folk (1959-1962) classificou as rochas carbonáticas baseado nas suas características litológicas, especificamente como: espaços porosos ou cimento, matriz e grãos alquímicos (Lopes, 1995).

Dunham (1962) propôs uma classificação de carbonatos detríticos baseada na textura deposicional e fundamentada em três características, que são: presença ou ausência de lama, que reflete abundância de organismos; abundância de grãos, que permita subdividir os carbonatos; e a evidência de aprisionamento de sedimentos. Esta classificação é considerada hoje uma das mais modernas e populares (Ahr, 2008).

Klovan- Embry (1971) adaptaram a classificação de Dunham para rochas carbonáticas biogênicas, e desenvolveram um esquema detalhado para descrever diferentes formas de crescimento orgânico.

Ridding (2002) faz uma classificação para rochas carbonáticas recifais (*reef rock*) fundamentada em três componentes: matriz, esqueleto e cimento. Nesta classificação proposta por Ridding são incluídos os travertinos, apesar do desenvolvimento orgânico não ser suficientemente importante para sua formação.

Devido à impossibilidade de obtenção de testemunhos do Pré-sal para a realização dos testes experimentais, utiliza-se nesse trabalho o Bege Bahia como rocha análoga, com a intenção de avaliar o comportamento termomecânico dos carbonatos no canhoneio a laser. Esta rocha é um mármore caracterizado por ser metamórfico (uma modificação química do calcário causada devido às altas temperaturas e pressões) (DOMINGUES, 2011).

2.2. Técnicas tradicionais de perfuração

Na construção e produção de um poço de petróleo as etapas com maior investimento de tempo e dinheiro são a perfuração e completação, uma vez que suas principais técnicas estão baseadas em sistemas eletromecânicos (coluna de perfuração e canhoneio).

Existem quatro mecanismos básicos para remover e desintegrar a rocha em processos de perfuração de poços e escavação de túneis, que são: fragmentação

térmica; fusão e vaporização; fratura mecânicas; e reações químicas (figura 7). Com a utilização de ferramentas avançadas, como lasers ou feixes de elétrons, os mecanismos de maior interesse na perfuração são a fragmentação térmica, fusão e vaporização

Fragmentação térmica: É produzida pelo aquecimento de uma fonte de calor, o que produz uma expansão ao material e induz um estresse suficiente que excede o limite da fratura.

Fusão e vaporização: Ocorre quando a fonte de calor subministra uma quantidade de calor que supera as temperaturas de fusão e vaporização com o objetivo de derreter e evaporizar as rochas. A temperatura de fusão das rochas ígneas varia entre 1373K e 1873K, e para os carbonatos (rochas sedimentárias) são em torno de 2273K.

Fratura mecânica: É caracterizado por usar iMPacto, abrasão ou erosão para induzir uma tensão que supera a força da rocha.

Reação química: Usa uma variedade de compostos químicos que reagem e logo desintegram ou dissolvem a rocha. Este mecanismo é custoso e pouco seguro.

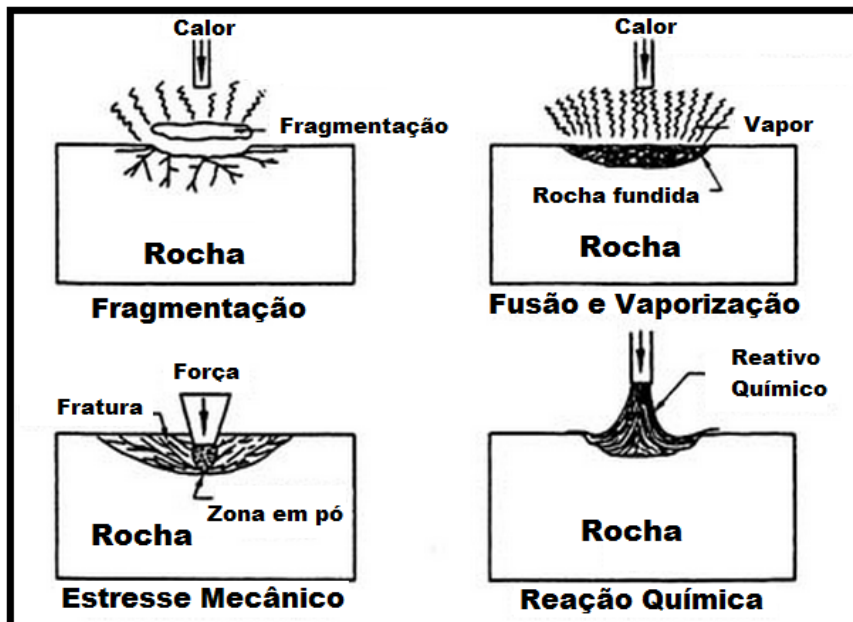


Figura 7 - Mecanismo básicos de perfuração. Fonte adaptado de (Maurer, 1980).

Segundo as pesquisas feitas, a fragmentação térmica (*spallation*) apresentada na figura 8 foi o processo mais eficiente para a perfuração da rocha, porque induz um esforço térmico que provoca a compressão, fragilizando a rocha e facilitando a sua remoção. Esta ação é produzida pela energia específica.

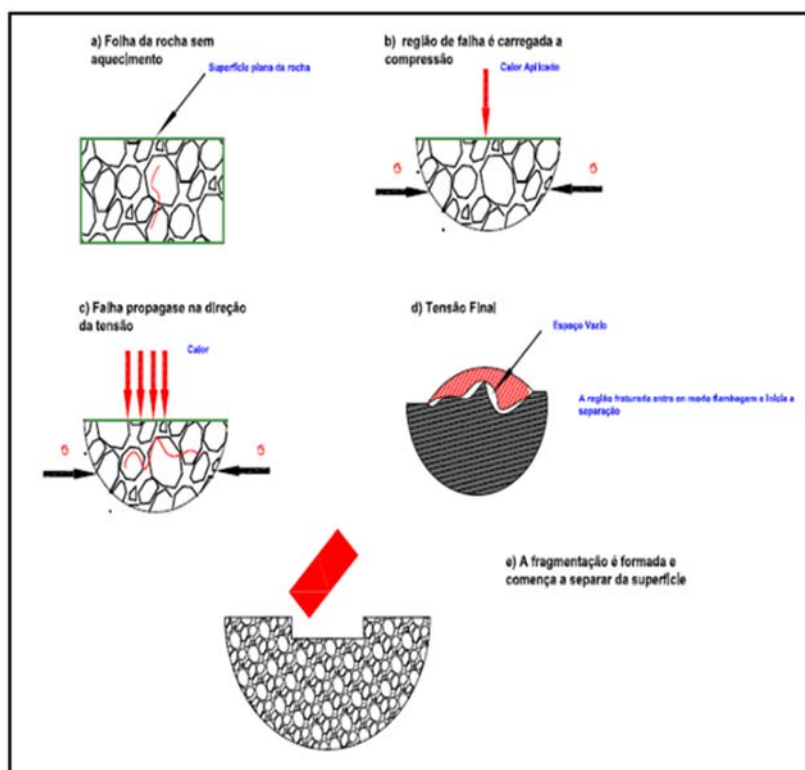


Figura 8 - Mecanismo de fragmentação térmica (*spallation*)(Xu, Chicago 2004).

2.3. Canhoneio

A operação de canhoneio consiste em gerar perfuração no tubo de revestimento, no cimento e na formação, utilizando cargas explosivas especialmente moldadas, onde o objetivo principal é estabelecer uma comunicação efetiva entre a formação produtora e o poço. A partir daí o óleo consegue deixar o reservatório e chegar até a superfície através do poço.

O canhão é um cilindro de aço com furos projetado com uma distribuição geométrica na qual se alojam as cargas explosivas.

Esta operação consiste em descer o canhão até determinada profundidade, e disparar as cargas explosivas na frente da zona produtora desejada para poder comunicar os fluidos contidos no reservatório com o fundo do poço. A figura 9 apresenta em detalhe o processo de canhoneio e o efeito das cargas explosivas no intervalo desejado.

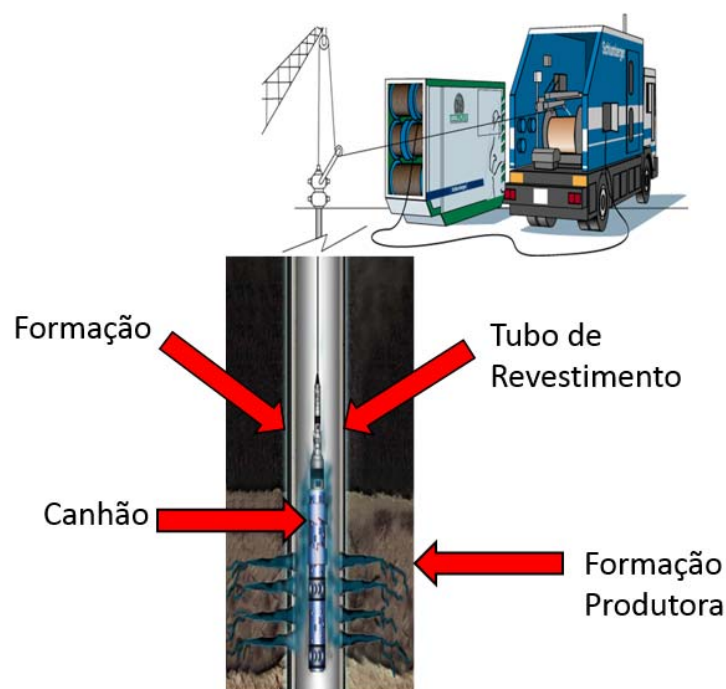


Figura 9 - Processo de canhoneio.

A técnica utilizada para o canhoneio é escolhida de acordo com os componentes do canhão que permitirão a melhor perfuração, considerando fatores do reservatório como, por exemplo, a dureza da formação, solubilidade a ácidos e a presença de fraturas naturais.

Os métodos utilizados para a operação convencional de canhoneio são relacionados com a pressão exercida pelo disparo no poço. São eles: baixa-pressão (*underbalance*), sobre pressão (*overbalance*) e sobre pressão alta (*extreme overbalance*). A figura 10 apresenta a classificação do canhoneio.

- *Underbalance* – se caracteriza quando a pressão do poço é menor que a pressão da formação. O poço entra em produção devido ao diferencial de pressão.

- *Overbalance* – a pressão hidrostática do fluido de completação está acima da formação, o que pode causar a fratura na formação por sobrecarga de pressão do fluido.

- *Extreme overbalance* - é parecido com o anterior, porém a pressão, no sentido poço para a formação, é altíssima. O objetivo é remover ou eliminar detritos nos túneis dos canhoneados.

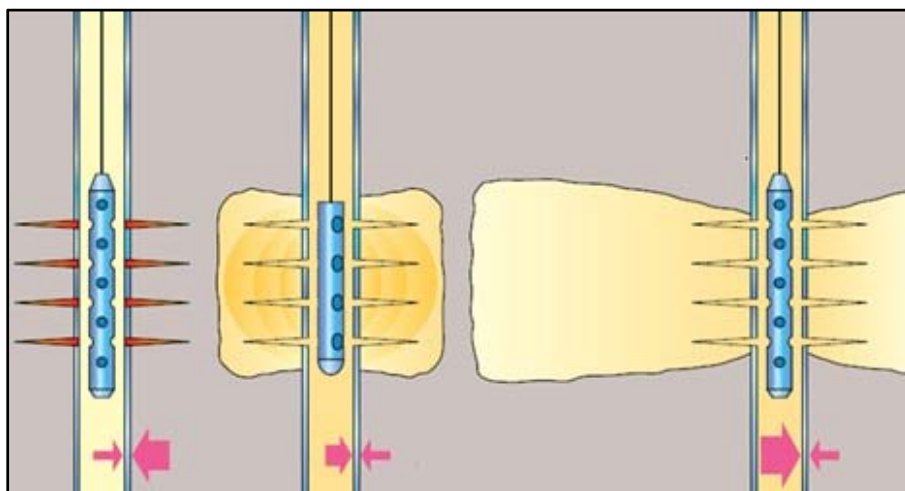


Figura 10 - Classificação do canhoneio a) Underbalance, b) Overbalance, c) Extreme Overbalance.

As limitações do canhoneio convencional são a falta de controle do diâmetro e da profundidade da perfuração, entre o fundo do poço e o reservatório. Além disso, ele produz detritos, o que dificulta o escoamento do fluido entre o reservatório e o fundo do poço.

Neste processo existem parâmetros estreitamente relacionados com a geometria do canhoneio que devem ser tomados em consideração para atingir um bom resultado, a saber:

- Propriedades da rocha do reservatório como: a compactação, porosidade, permeabilidade, características dos fluidos presentes que incidem na penetração e dano da formação canhoneada.
- Fatores geométricos como folga entre o canhão e o revestimento, diâmetro do orifício perfurado, e a centralização;
- A densidade do tiro, defasagem entre os jatos, padrão de disparo, e penetração das cargas explosivas.

Além dos parâmetros mencionados anteriormente, as perfurações produzidas no canhoneio devem ser limpas, de tamanho e propriedades uniformes, e não devem danificar o revestimento ou a adesão do cimento.

As técnicas de perfuração mecânicas atualmente utilizadas têm apresentado cada vez mais limitações, uma vez que as recentes descobertas de petróleo são caracterizadas por suas grandes profundidades. Estas técnicas apresentam taxas de penetração relativamente baixas porque as rochas encontradas nos reservatórios apresentam estruturas duras e heterogêneas.

Estes desafios incentivam a procura de técnicas mais eficientes para a perfuração de poços e canhoneio (completação). As técnicas pesquisadas devem ter maior taxa de penetração, pouca manutenção dos equipamentos, maior controle do diâmetro dos furos do canhoneio e apresentar menos vibração durante a perfuração, de forma que possam viabilizar a extração do petróleo a grandes profundidades (Freedonia Group Inc, 2008; Koppe, 2007; Kurcewicz, 2004). Várias alternativas têm sido investigadas, sendo uma delas a utilização do laser como ferramenta de perfuração.

Este trabalho visa o desenvolvimento de uma nova técnica que melhore o processo de canhoneio tradicional e que reduza os problemas relacionados com a precisão, a exatidão na geometria, e a profundidade do furo, além do dano na formação.

Usando o laser como a ferramenta de canhoneio espera-se manter uma geometria constante com uma taxa de penetração (ROP) alta, reduzir o tempo de canhoneio e a minimização do dano produzido no processo de canhoneio ou facilitar a retirada dos detritos. O detrito no caso do canhoneio a laser é o material derretido produzido pela operação.

2.4. Laser

LASER é o acrônimo da expressão em inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que em português significa amplificação da luz por emissão estimulada de radiação. O laser é um dispositivo que produz radiação eletromagnética com as seguintes características: monocromática (comprimento de

onda bem definido), alta intensidade, coerente (todos os fótons que compõe o feixe estão em fase) e colimada (propaga-se como um feixe de ondas praticamente paralelas).

O funcionamento do laser ocorre quando um número mínimo de átomos de determinado material é excitado para um nível de energia superior, de modo a se obter uma inversão de população (quando existem mais átomos excitados do que átomos no estado fundamental). Quando isso ocorre, a emissão espontânea de fótons, que acontece naturalmente a todo tempo, é amplificada pelos átomos vizinhos, que emitem fótons estimulados pelos primeiros. Estes fótons, por sua vez, estimulam a emissão de outros, num efeito cascata.

Para continuar o funcionamento é necessário manter sempre estimulados os fótons emitidos, interagindo com os átomos. Este fato é possível por meio de uma cavidade óptica que confina a luz por um determinado tempo e com ajuda de espelhos altamente refletivos e convenientemente alinhados (Xu, Jacksonville Florida 2001). A figura 11, mostra o diagrama básico do funcionamento do laser.

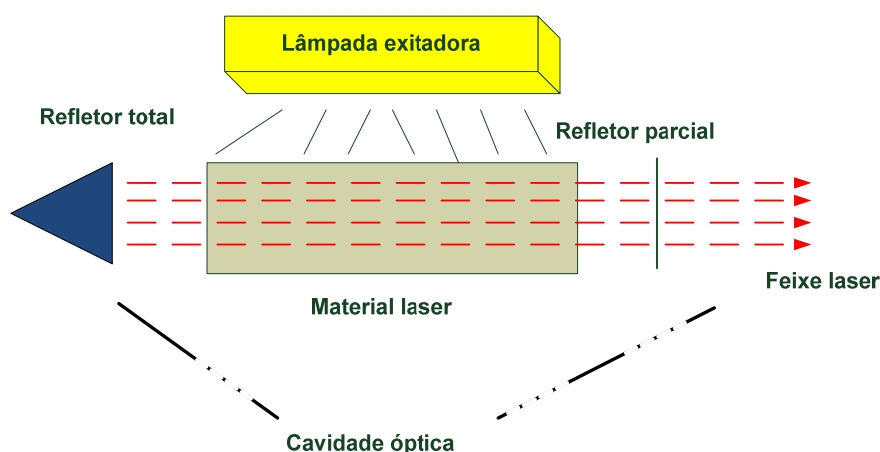


Figura 11 - Funcionamento básico de um laser de estado sólido.

2.4.1. Tipos de Laser

O laser pode ser classificado de acordo com o seu meio ativo ou pelo tipo de excitação utilizada para desencadear o processo. O meio ativo é composto por um grande número de átomos, moléculas ou íons. Podem ser sólidos, líquido, gasoso ou semiconductor. Vários tipos de materiais podem ser utilizados no interior de uma cavidade óptica pelo meio ativo, tais como: isolantes dopados (Cr^{3+} , cristais de

Nd:YAG, Er:YAG, Ho:YAG); corantes orgânicos diluídos em solventes líquidos (Rodamina 6G e Cumarina 2); semicondutores (diversos tipos de diodo); excímeros (moléculas diatômicas: KrF, XeCl); e químicos, produzidos por reações exotérmicas (HF, CO).

Na figura 12, o quadro em azul mostra o intervalo de comprimento de onda próprio da radiação laser, que vai de 180 nm a 1 mm (ultravioleta até infravermelho).

O laser também pode ser contínuo ou pulsado (Batarseh, Denver, Colorado 2003). A figura 13, mostra uma classificação simples do laser de acordo com a fonte, natureza de emissão e comprimento de onda.

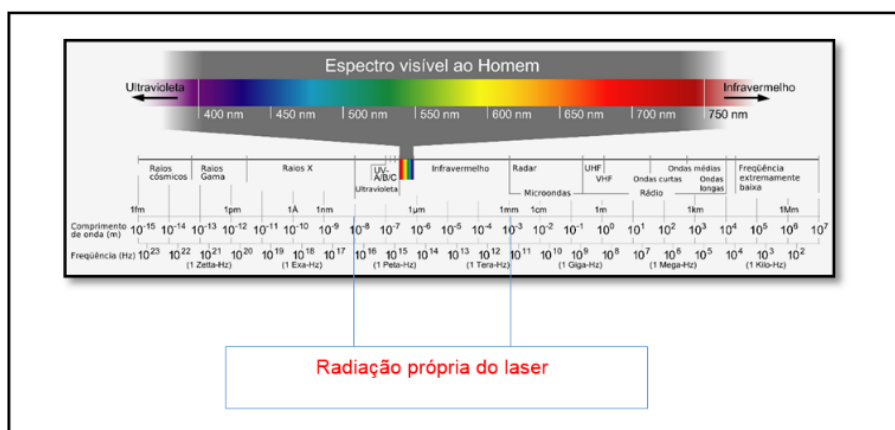


Figura 12 - Radiação do laser fonte adaptado.

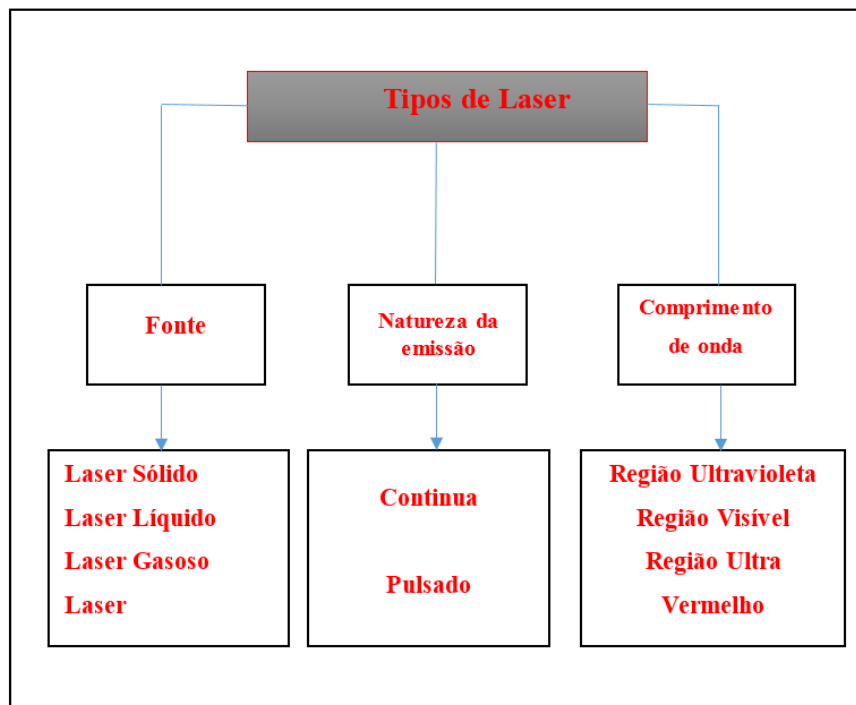


Figura 13 - Classificação do laser baseado na fonte, natureza de emissão e comprimento de onda.

2.4.2.

Parâmetros importantes na perfuração a laser

No processo de canhoneio é fundamental conhecer os parâmetros importantes envolvidos na perfuração a laser, com o objetivo de entender de forma clara e com precisão seu relacionamento com o processo. Dessa forma, pode-se encontrar a configuração mais otimizada, que permita perfurar de um modo mais eficiente. Os parâmetros mais importantes estão descritos a seguir.

- Densidade de potência: É a razão da potência irradiada e da área coberta pelo feixe emitido. As unidades de $I=P/A$ são W/m^2 (sendo usual W/cm^2). Também se designa por irradiância.
- Fenômenos básicos de radiação: Existem três fenômenos básicos de troca de energia na radiação em sólidos: absorção, reflexão e dispersão.

- A dispersão: fenômeno na qual a radiação incidente se espalha na superfície do material; este fenômeno é considerado como uma perda no processo de radiação.
- Reflexão: é um fenômeno que ocorre quando a radiação eletromagnética incide na superfície do material e retorna para o meio de origem. Este fenômeno é também considerado uma perda no processo de radiação.
- Absorção: Fenômeno pelo qual a radiação incidente não retorna à superfície incidente e nem se propaga no meio, mas propaga-se no material. É responsável pelo aquecimento e destruição no processo de perfuração a laser, podendo ser modelado pelo coeficiente de absorção (α) ou pelo seu recíproco $\frac{1}{\alpha}$.
- Foco: é o intervalo onde o feixe laser está enfocado de modo ótimo e concentrado com o mínimo diâmetro de feixe possível.
- Diâmetro do feixe (*spot size*): descreve o diâmetro do feixe, que aumenta quando se afasta do foco (figura 14). Quanto maior o diâmetro do feixe, menor será a intensidade da luz concentrada porque a energia é mais espalhada sobre o material a ser perfurado, ocorrendo assim, menos absorção, e maior espelhação do feixe incidente.
- Distância focal: distância entre a lente e o mínimo diâmetro do feixe (ponto foco). A figura 14 apresentam o ponto focal para três casos. No caso I o ponto focal é formado antes da superfície ou referência. No caso II o foco é formado na superfície referência. No caso III o ponto focal está abaixo da superfície de referência.

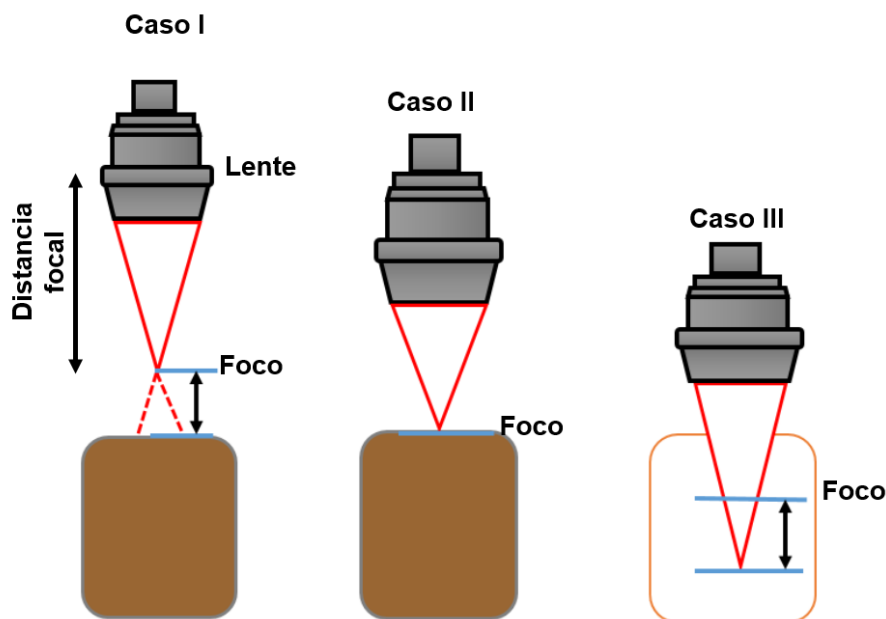


Figura 14 - Distância focal e diâmetro do feixe.

2.5. O laser na indústria do petróleo

As primeiras iniciativas na utilização do laser para a perfuração de rochas datam dos anos 70, porém, devido a guerra fria, não foi possível que a indústria militar disponibilizasse a tecnologia a laser de alta potência para esta aplicação (Kurcewicz, 2004; Freedonia group inc, 2008; Koppe, 2007). No entanto, no final da guerra fria nos anos 80, o governo do presidente Ronald Reagan (Graves & O'Brien, 1999) liberou o acesso às pesquisas feitas a laser por meio de acordos entre a indústria militar e as corporações.

O desenvolvimento do uso do laser em poços de petróleo teve início em 1997, pelo *Gas Technology Institute* (GTI) em conjunto com o *Colorado School of Mines*. Inicialmente a pesquisa visava a criação de poços utilizando lasers infravermelhos de alta potência. Em 1998 foi publicado o primeiro estudo a respeito do tema (Graves, 1998). Este estudo buscou a aplicação da tecnologia laser desenvolvida pelo departamento de defesa dos Estados Unidos na área do petróleo.

Em 2001, o estudo da energia específica de laser para a remoção de rochas ressaltou os benefícios do uso do laser no processo de perfuração de poços. Como exemplos dessas vantagens, foram citadas melhores taxas de penetração, melhores condições de controle de poço, e um menor número de intervenções (Z. XU, 2001).

Em 2002, foi realizada a Comparação entre lasers de alta potência e outros métodos, utilizando como base a energia específica (GRAVES, 2002)

Em 2003 o estudo de perfuração de poços usando lasers de alta potência colocou a necessidade da busca por novos métodos de canhoneio alternativos ao convencional em função dos danos à formação, a redução da permeabilidade e porosidade da rocha-reservatório. Este estudo fez referência aos resultados encontrados pelo GTI sobre as características dos canhoneados em rochas, e realizou experimentos com arenito, carbonato e xisto utilizando laser da alta potência.

No ano de 2004, foi publicado um trabalho com o objetivo de estudar um método adequado ao uso do laser nas profundidades necessárias a construção de poços de petróleo e gás natural. O estudo indicou o laser pulsado Nd:YAG como o adequado para o uso com fibra ótica (Batarseh & Gahan, 2004).

No mesmo ano, foi apresentado um estudo da análise da eficiência dos lasers a fibra de alta potência para a perfuração de poços (S. BATARSEH, 2003) que destacou o desenvolvimento do laser à fibra como alternativa aos outros modelos para a aplicação no processamento de materiais. Esse modelo permitia a transmissão da potência até a profundidade necessária da formação. O uso do laser com fibras apresenta outras vantagens quando comparado ao uso de lasers convencionais, como a eficiência energética, qualidade do feixe, e a menor manutenção durante seu tempo de vida.

No ano de 2005, foi feita a aplicação de um laser de fibra óptica de 5,34 kW em uma amostra de arenito. Este estudo alcançou um valor reduzido de energia específica e obteve o túnel mais longo observado até o momento, 70 cm (Gahan et al., 2005). Em seguida houve um aumento da potência possível de ser guiada nas fibras utilizadas, permitindo aumentar a eficiência disponível na zona alvo do poço.

No ano seguinte, através de um estudo realizado pela *Indian School of Mines*, se comparou a característica de diversos lasers com potencial para uso na indústria do petróleo e gás natural (Sinha & Gour, 2006). São eles:

- Fluoreto de Hidrogênio (DF) e Fluoreto de Deutério (HF): é um laser químico avançado (MIRACL) que foi testado no reservatório, e opera na região infravermelha com comprimento de onda entre 2,6 μm e 4,2 μm .

- Laser Químico de Oxigênio-Iodo (COIL): laser químico de alta precisão, que pode ser usado com sucesso na indústria do petróleo, e opera na região infravermelha com comprimento de onda de 1,315 μ m.
- Laser de Dióxido de Carbono (CO₂): é um laser com potência média de 1 MW que opera na região infravermelha com um comprimento de onda de 10,6 μ m. Sua natureza de emissão pode ser pulsada ou contínua.
- Laser de Monóxido de Carbono (CO): possui uma potência média de 200kW, opera na região infravermelha com comprimento de onda entre 5 μ m e 6 μ m, e a natureza de sua emissão pode ser pulsada ou contínua.
- Laser de Elétron Livre (FEL): é considerado o laser de alta potência do futuro. Sua natureza de emissão é contínua e tem a vantagem de ajustar o comprimento de onda na faixa de 0,1 μ m até 1000 μ m.
- Laser Neodímio (YAG): opera na região infravermelha com comprimento de onda de 1,06 μ m e potência 6 kW.
- Laser de fluoreto de Criptônio (KrF): opera na região ultravioleta com comprimento de onda de 0,248 μ m com potência de 10 kW. Os átomos de criptônio e fluoreto da molécula KrF são excitados.
- Laser Diodo (DDL): opera na região infravermelha com um comprimento de onda de 0,8 μ m e potência usada de 4 kW.

Em 2007, no artigo “*Laser Drilling – Drilling of the Power of Light*”, foram utilizadas amostras de rochas cimentadas em aço simulando as condições no fundo do poço. Além disso, foi avaliada a interação entre o laser e a rocha com uma pressão de confinamento, confirmando as vantagens nas características da perfuração.

Uma pesquisa realizada no ano de 2008 (Kobayashi et al., 2008) estudou o comportamento do laser em rocha submersa em meio líquido. Foi observado que a formação de bolhas auxiliou a remoção do material fundido, proporcionando uma cavidade mais homogênea do furo.

Em 2010 foi desenvolvida uma rede neural artificial com o objetivo de prever a profundidade de penetração do laser em rocha de calcário (Kerhavarzi, et al. 2010; 2010a, Kerhavarzi, Jahanbakhshi & Ghorbani, 2011). O estudo teve como

parâmetros de entrada a potência, o tempo de aplicação, a saturação e a pressão. Tais parâmetros foram variados, tendo como saída a profundidade de penetração, obtendo boa correlação com os ensaios experimentais.

No ano de 2011, foram conduzidos estudos experimentais com o objetivo de avaliar o uso de lasers em operações de canhoneio e fraturamento hidráulico. As fraturas observadas se mostraram dependentes de parâmetros das rochas como a mineralogia, propriedades térmicas, porosidade, e os níveis de tensão alcançados (Kerhavarzi, 2011).

Em um estudo usando laser de CO₂ pulsado de 700W foram perfurados túneis através de rochas do reservatório em amostras saturadas e não saturadas. Foram avaliadas as energias específicas em função do nível de saturação e tipos de rochas (Bakhtbidar et al., 2011).

Um estudo realizado em 2012 por Valente et al (Valente, 2012), realizou ensaios com laser de CO₂ perfurando granito e travertino. Os experimentos contaram com a aplicação do laser sendo controlada por computador. Nesse estudo foram usadas técnicas como difração de raios-X, fluorescência de raios-X e termogravimétrica para avaliar a concentração química, propriedades químicas e a perda de massa.

No ano de 2012, foram estudados parâmetros que causam a fratura em poços horizontais usando laser de alta potência. Para tal, os experimentos foram realizados inserindo-se um entalhe no corpo de prova para auxiliar no início da fratura (Batarseh et al., 2012). Como conclusão foram observadas as seguintes vantagens:

- Alteração das propriedades das rochas para aumentar a porosidade, a permeabilidade e a facilidade de se iniciar fraturas.
- Maior controle da geometria do túnel em qualquer orientação.
- Redução da resistência da formação, permitindo o início e a propagação das fraturas.
- Maior controle de remoção da rocha através do ajuste da potência do laser.

Em 2013, a (Bazargan, March 2013) abordou o fator econômico envolvendo a construção de um poço com menor diâmetro a partir do uso de lasers, que além de menos material para revestimento também representa menor peso na coluna e ainda maior estabilidade desta.

2.6.

Energia específica (caso estático)

Com o objetivo de viabilizar a tecnologia a laser no processo de canhoneio, será necessário superar vários desafios, além de pesquisar e garantir os conhecimentos envolvidos na interação rocha-laser tais como: energia específica; taxa de penetração; tempo de exposição e diâmetro do feixe ou *spot size*.

A energia específica (EE) é o principal parâmetro envolvido nesse estudo porque mede a eficiência dos mecanismos básicos para remover e desintegrar a rocha nos processos de perfuração de poços e escavação de túneis. Além disso, se relaciona com outros parâmetros como: taxa de penetração (ROP), profundidade atingida, tempo de exposição e diâmetro do feixe.

A configuração ótima destes parâmetros nos permitirá perfurar de um modo mais eficiente, usando menor quantidade de energia e, ao mesmo tempo, removendo o maior volume de rocha (Maurer, 1980).

A energia específica é definida como a energia requerida para remover um determinado volume de rocha, e é apresentada na equação 2.

$$EE = \frac{\text{Energia Fornecida}}{\text{Volume Removido}} = \frac{P}{\frac{dV}{dt}} = \frac{W}{\frac{cm^3}{s}} = \frac{J}{cm^3} \quad (2)$$

Este termo se relaciona com a energia fornecida e o volume retirado da perfuração, evidenciando o fato que a energia específica é inversamente proporcional ao volume removido, e que para obter o maior volume removido é necessário aumentar a elevada energia fornecida.

Salehi *et al* (2007) avaliou a relação entre a energia específica e a potência fornecida pelo laser, mostrada na figura 15. Pode-se observar que, com 70% da potência fornecida pelo laser, atinge-se quase a menor energia específica e, conseqüentemente, o maior volume removido. Além disso, observa-se que na variação da potência do laser de 70% para 100% há relativamente pouca variação na energia específica.

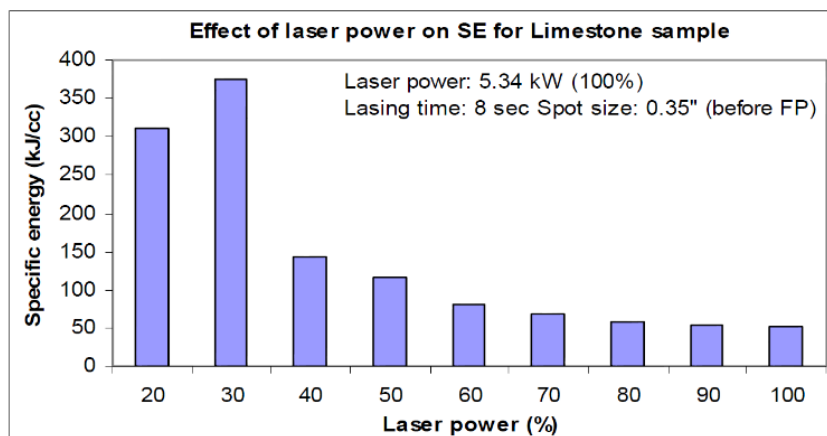


Figura 15 - Energia específica vs percentagem da potência Fonte: Salehi et al (2007).

Em um estudo anterior a esta tese, também realizado no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica (LSFO) do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-RIO, foram realizados testes com o Bege Bahia (tipo de rocha semelhante as rochas encontradas no Pré-sal), com o objetivo de medir a energia específica da rocha numa determinada faixa de potência (600W a 1400W), como mostrado na tabela 1 (Orlando, 2014). Comparando os resultados obtidos com os resultados conseguidos por Salehi, Gahan & Batarseh (2007), também foi demonstrado por (Orlando, 2014) que a maior potência e menor energia específica removeu o maior volume. Além disso, para as potências de 600W e 1400W, a mudança da energia específica não foi significativa.

Tabela 1 - Relação entre potência e energia específica.

Bege Bahia			
Potência (W)	Tempo (s)	Volume removido (mm ³)	Energia Específica (kJ/cm ³)
600	10	140	42,9
800	10	222	36,0
1000	10	280	35,7
1200	10	338	35,5
1400	10	428	32,7

Fonte: (Orlando, 2014)

Baseando-se no princípio da energia específica, é possível calcular a taxa de penetração (ROP), que também pode ser conhecida como velocidade de perfuração. Para explicar esse parâmetro, se modela a perfuração a laser como um cilindro, onde a área está formada pelo diâmetro do feixe e a altura pela profundidade, conforme apresentado na figura 16. A equação 3 modela matematicamente o parâmetro ROP em função da energia específica, a potência fornecida e a área atingida pelo feixe (Maurer, 1980).

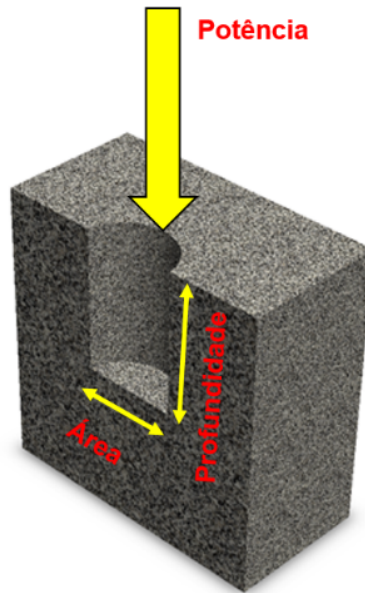


Figura 16 - Parâmetros de perfuração.

$$EE = \frac{\text{Energia fornecida}}{\text{Volume Removido}} = \frac{\text{Potencia} \cdot \text{tempo}}{\text{Volume do cilindro removido}} = \frac{P \cdot t}{A \cdot h} \quad (3)$$

Onde,

P = potência entregue pelo laser

t = tempo de radiação

A = área atingida pelo laser

h = profundidade atingida

Relacionando a profundidade atingida com tempo de radiação, para obter a taxa de penetração ou velocidade de penetração no lado esquerdo e o lado direito,

relaciona-se a potência fornecida pelo laser com a energia específica e a área atingida, obtendo-se a velocidade de penetração ou taxa de penetração (equação 4).

$$\frac{h}{t} = \frac{P}{EE * A} = \text{Velocidade de penetração} \quad (4)$$

$$ROP = \frac{P}{EE * A} = \frac{cm}{s} \quad (5)$$

Da equação 5 concluímos que a relação entre a taxa de penetração e energia específica é inversamente proporcional a esta, indicando que a maior taxa de penetração está relacionada com a menor energia específica e, conseqüentemente, maior volume removido. A figura 17 apresenta dois casos com a mesma energia de corte $EE = \frac{P}{A * L * v_t}$ e duas áreas de corte diferentes. O caso I indica um corte largo e raso, e o caso II exibe um corte profundo e estreito, mostrando que a energia específica não é uma medida verdadeira para avaliar um corte dinâmico, (quando a ferramenta de corte se movimenta com uma velocidade constante v_t).

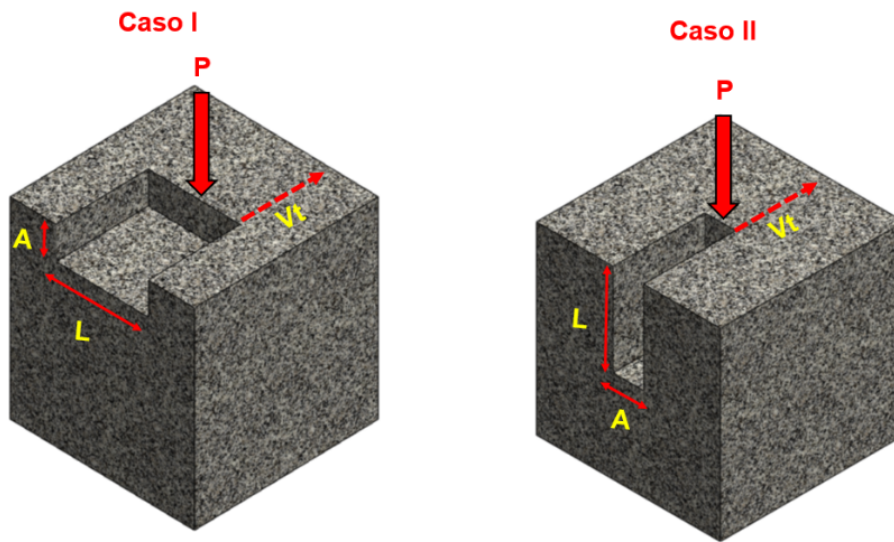


Figura 17 - Áreas de corte diferentes.

2.7. Energia específica de corte (caso dinâmico)

O parâmetro de energia específica de corte é um parâmetro proposto por William C. Maurrer (1980) para o caso dinâmico. Este termo foi aplicado principalmente na indústria metalmeccânica no processo de corte de chapas metálicas a laser. Além disso, também é usada na mineração para a extração de rochas e nos abalos sísmico.

Já na indústria do petróleo, existem poucas pesquisas relacionando este termo com a perfuração a laser. Os únicos trabalhos encontrados que citam este parâmetro são os trabalhos dos autores Maurrer e Gama.

Este parâmetro é importante, pois mede diretamente a capacidade de corte. Ele pode ser usado para prever o desenvolvimento e a potência requerida dos dispositivos de corte (Maurer, 1980).

A equação 6 descreve a energia específica de corte como a relação entre a energia fornecida e a área de corte, e é expressa em $\frac{J}{cm^2}$. A figura 18 apresenta os parâmetros da energia específica de corte (EEC).

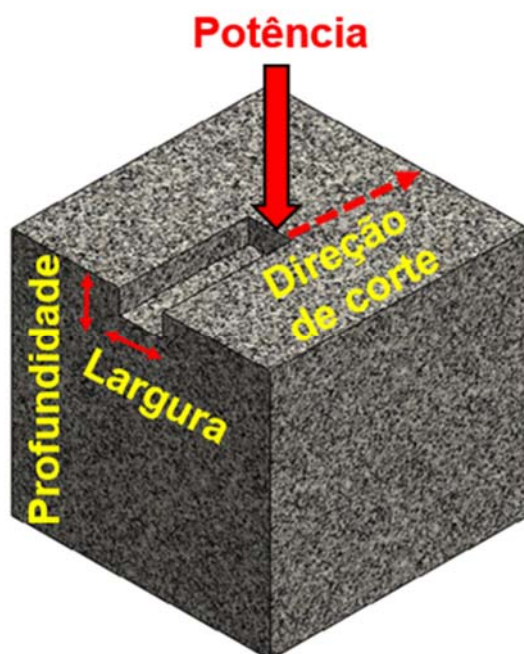


Figura 18 - Parâmetros da energia específica de corte.

A energia específica de corte (EEC) é definida como:

$$EEC = \frac{\text{Energia}}{\text{Área de corte}} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Profundidade de corte} * \text{Velocidade de corte}} \quad (6)$$

$$EEC = \frac{P}{d * w} = \frac{J}{cm^2} \quad (7)$$

$d = \text{Profundidade de corte (cm)}$

$w = \text{Velocidade de deslocamento do laser (cm/s)}$

Também pode-se expressar a energia específica de corte em função do comprimento de corte, como se apresenta na equação 9.

$$\text{Onde } w = \frac{L}{t} \quad (8)$$

Onde

$t = \text{tempo de exposição do laser}$

$L = \text{Comprimento de corte}$

$$EEC = \frac{\text{Potencia}}{\text{Profundidade} * \frac{\text{Comprimento de corte}}{\text{Tempo de exposição}}} = \frac{P * t}{d * L} \quad (9),$$

Onde a velocidade de corte (w) é definida como a velocidade de deslocamento do laser, d é a profundidade do corte, e P é a potência do laser.

Nesta relação pode-se também observar que este parâmetro é inversamente proporcional à área de corte. Esta área pode ser expressa como a profundidade de corte multiplicada pela a velocidade de avanço da ferramenta de corte multiplicado pelo tempo.

No caso da perfuração a laser, a profundidade de corte é diretamente proporcional à densidade de potência do laser; quanto maior a densidade de potência, maior será a profundidade da perfuração. Além disso, quanto maior o tempo de radiação, maior será sua profundidade. A velocidade de corte está inversamente relacionada com o tempo de radiação, porque quanto maior a velocidade de deslocamento do laser, menor será o tempo de exposição e, conseqüentemente, menores profundidades serão atingidas.

A energia específica de corte a laser pode ser calculada por meio de testes de laboratório, fazendo movimentar o laser através de uma trajetória desejada (linear, circular ou espiral) que será escrita sobre a superfície incidente do material. Este tipo de teste é conhecido como corte dinâmico.

Para obter uma menor energia específica de corte será necessário arranjar a melhor configuração dos parâmetros de densidade de potência, velocidade e tempo de exposição, para assim alcançar cortes mais profundos e com diâmetros maiores.

Existem várias pesquisas relacionadas ao estudo da energia específica, usando o laser numa posição estática e incidindo na superfície do material a ser perfurado. Este tipo de teste é conhecido como corte estático.

Esta configuração restringe a perfuração de grandes furos, devido à limitação do feixe e sua densidade de potência. A utilização da posição estática permite apenas a perfuração de orifícios bem pequenos e impede a realização de grandes furos que permitem, no caso do canhoneio, o escoamento do óleo do reservatório para o fundo do poço.

Baseados nestes fundamentos foi escolhido o parâmetro de energia específica de corte para ser aplicado à técnica de corte dinâmico com o objetivo de permitir a realização de grandes furos e viabilizar a técnica do canhoneio a laser como uma alternativa ótima ao processo de completação de poços.

Maurrer aplicou a energia específica de corte na superfície do túnel usando trajetórias circulares para realizar cortes anulares, utilizando passos (s) entre cada corte, com o objetivo de perfurar e atingir diâmetros desejados. A figura 19 apresenta este tipo de corte, onde o corte externo corresponde à periferia do túnel ou fundo do poço.

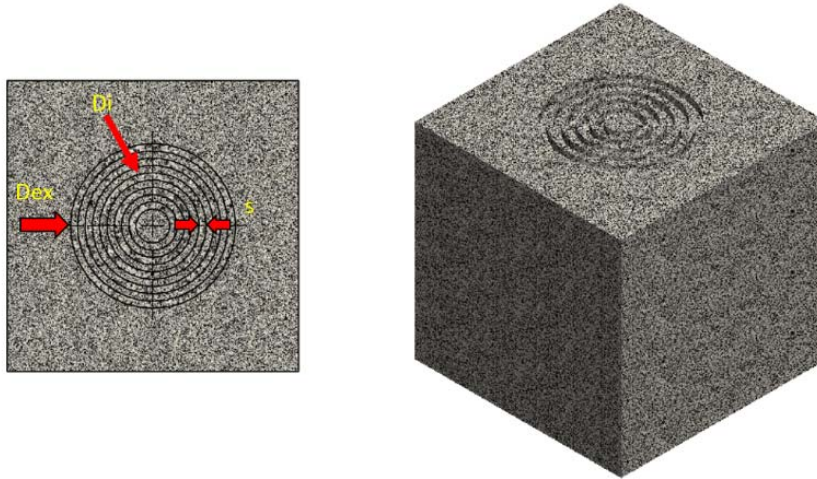


Figura 19 - Sistema de corte em túnel.

Para obter a relação da energia específica de corte com o corte em túnel usando trajetórias circulares e a profundidade, Maurrer propôs a substituição do comprimento linear (l), pelo perímetro da circunferência, considero na equação 10.

$$d = \frac{P*t}{\pi*D*EEC} \quad (10)$$

Onde

D = *diametro da circunferencia*

A equação 10 só representa um corte. Para representar todos os cortes é necessário realizar um somatório de todos os perímetros.

$$EEC = \frac{P*t}{\pi*d*\sum_{i=1}^n D_i} \quad (11)$$

Supondo que todos os cortes têm o mesmo espaçamento (S)

$$n = \frac{D_{ex}}{2S} \quad (12)$$

$$EEC = \frac{P*t}{\pi*d*D_{ex}*\left(\frac{D_{ex}}{4H} + \frac{1}{2}\right)} = \frac{4*S*P*t}{\pi*d*(D_{ex}+2S)} \quad (13)$$

3

Procedimento Experimental e Modelagem

O objetivo deste trabalho é contribuir para a tecnologia de canhoneio a laser em rochas carbonáticas, por meio do estudo do comportamento termomecânico das rochas carbonáticas. Este estudo será baseado em simulações e experimentos que irão fornecer resultados concretos para contribuir ao aumento do volume removido, por unidade de tempo, na perfuração a laser em poços de petróleo.

Foi necessário a caracterização petrofísica do Bege Bahia como um afloramento e poder simular com os reservatórios do Pré-sal. Em seguida, foi realizada a preparação do laboratório para a realização de testes de pressão, na faixa de 7 MPa até 14MPa. Além disso, a modelagem numérica na plataforma ABAQUS 6.11 do acoplamento termomecânico da rocha foi feito (Abaqus, 2010).

3.1.

Caraterização Petrofísica

Devido à inviabilidade de obtenção de testemunhos das rochas do Pré-sal, compostas principalmente por carbonato de cálcio e magnésio, opta-se por procurar rochas com composição química parecida (Dolomita, calcita e aragonita), e de fácil aquisição e manipulação em testes experimentais.

Neste trabalho foi utilizado o Bege Bahia, natural do estado brasileiro da Bahia, como um afloramento e simular os reservatórios carbonáticos do Pré-sal. O Bege Bahia é um mármore classificado como rocha metamórfica (rocha que sofreu modificação química do calcário, devido às altas temperaturas e pressões).

Para fundamentar esta escolha foi realizada uma série de análises: semi quantitativa (Fluorescência de raio X); qualitativa (difração de raios X pelo método Rietveld); termogravimétrica; porosidade; permeabilidade; e resistência.

3.1.1. Porosidade e Permeabilidade

Após as análises qualitativa e quantitativa das composições químicas das amostras de Bege Bahia, discutidas acima, continuou-se com a caracterização da porosidade e da permeabilidade do Bege Bahia. As análises de porosidade e permeabilidade foram realizadas no Laboratório Wetherford no CENPES/PETROBRAS, sendo aplicada a corpos de prova cilíndricos de Bege Bahia.

A porosidade é uma das mais importantes propriedades petrofísicas da rocha, e é usada na engenharia de reservatórios. A porosidade é definida como a relação entre o volume de vazios de uma rocha e o volume total da mesma, apresentada na equação 14. Ela está relacionada com a quantidade de fluido que a rocha pode armazenar em seus espaços vazios.

$$\phi = \frac{\text{Volume de vazios}}{\text{Volume total}} * 100 \quad (14)$$

A porosidade da rocha pode ser classificada como primária ou secundária. Primária quando o poro é gerado durante a deposição do sedimento podendo ser inter- ou intragranular. Secundária quando o poro é originado pelos processos diagenéticos após a deposição dos sedimentos(Thomas, 2001).

Na maioria dos reservatórios a porosidade varia entre 10% e 20% sendo esta influenciada pela geometria e grau de conectividade da rede de poros. Ela pode ser medida diretamente no laboratório em amostras de testemunho ou, em caso indireto, através de perfis elétricos. A porosidade pode ser classificada dependendo da sua percentagem (%) como: Excelente (>20%), Boa (15% até 20%), Regular (10% até 15%), pobre (5%-10%) e insignificante (0%-5%).

A permeabilidade é também uma propriedade petrofísica importante usada na caracterização das rochas porque está relacionada com a conexão ou interligação dos poros que formam a rocha. A permeabilidade é medida em Darcy.

Todas as amostras analisadas para este trabalho apresentaram porosidade menor que 2% e permeabilidade menor que 1 micro Darcy (μ D). As rochas encontradas nos reservatórios do Pré-sal têm porosidade entre 7% e 12%.

3.1.2. Ensaio de Resistência

Para o presente trabalho, foi realizado o teste de compressão simples, por ser um dos ensaios mais usados na mecânica de rochas, devido a sua simplicidade de execução (Azevedo & Marques, 2002). Este teste é usado para determinar as características de deformabilidade de ruptura em compressão uniaxial, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. A amostra utilizada tem forma cilíndrica de diâmetro D e comprimento h , com uma relação entre o comprimento e altura de 2:1.

Para este teste, as superfícies superior e inferior do cilindro de prova devem ser paralelas e cuidadosamente retificadas para impedir flexões parasitas durante o carregamento. A figura 20 apresenta a representação esquemática do ensaio de compressão simples.

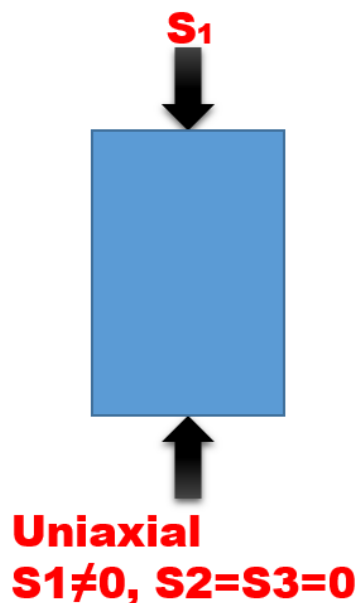


Figura 20 - Representação esquemática do ensaio.

As deformações da rocha são medidas por extensômetros resistivo do tipo pórtico (*clip gages*), segundo o princípio da ponte Wheatstone completa. Os extensômetros haviam sido calibrados no Laboratório de Estruturas do departamento de Engenharia civil da PUC-Rio. A equação 15 apresenta a relação entre a carga aplicada e a área da amostra.

$$\sigma_c = \frac{P_a}{A} \quad (15)$$

P_a = Carga Aplicada

A = Área da amostra

No presente trabalho os ensaios de compressão simples foram realizados na empresa Martins Campelo Belo Horizonte. Os ensaios foram realizados em dois corpos de prova de diâmetro 54 mm e 133 mm de comprimento.

3.2. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova (CP) foram elaborados no laboratório de amostra do GTP do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio a partir de um bloco cúbico de Bege Bahia comprado numa marmoraria no estado de Bahia. Foram confeccionados 9 corpos de prova cilíndricos (figura 21). O eixo vertical de cada CP é perpendicular ao plano de deposição, o qual foi depositado a olho nu.



Figura 21 - Corpos de prova Bege Bahia.

3.3. Microtomografia (MRX)

A microtomografia de raios X (MRX) é uma técnica não-destrutiva de custo ainda elevado, e atualmente tem grande destaque na análise de rochas de reservatório, pois permite a caracterização de parâmetros microestruturais da rocha, tais como: distribuição de tamanho do poro, porosidade e permeabilidade. O termo vem das palavras gregas *tomos* que significa secção e *grafia* que significa representação, baseando-se na medição das variações da densidade do material, e oferece um conjunto de projeções em 2D do material.

Para a aquisição das imagens pelo microtomógrafo, a amostra a ser analisada é colocada entre uma fonte emissora de raios X e um detector. O feixe muito fino de raio X atravessa o objeto, e o espectro da radiação que não é absorvido pela amostra é medida pelo detector e salva digitalmente como uma projeção 2D. Seguidamente, o emissor de luz muda de posição e continua executando o processo anterior até abranger todo o objeto.

Para a reconstrução e representação da imagem em 3D é necessário a compilação do conjunto de imagens em 2D obtido do microtomógrafo, para que posteriormente se possa aplicar um algoritmo matemático, que pode ser: algoritmo de reconstrução analítico, algoritmo de reconstrução estadístico e métodos de expansão por series. Os princípios de funcionamento destes algoritmos são baseados no teorema das fatias que assegura que a transformada de Fourier das projeções com relação ao raio seja equivalente à transformada de Fourier bidimensional do objeto representado pelas coordenadas radiais.

Ultimamente, para se caracterizar rochas dos reservatórios, utiliza-se diversas análises de microscopia para a medição de porosidade e permeabilidade. Estas análises consomem muito tempo, principalmente, para a preparação das amostras. Neste cenário, a utilização da microtomografia de raios-X (MRX), mostra-se ser uma alternativa vantajosa por ser uma técnica não destrutiva ágil e fácil de ser usada no laboratório, e por não demandar preparação.

A MRX permite o processamento digital em 3D da amostra na escala poro (poros acima de 6 μ m). Além disso, permite a criação de um modelo digital tridimensional da rede de poros, o que permite o estudo e caracterização da microestrutura e uma análise qualitativa e quantitativa detalhada do volume, forma,

e conectividade dos poros. A caracterização dos parâmetros microestruturais mencionados anteriormente contribuem significativamente para análise de reservatório. A figura 22 ilustra o processo de microtomografia e a digitalização da imagem e o modelo em 3D.

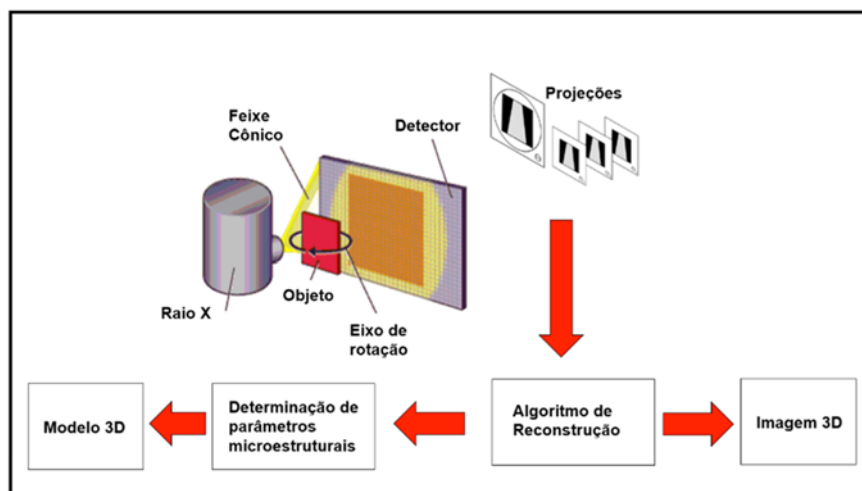


Figura 22 - Digitalização da imagem e o modelo 3D(Gomes, 2001).

Os ensaios de microtomografia foram realizados nas dependências do Laboratório de Processamento Digital de Imagens (LPDI) do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio. Para a aquisição das imagens tomográficas das amostras foi utilizado o microtomógrafo Zeiss Xradia 510 Versa do fabricante ZEISS, visto na figura 23.



Figura 23 - Microtomógrafo Zeiss Xradia 510 (Zeiss., 2015).

O equipamento possui uma fonte de raios X com uma potência máxima de 10W, um porta-amstras, um detector, câmara CCD (figura 24). Possui também um conjunto de lentes ópticas de 0,4X, 4X, 20X e 40X. O microtomógrafo atinge uma resolução espacial de 0,6 μm e com voltagem variável entre 30kV até 60kV.



Figura 24 - Interior do microtomógrafo Zeis Xradia 510 Versa.

O ensaio foi realizado em três amostras (figura 25), antes e depois da perfuração a laser, com o objetivo de avaliar o volume removido e a área termicamente afetada.



Figura 25 - Amostras microfotografadas.

3.3.1. Processamento e análise digital de imagens

O processo e análise digital de imagens (PADI) é uma técnica usada para adequar imagens, e é baseada em operações matemáticas que têm como objetivo alterar os valores dos pixels das imagens digitalizadas, para então analisá-las computacionalmente pelo método da Análise Digital de imagens (ADI) (Gomes 2001). A ADI tem como finalidade realizar a extração e tratamento dos dados quantitativos da imagem para facilitar medições que são difíceis de realizar manualmente.

Nesta tese foi necessário o desenvolvimento de um programa computacional com o objetivo de executar as rotinas que manuseiam e processam as imagens de modo automático. Após estas etapas de manuseio e processamento, as imagens são digitalmente analisadas. Finalmente, os dados numéricos requeridos são fornecidos, que para este caso são o volume removido e o volume da zona termicamente (ZTA) afetada.

O programa está baseado em três blocos básicos conectados por uma sequência lógica que, segundo (Gomes, 2001), não é alterável, como mostra a figura 26.

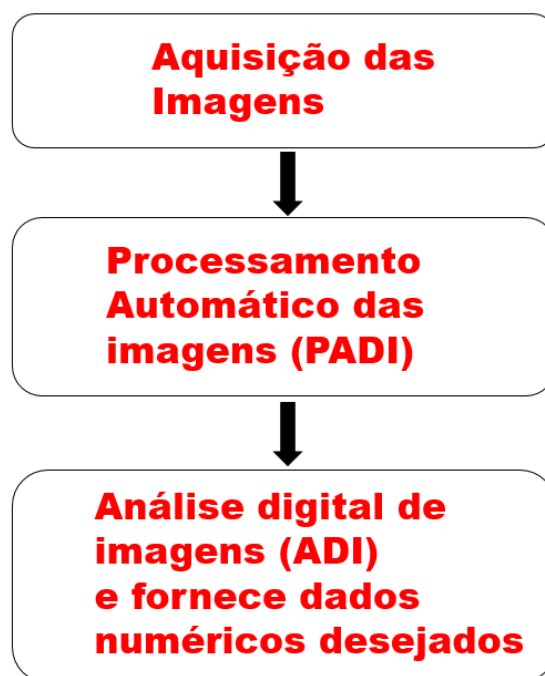


Figura 26 - Rotina de blocos para processamento digital de imagens.

O bloco de aquisição de imagens (figura 26) adquire e lê as imagens obtidas no microtomógrafo, e as transforma do formato Tiff para JPG. Esta etapa é fundamental para o bom desenvolvimento dos processos posteriores (PADI e ADI) porque uma boa aquisição das imagens facilita o processo e seus resultados.

O bloco de processamento digital das imagens (figura 26) está baseado em três fases: Pré-processamento, Segmentação e Pós-processamento.

O Pré-processamento envolve uma série de operações de transformações da imagem que têm como objetivo ressaltar ou apagar padrões característicos ou formas anômalas da imagem, além corrigir e melhorar os defeitos que possam aparecer no processo de obtenção das imagens. Para atingir esse objetivo é necessário a conversão da imagem a tons de cinza. Em seguida, foi necessário a utilização de filtros passa-baixa, com a finalidade de ajustar o brilho e eliminar a iluminação irregular.

A segmentação é uma fase importantíssima porque é onde se identificam e separam as regiões de interesse da imagem como objetos independentes do fundo. Nosso caso, os objetos de interesse foram a área furada e a área termicamente afetada. Como saída deste procedimento é gerada uma imagem binária (preto e branco), onde o objeto em preto é a matriz rochosa, e os objetos em branco são os poros e a área furada.

Pós-processamento é a fase final do bloco de processamento digital de imagens. Esta fase é realizada caso os resultados da fase de segmentação não sejam de boa qualidade. O pós-processamento pode ser realizado por meio de operações morfológicas ou lógicas (Gomes 2010). Nesta tese esta fase foi realizada visando a eliminação de objetos menores que 40 pixels.

O bloco de análise digital de imagens (figura 26) é caracterizado pela extração de atributos de interesse que provêm do bloco anterior (processamento), e tem como objetivos a quantificação e a medição dos atributos de interesse selecionados na imagem (Martin 2001). Nesta tese foram calculadas a área removida e a área fundida em cada imagem, para posteriormente multiplicá-las pela espessura do frame (56micras), e desta forma poder obter o volume removido e o volume da zona termicamente afetada de cada imagem. Em seguida, se calcula o volume removido e o volume da zona termicamente afetada somando os volumes de cada imagem.

3.4. Montagem experimental

O objetivo desta tese é contribuir para a tecnologia de canhoneio a laser em rochas carbonáticas através do desenvolvimento de técnicas que contribuam para aumentar o volume de rocha removida por unidade de tempo. Para isto, foi necessário realizar diversos experimentos a fim de obter resultados concretos para validar os dados teóricos simulados do comportamento termomecânico das rochas carbonáticas quando um laser é utilizado como ferramenta de perfuração no processo de canhoneio. Para isso, foi necessário a adequação do laboratório para realização dos ensaios.

Os testes de laboratório foram divididos em dois grupos, como mostra a figura 27. Nos testes estáticos, a cabeça do laser não se movimenta ao longo do tempo de perfuração. Nos testes dinâmicos, a cabeça do laser foi movimentada com uma velocidade constante, percorrendo uma trajetória específica (espiral). Tanto os testes estáticos quanto os dinâmicos foram realizados com e sem pressão.

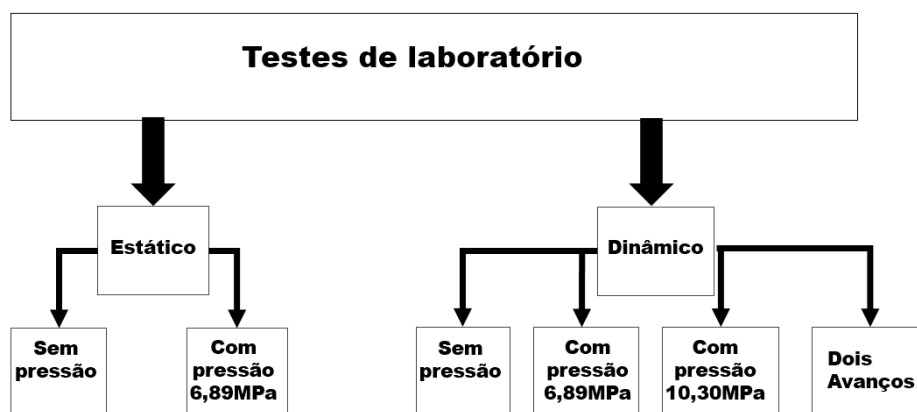


Figura 27 - Fluxograma dos testes de laboratório.

3.4.1. Bancada experimental

A base da bancada experimental usada para realizar os testes experimentais está localizada no laboratório de sensores à fibra óptica (LSFO), do departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Esta bancada foi desenvolvida e usada em trabalhos de mestrado e doutorado anteriores. Ela é composta principalmente por um laser a fibra óptica do modelo YLS 1500-TR da IPG Photonics (ver na tabela 2

as especificações técnicas do laser). A luz é guiada do laser até o ponto de aplicação por uma fibra óptica(Gomes, 2014).

Tabela 2 - Dados técnicos do Laser.

Característica	Valor	Unidade
Modo de operação	Onda Contínua	-----
Potência Máxima	1500	Watts
Comprimento de onda da emissão	1065	nm
Largura da banda	4,8	nm
Instabilidade de potência de saída	0,2	%
Potência de saída feixe guia	937	μ W

Para o bom funcionamento do laser, faz-se necessário usar uma unidade externa de resfriamento, também chamado de *chiller*, devido às altas temperaturas atingidas pelo laser. Esta unidade foi projetada para manter a temperatura do equipamento em 21°C.

A configuração da potência e o monitoramento da temperatura do laser é feito por meio um software de controle fornecido pela IPG Photonics. Além disso, o software também permite realizar o controle da operação de forma manual. A figura 28 apresenta a tela do software.



Figura 28 - Software de controle do laser.

A cabeça da fibra óptica por onde sai a luz do laser é sustentada por uma estrutura tri-axial (X,Y,Z), leve e resistente, feita de alumínio estrutural. A cabeça da fibra óptica e, conseqüentemente, o feixe de radiação, pode ser movimentada por

três servo-motores, um em cada eixo, e uma placa eletrônica. A placa também controla um sistema de remoção de detritos, o que permite a limpeza da zona furada e evita que a lente se danifique, e também torna possível o controle do tempo de radiação do laser.

O objetivo principal da bancada ter sido projetada desta forma foi facilitar a manobra e o deslocamento do laser à posição desejada pelo usuário, além de controlar a saída do nitrogênio que é usado como gás auxiliar no sistema de limpeza. A figura 29 apresenta a montagem descrita (Gomes, 2014).

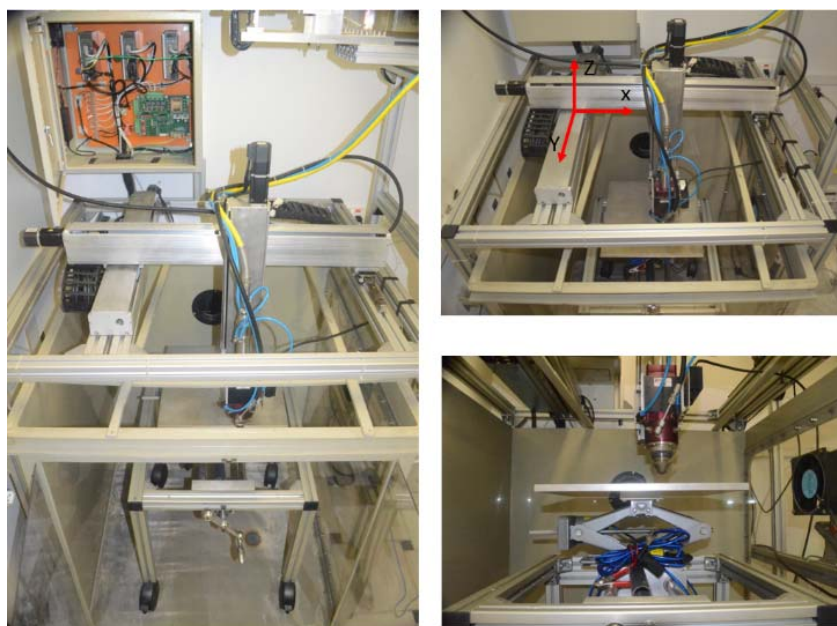


Figura 29 - Montagem experimental do laser.

3.4.2. Câmara de pressão

Como a presente tese foi o primeiro trabalho a envolver perfuração sob pressão, foi necessário adaptar a bancada experimental para simular diferentes tensões de confinamento da rocha, permitindo observar o comportamento da rocha quando ela interage com o laser sob condições parecidas com as do reservatório.

A bancada experimental com pressão é composta de um vaso de pressão feito de aço 4340 (diâmetro externo de 100 mm e altura 135mm) com o objetivo de confinar o corpo de prova e subministrar pressão radial ao corpo de prova, simulando condições de reservatório (figura 30). O vaso de pressão foi projetado

com um nível de segurança alto, com o objetivo de evitar acidentes quando forem realizados testes a pressões altas.

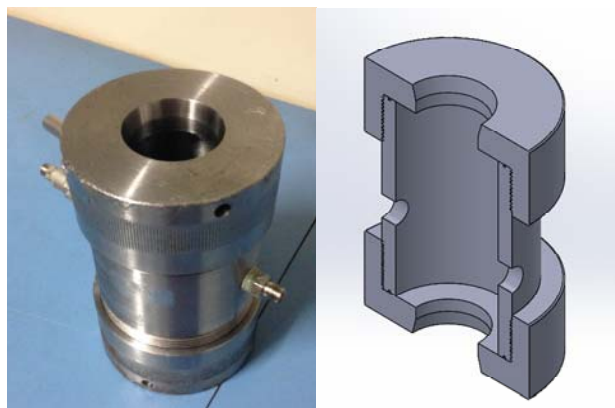


Figura 30 - Vaso de pressão.

O vaso também foi desenhado visando um acoplamento rápido com a bomba hidráulica que subministra a pressão. Para a mudança de pressão foi necessário a instalação de um transdutor de pressão digital da marca Veeder-Rout. A figura 31 apresenta a bancada experimental usada nos testes com pressão.



Figura 31 - Bancada experimental para teste com pressão.

3.5. Simulação

3.5.1. Modelagem por elementos finitos

Esta secção aborda aspectos relevantes para a modelagem do acoplamento termomecânico: o método de integração, a formulação da malha e o tipo de interação entre a rocha e o laser.

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma importante ferramenta numérica que vem se destacando nas últimas décadas como a melhor opção em muitas das aplicações práticas, devido às dificuldades impostas à realização de ensaios experimentais em diversas áreas da engenharia.

O MEF é uma análise numérica baseada na discretização de um domínio ou sistema em pequenos elementos (subdomínios) chamados de elementos finitos, que conservam as mesmas propriedades do sistema original.

Possuem geometria simples e são conectados entre si por pontos denominados de nós. Os elementos finitos são descritos por equações diferenciais e solucionados por métodos matemáticos. O MEF está consolidado principalmente para a análise estrutural. Além disso, pode ser utilizado em diversas áreas: como mecânica da fratura; transferência de calor; mecânica dos fluidos; e interação fluido estrutura, etc.

Na atualidade, existem inúmeros programas comerciais de elementos finitos, por exemplo: ABAQUS, NASTRAN e ANSYS, etc.

O ABAQUS 6.11 foi o programa de elementos finitos escolhido para desenvolver as simulações deste trabalho, devido as suas diversas potencialidades na modelagem numérica que envolvem carregamentos térmicos e fenômenos térmicos de transferência de calor, assim como relações constitutivas não lineares, geometrias complexas e ocorrência de grandes deformações.

O ABAQUS 6.11 apresenta a vantagem de usar dois métodos de integração no tempo: Implícito (ABAQUS/*Standard*) e o explícito (ABAQUS /*Explicit*) para ser empregado de acordo as necessidades do planeamento.

O módulo Implícito: é o método mais geral do ABAQUS, capaz de resolver problemas lineares e não lineares como: análises estáticas, análise térmicas, e análises dinâmicas a baixa velocidade (no domínio frequência, no domínio tempo),

etc. A técnica de solução é baseada na matriz de rigidez do modelo e é incondicionalmente estável.

O módulo explícito é caracterizado por requer um menor esforço computacional, sem iterações, condicionalmente estável, e apresenta maiores dificuldades de convergência em Comparação com o módulo de solução implícito. Sua solução é determinada por meio da previsão com um método de integração de solução explícita (ABAQUS, 2010).

Os modelos deste trabalho foram analisados usando o *software* ABAQUS/Standard, com base no modelo axissimétrico, acoplado termomecanicamente, discutidos a seguir.

3.5.2. Modelo Numérico

O modelo axissimétrico com elemento de acoplamento termomecânico foi desenvolvido para esta tese com o pacote computacional Abaqus 6.11 para simular o fenômeno de perfuração a laser.

O modelo reproduz as dimensões dos corpos de provas usados nos experimentos. O modelo tem formato cilíndrico com diâmetro de 54 mm e altura de 70 mm. O problema físico foi modelado para a solução axissimétrica, ou seja, uma seção com metade do diâmetro e a altura do modelo foi desenvolvida. A representação do modelo é apresentada na figura 32.

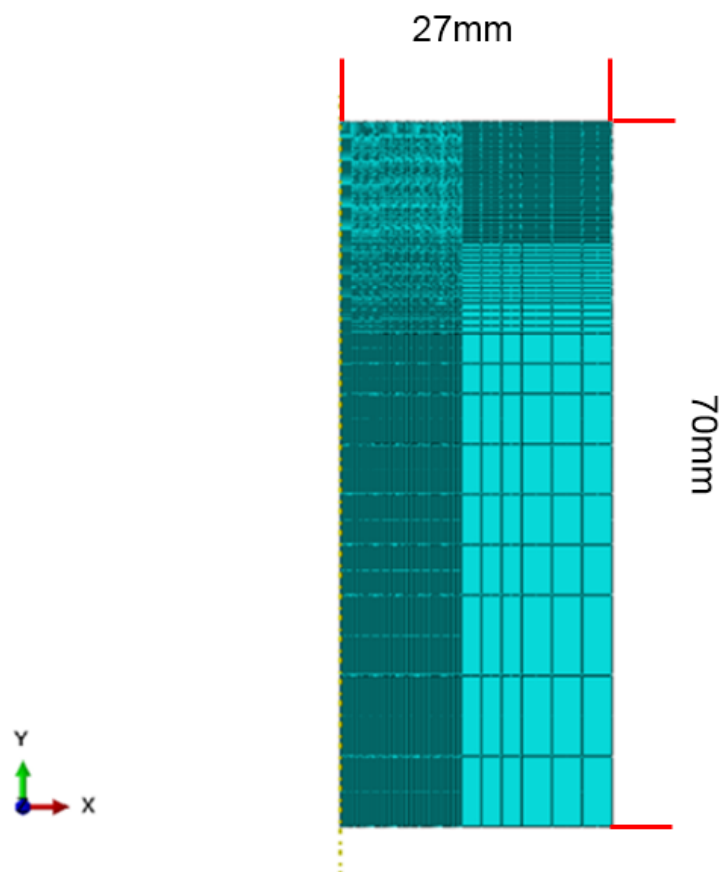


Figura 32 - Representação do modelo Axissimétrico.

As condições de contorno são divididas entre as térmicas e as mecânicas. Sobre as condições de contorno térmicas, foram consideradas a temperatura ambiente, coeficiente de convecção natural, convecção forçada e radiação. A respeito das propriedades mecânicas encontram-se o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson.

O modelo possui 3942 elementos tipo CAX8RT. Tal elemento é quadrilateral de 8 nós, com acoplamento termomecânico, possuindo deslocamentos e temperaturas bilineares e integração reduzida. A discretização foi aumentada próximo ao ponto de aplicação da carga térmica.

Os elementos axissimétricos são usados na análise de corpos de revolução submetidos a carregamentos axissimétricos. As considerações matemáticas sobre o modelo axissimétrico guardam semelhança com o elemento de estado plano de deformações, uma vez que neste último uma seção se repete linearmente, enquanto

que no modelo axissimétrico essa repetição acontece de forma angular ao redor de um eixo.

Por conveniência, é comum representar o modelo axissimétrico em coordenadas cilíndricas, definidas pelas coordenadas r , θ e z . O deslocamento circunferencial é nulo, portanto os nós se deslocam nas direções radial (u) e axial (w), onde u representa o deslocamento em r , e w representa o deslocamento na direção z . A figura 33 apresenta a representação do modelo axissimétrico em coordenadas cilíndricas.

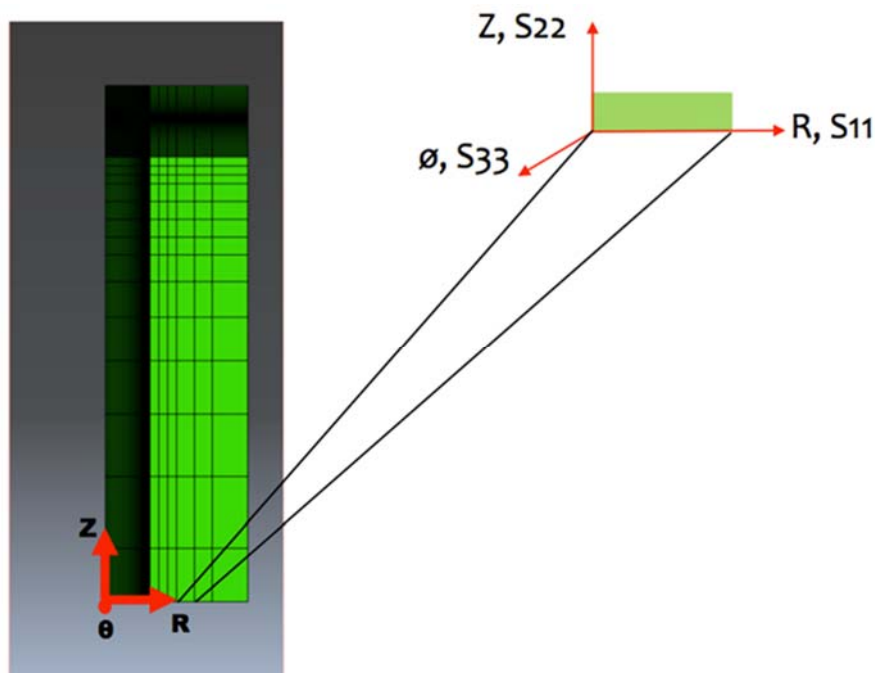


Figura 33 - Modelo axissimétrico em coordenadas cilíndricas.

As tensões relativas ao problema axissimétrico são dadas pela equação

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{zr} \end{Bmatrix} = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

A deformação radial, a deformação axial e a distorção é dada respectivamente pela equação 16 (Filho, Avelino A.).

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad \gamma_{zr} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \quad (16)$$

As condições de contorno térmica e mecânica usadas no modelo estão apresentadas na figura 34. Na parte térmica, foi aplicada a condição ambiental de temperatura, bem como o coeficiente de radiação e a condição de convecção forçada no ponto de aplicação da carga térmica. Nas outras faces do modelo foi aplicada a condição de convecção natural. As condições de contorno mecânicas são a simetria no eixo vertical e o apoio vertical na face inferior do componente.

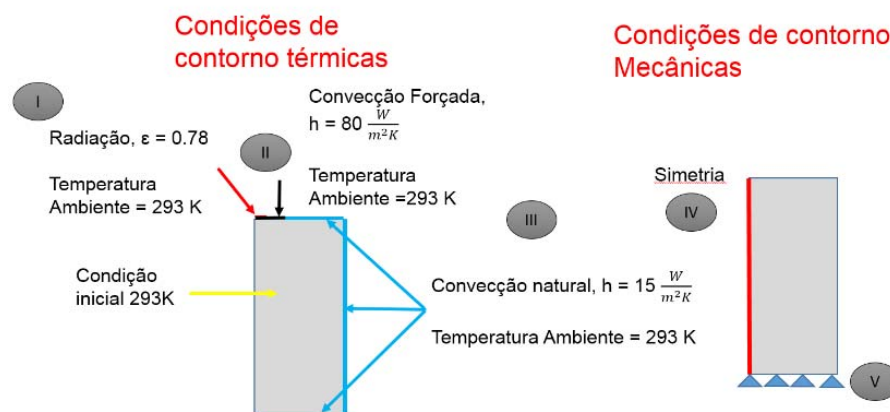


Figura 34 - Condições de contorno térmicas e mecânicas.

A Tabela 3 apresenta os valores usados no modelo para as propriedades da fonte de calor, do material e do corpo de prova para a caracterização do fenômeno termomecânico.

Tabela 3 - Valor das constantes termomecânicas utilizados no modelo.

Potência do laser	100	W
Densidade de potência	3.42 E8	W/m ²
Coeficiente de convecção	80	W/m ² K
Constante de Stefan Boltzmann	5.67 E-8	W/m ² K ⁴
Temperatura ambiente	293	K
Coeficiente de convecção natural	15	W/m ² K
Coeficiente de radiação	0.78	
Coeficiente de Poisson	0.2	

A condutividade térmica da rocha em função da temperatura usada no modelo é apresentada na figura 35. Os valores foram extraídos de (Robertson, 1988)

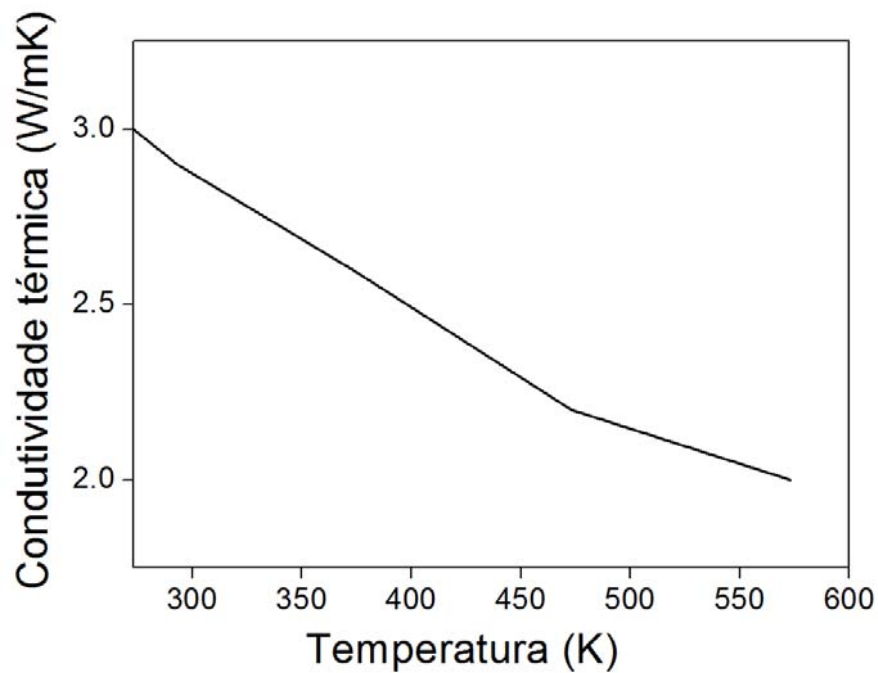


Figura 35 - Condutividade térmica em função da temperatura.

A figura 36 mostra a massa específica da rocha em função da temperatura. Os valores foram extraídos de (Robertson, 1988)

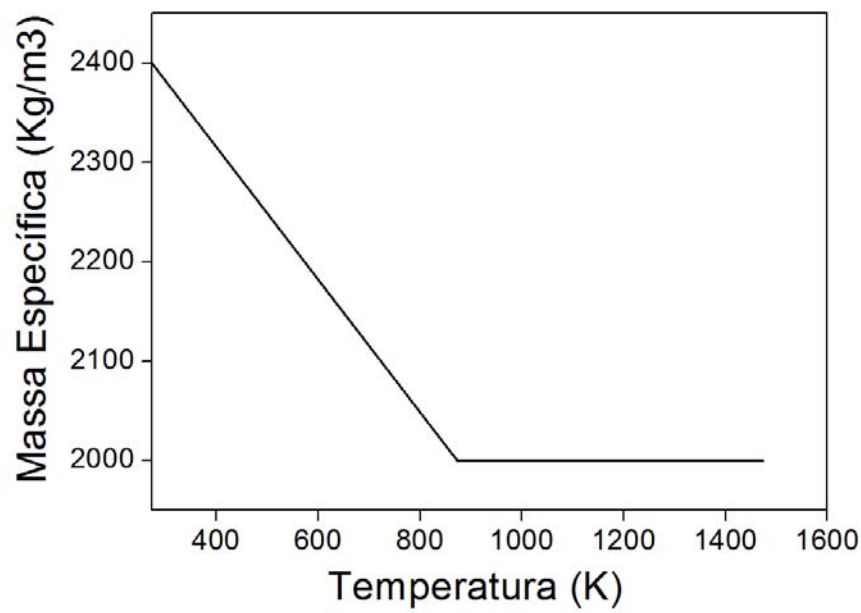


Figura 36 - Massa específica em função da temperatura.

O gráfico da expansão térmica da rocha em relação à temperatura é mostrado na figura 37. Os valores foram extraídos de (Robertson, 1988).

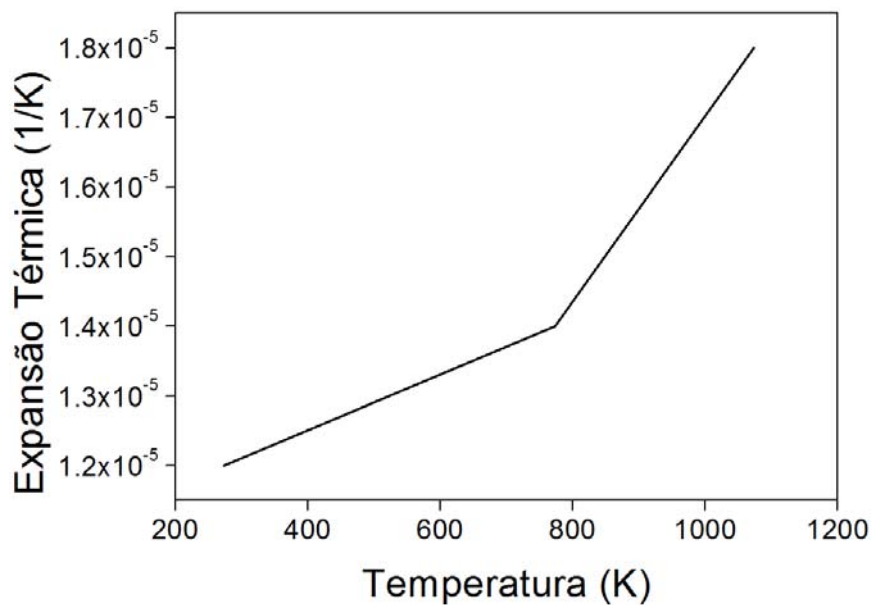


Figura 37 - Expansão térmica em função da temperatura.

O calor específico em função da temperatura da rocha é apresentado na figura 38. Os valores foram extraídos de (Robertson, 1988).

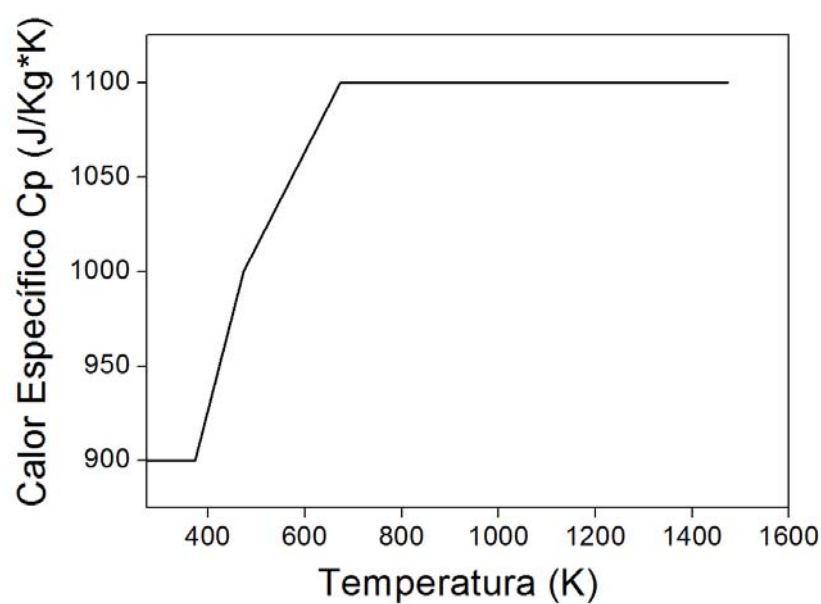


Figura 38 - Calor específico em função da temperatura.

O módulo de elasticidade da rocha variando em função da temperatura é apresentado na figura 39. Os valores foram extraídos de (Lianying, 2009).

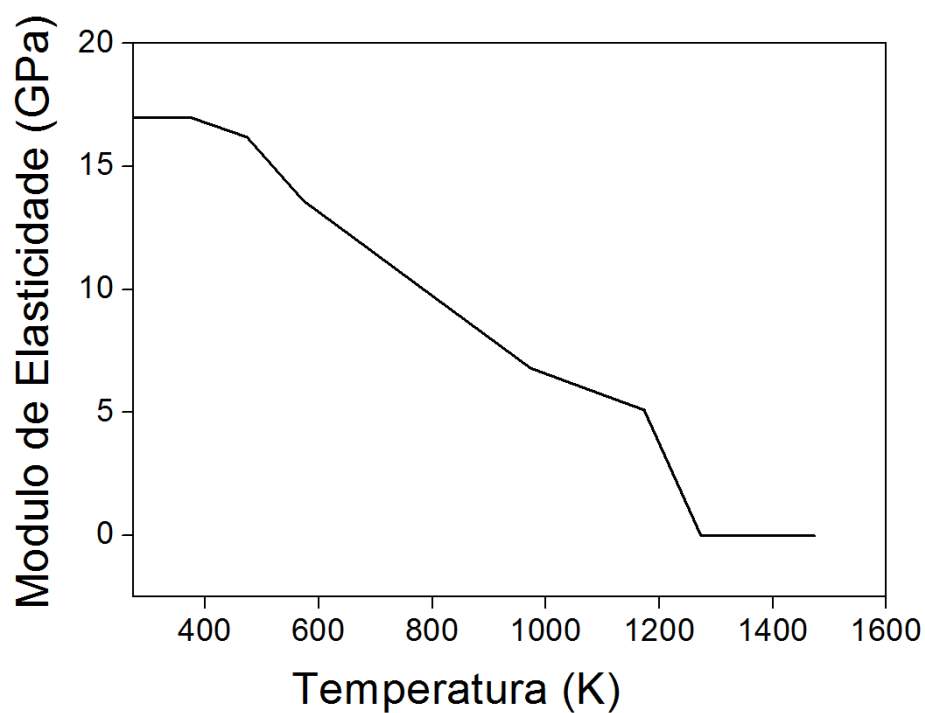


Figura 39 - Módulo de elasticidade em função da temperatura.

O carregamento aplicado é um fluxo de calor aplicado de duas formas: estática e dinâmica. Nos subitens abaixo os dois casos são discutidos em mais detalhe.

3.5.2.1. Modelo Estático

Neste caso de carregamento, a fonte de calor é aplicada durante um único período de tempo. Nesta tese foram utilizados os tempos de 2s, 10s e 20s. Foi aplicada um diâmetro de feixe de luz de 2mm e uma densidade de potência de $3,275 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$.

As simulações reproduziram os ensaios experimentais, que foram realizados com e sem a aplicação da pressão externa radial que simula a condição de confinamento da rocha no reservatório. A figura 40 ilustra a aplicação da fonte de calor (o feixe do laser) sem pressão radial na amostra (figura 40a) e a modelagem do modelo axissimétrico (que utiliza apenas metade da amostra).

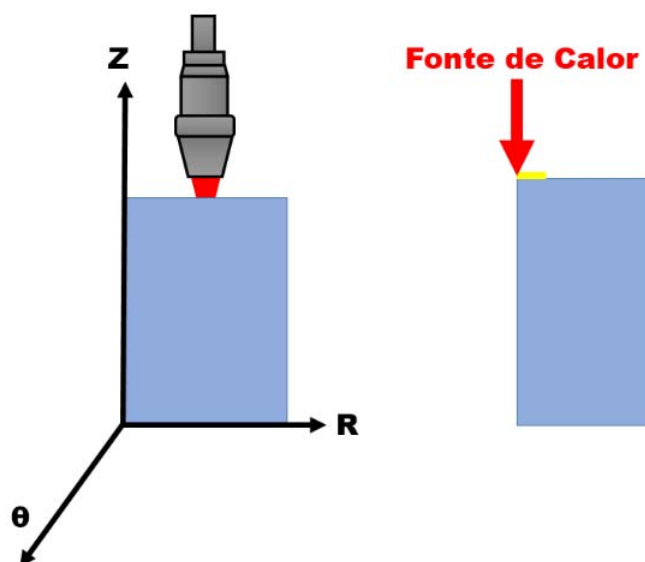


Figura 40 - Ilustração da aplicação da fonte de calor sem pressão radial.

A figura 41 ilustra a aplicação da fonte de calor com pressão radial.

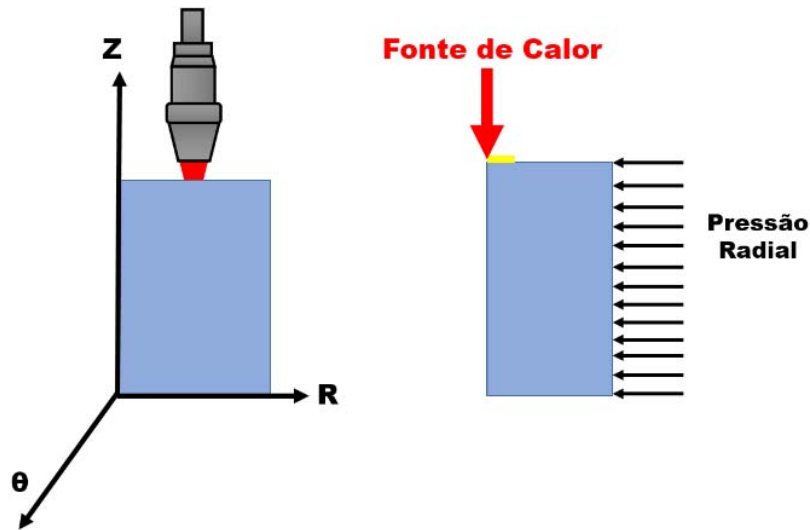


Figura 41 - Ilustração da fonte de calor com pressão radial.

3.5.2.2. Modelo Dinâmico

No modelo dinâmico, a fonte de calor (o feixe do laser) se desloca de dentro para fora em uma trajetória espiral, até o diâmetro desejado. A simulação desse processo no modelo axissimétrico foi feita deslocando o ponto de aplicação da fonte de calor em 5 passos até que um raio de 5mm tenha sido alcançado. A figura 45 ilustra o modelo dinâmico axissimétrico, deslocando-se em etapas sem pressão radial.

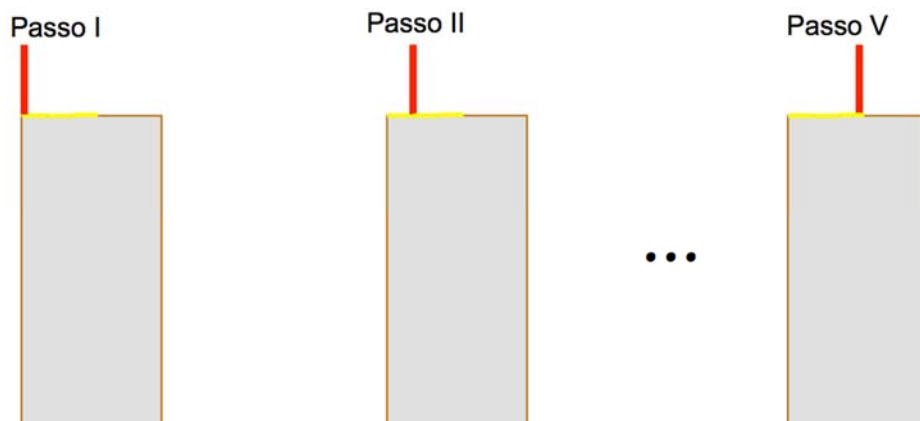


Figura 42 - Ilustração do modelo dinâmico sem pressão radial externa.

A figura 43 ilustra o deslocamento da fonte de calor de forma espiral no modelo com pressão radial externa.

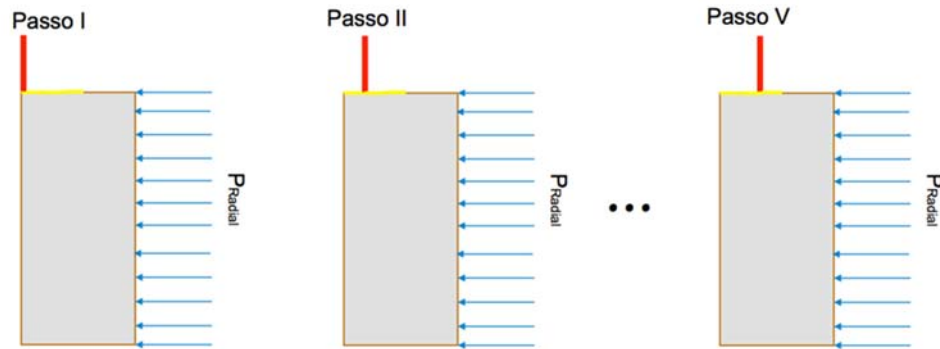


Figura 43 - Ilustração do modelo dinâmico com pressão radial externa.

4

Resultados e Análise

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise petrofísica da rocha Bege Bahia empregada como rocha para a perfuração a laser. Além disso, os resultados experimentais e da modelagem numérica. Nos resultados experimentais e numéricos foram estruturados da seguinte maneira. Primeiramente, são apresentados os resultados experimentais (volume removido, profundidade e energia específica) no caso estático com e sem pressão radial; com tempos de perfuração de 2s, 10s e 20s; e repetitividade de três vezes. Em seguida, é apresentado o caso dinâmico com e sem pressão, e com uma duração de 100s.

Posteriormente, apresentamos os resultados da microtomografia para o caso estático de 10 segundos de duração, com e sem pressão radial; em seguida do teste dinâmico de 100s com pressão radial. As microtomografias foram feitas na rocha antes e depois do processo de perfuração a laser.

Finalmente, comparamos os resultados numéricos das simulações realizadas com os resultados experimentais.

Os ensaios foram feitos com amostras cilíndricas de rocha de Bege Bahia, de 54 mm de diâmetro e 70 mm de comprimento. Para todos os testes foram usados uma lente de distância focal de 200mm.

A análise semiquantitativa com a fluorescência de raio X foi realizada no Laboratório de Difração de raio-x do Departamento de Engenharia Química e de Materiais (DEQM) da PUC-Rio. Os resultados mostraram uma alta concentração de cálcio (59%) proveniente do carbonato de cálcio, confirmado na análise qualitativa. Este resultado confirmou a similaridade com as rochas carbonáticas do Pré-sal. A tabela 4 apresenta a análise semiquantitativa por fluorescência de raio X do Bege Bahia.

Tabela 4 - Análise semiquantitativa do Bege Bahia.

Elemento	Percentagem (%)
Ca	59
O	29,2
Na	6,41
Mg	1,36
Si	1,18
Cl	0,703
K	0,54
Al	0,435
S	0,235
Fe	0,192

4.1.1. Análise Quantitativa (método Rietveld)

A análise quantitativa com o método Rietveld foi também realizada no Laboratório de Difração de raio-x do DEQM da PUC-Rio. O objetivo de realizar este tipo de análise com o Bege Bahia foi demonstrar a presença das altas concentrações de minerais carbonáticos (carbonato de cálcio 93,04% e dolomita 5,88%), na fase cristalina. O método Rietveld é caracterizado fundamentalmente pelo ajuste de um difratograma para extrair informações da estrutura cristalina do material. Na Tabela 5 é apresentado o resultado da análise quantitativa do Bege Bahia.

Tabela 5 - Análise qualitativa do Bege Bahia.

Mineral	Concentração (%)
CaCO ₃	93,04
CaMg(CO ₃) ₂	5,88
SiO ₂	1,08

4.1.2. Análise Termogravimétrica (TG)

A análise termogravimétrica (TG) foi realizada no Laboratório de Difração de raio-x do DEQM da PUC-Rio. Esta técnica mede o percentual de perda de massa de uma amostra em relação a temperatura ou o tempo, permitindo o conhecimento dos intervalos de temperaturas na qual a amostra se desidrata (perda de água). A amostra se descompõe quimicamente, liberando ou absorvendo energia, e adquire uma composição fixa.

O resultado da análise em geral é mostrado sob a forma de um gráfico cuja abscissa (x) contém os registros de temperatura ou do tempo, e a ordenada (y) contém o percentual em massa perdido ou ganho.

No teste de TG aplicado ao Bege Bahia foi encontrada a faixa onde ocorre a maior decomposição térmica (940 K até 1175 K), de aproximadamente 43%. A calcinação do carbonato de cálcio é o processo responsável por esta perda de massa. A equação 17 descreve esta reação química na qual se libera CO₂ equivalente a 44,01% de perda de massa, e se mantém o CaO, equivalente ao 56,077% de massa. Na figura 44 este perfil de perda de massa é apresentado.



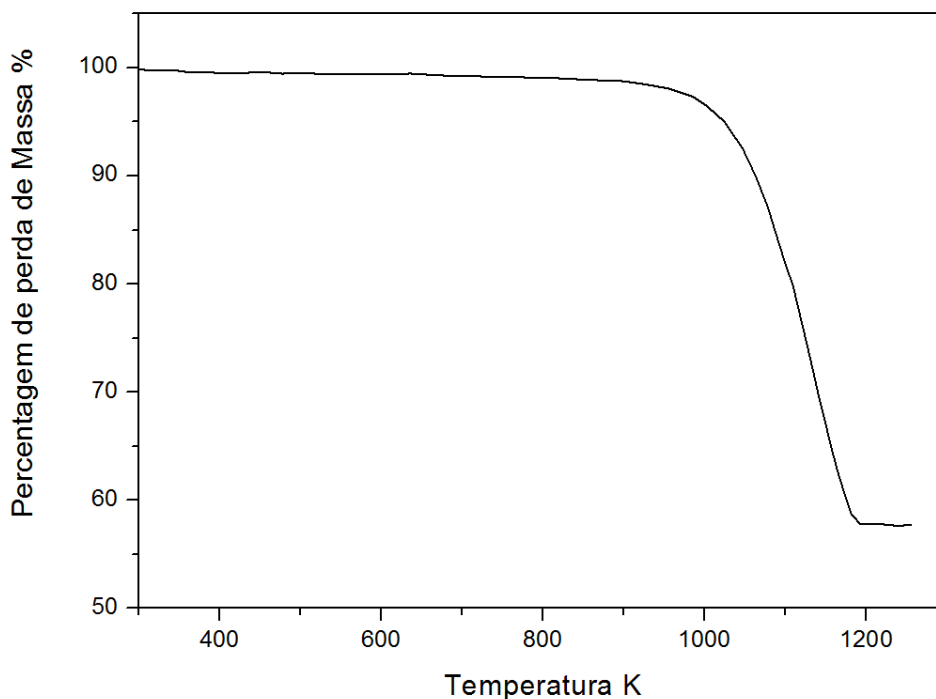


Figura 44 - Perfil de perda de massa do Bege Bahia.

4.1.3. Lente de distância focal de imagens

Conforme explicamos no Capítulo 2, a escolha da lente de focalização e da distância focal são relevantes para perfil de densidade de potência. Neste trabalho foi utilizada uma lente de distância focal igual a de 200mm.

Na figura 33 e figura 34 mostra-se o perfil da densidade de potência do laser para esta lente. Como pode ser observado, há forte influência da área de incidência (área formada pelo diâmetro do feixe) e o ponto focal sobre a densidade de potência para diferentes potências aplicadas.

Nos ensaios realizados utilizou-se sempre a potência de 1050 W e diâmetro do feixe de 2mm, que gera uma área de influência de 3,206 mm², com densidade de potência de $3.275 \cdot 10^4$ W/cm². As figuras 45 e 46 também apresentam a localização da potência aplicada, diâmetro do feixe, foco e densidade de potência usada em todos os testes.

Perfil de Densidade de Potência da Lente de 200mm

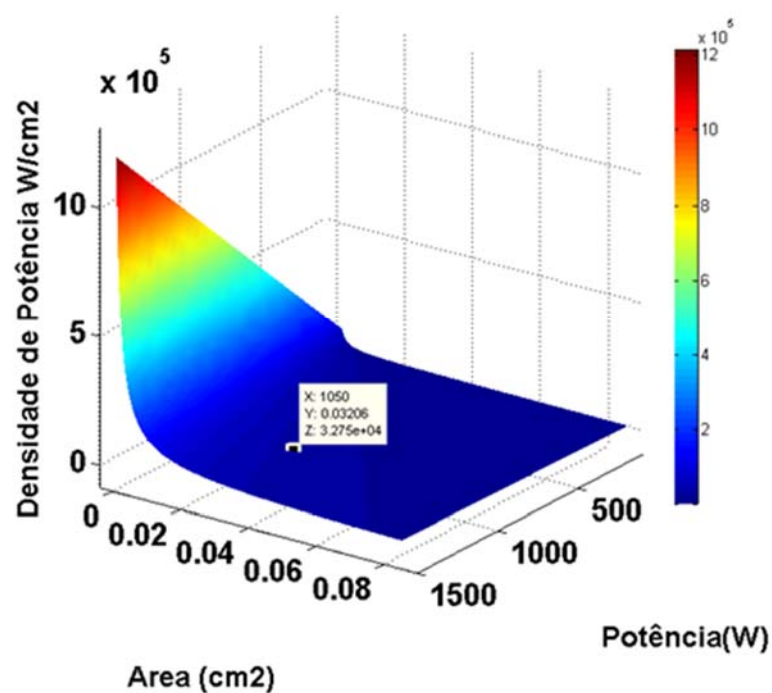


Figura 45 - Densidade de potência em função da área de incidência e a potência.

Perfil de Densidade de Potência da Lente de 200mm

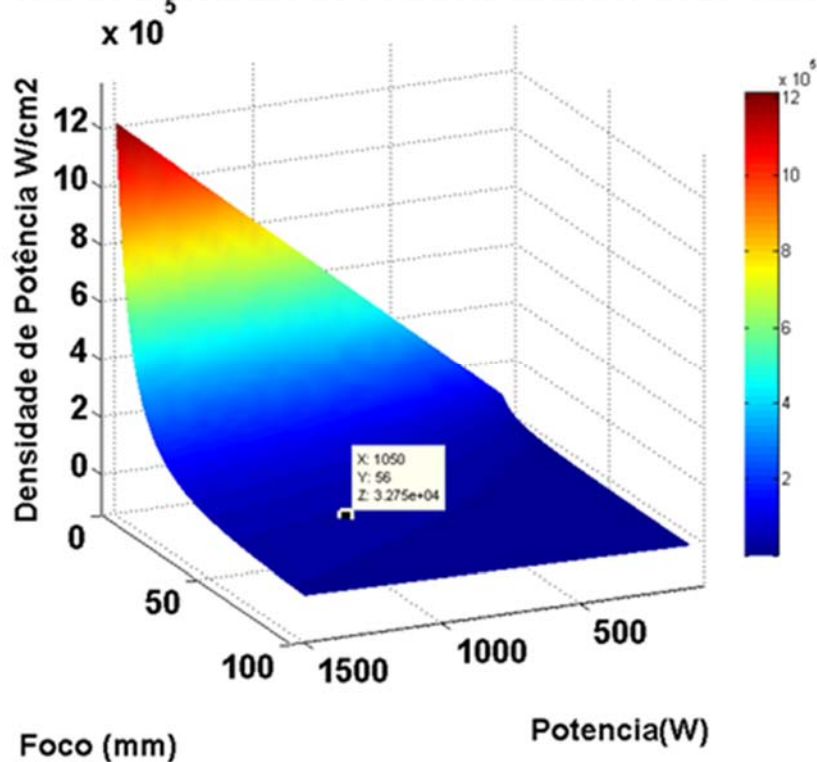


Figura 46 - Densidade de potência em função do ponto focal e a potência.

4.2.

Resultados da Perfuração do Teste estático

Com o objetivo de chegar às condições de canhoneio mais eficientes para a perfuração da rocha, foram usadas duas técnicas diferentes, a técnica estática e a técnica dinâmica.

Devido à dificuldade de calcular o volume removido da rocha depois da perfuração, foi necessário o uso de fluido de glicerina, devido a sua alta viscosidade e difícil adsorção na rocha. Após a perfuração, o furo foi preenchido com glicerina por meio de uma seringa. O volume da glicerina usada, igual ao volume de rocha removida, foi calculado através do deslocamento do embolo da seringa.

4.2.1.

Teste estático de 2s, 10s e 20s sem pressão radial

Foram realizados todos os testes estáticos sem pressão utilizando um bloco de dimensões, 250*250*48,4mm de Bege Bahia, com a finalidade de calcular o diâmetro, a profundidade e o volume removido na operação de perfuração. Assim, a amostra foi perfurada com uma mesma potência de 1050W e densidade de potência de $3,27 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ em todos os ensaios, para tempos de perfuração de 2s, 10s e 20s.

Para cada tempo de perfuração foram realizados três furos com o objetivo de fazer um teste de repetitividade. A tabela 6 apresenta os valores dos parâmetros mencionados anteriormente, onde os volumes removidos foram medidos e as energias específicas calculadas pela equação 3.

Tabela 6 - Valores dos testes estáticos sem pressão.

TESTE ESTÁTICO SEM PRESSÃO					
Tempo (s)	Potência (w)	Volume removido (cm³)	Profundidade (mm)	Diâmetro do furo (mm)	Energia específica (KJ/cm³)
2	1050	0,07	8,3	4,1	30
		0,05	7,9	3,9	42
		0,03	8,7	4,2	70
10	1050	0,2	18,7	8	52,2
		0,25	19,4	7,6	42
		0,3	16	5,3	35
20	1050	0,2	15	7,6	105
		0,3	24,6	7,2	70
		0,35	20	7	60

A repetitividade obtida não foi muito boa devido ao método utilizado para se obter o volume removido.

4.2.2.

Teste estático de 2s,10s e 20s segundos com pressão radial 6,89 MPa

Foram realizados todos os testes estáticos com pressão radial de 6,89MPa utilizando corpos de prova cilíndricos de 54 mm de diâmetro de Bege Bahia, com a finalidade de calcular o diâmetro a profundidade e o volume removido na operação de perfuração. Assim, amostra foi perfurada com uma mesma potência de 1050W e densidade de potência de $3,27 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ em todos os ensaios, para tempos de perfuração de 2s,10s e 20s, e potência aplicada de 6,89MPa.

Para cada tempo de perfuração foram realizados três furos com o objetivo de fazer um teste de repetitividade. A tabela 7 apresenta os valores dos parâmetros mencionados anteriormente, onde os volumes removidos foram medidos e as energias específicas calculadas pela equação 3.

Tabela 7 - Valores dos testes estáticos com pressão radial de 6,89MPa.

TESTE ESTÁTICO COM PRESSÃO RADIAL 6,89 MPa					
Tempo (s)	Potência (w)	Volume removido (cm³)	Profundidade (mm)	Diâmetro do furo (mm)	Energia específica (KJ/cm³)
2	1050	0,05	7,2	4,6	42
		0,75	7	5	28
		0,4	10	4,5	52,5
10	1050	0,15	14	5,7	70
		0,1	14,4	6,8	105
		0,175	16	4,6	60
20	1050	0,5	18,3	5,6	42
		0,15	17,5	7	140
		0,45	16,7	6,7	46,6

A repetitividade obtida não foi muito boa devido ao método utilizado para se obter o volume removido.

4.3.

Resultados da Perfuração do Teste dinâmico

4.3.1.

Teste dinâmico de 100 segundos sem pressão radial e um com um avanço

Foram realizados todos os testes dinâmicos sem pressão utilizando um bloco de dimensões, 250*250*48,4mm de Bege Bahia, com a finalidade de calcular a o diâmetro a profundidade e o a energia específica de corte. Assim, amostra foi perfurada com uma mesma potência de 1050W e densidade de potência de $3,27 \cdot 10^4$ W/cm² em todos os ensaios, para tempos de perfuração de 100s (um avanço). Este caso envolveu apenas um avanço, ou seja, a perfuração foi feita apenas na superfície.

Para cada tempo de perfuração foram realizadas três perfurações com o objetivo de fazer um teste de repetitividade. A tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros mencionados anteriormente.

Tabela 8 - Valores dos testes dinâmicos de 100s sem pressão.

TESTE DINÂMICO SEM PRESSÃO				
Tempo (s)	Potência (w)	Profundidade (mm)	Diâmetro do furo (mm)	Energia específica de corte (KJ/cm2)
100	1050	50	15,6	1.33
		47,4	15,2	1.4
		23	14,3	2.89

As profundidades e diâmetros foram medidos com um paquímetro, e as energias específicas de corte foram calculadas pela equação 9, onde o comprimento de corte é a trajetória em espiral que percorre o laser, apresentada na figura 47 (obtida pelo software *Solidworks*).

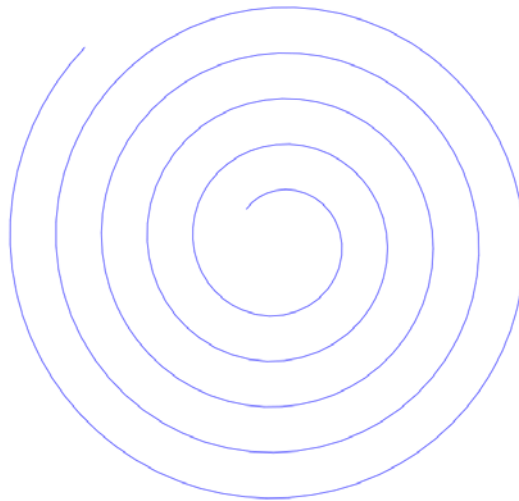


Figura 47 - Trajetória espiral.

O comprimento da espiral percorrida foi de 157,89mm, e é calculado no desenho obtido pelo software *Solidworks*. O tempo usado para percorrer essa trajetória foi 100s.

4.3.2.

Teste dinâmico de 100 segundos com pressão radial 6,89MPa e com um avanço

Foram realizados os testes dinâmicos com pressão radial de 6,89MPa utilizando uns corpos de prova cilíndricos de 54mm de diâmetro de Bege Bahia, com a finalidade de calcular o diâmetro e a profundidade na operação de perfuração. Assim amostra foi perfurada com uma mesma potência de 1050W em todos os ensaios e densidade de potência de $3,27 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$, para um tempo de perfuração de 100s. Este caso envolveu apenas um avanço, ou seja, a perfuração foi feita apenas na superfície.

Com o mesmo tempo de perfuração foram realizadas três perfurações com o objetivo de fazer um teste de repetitividade. A tabela 9 apresenta os valores dos parâmetros mencionados anteriormente. Onde os valores de profundidade foram medidos e as energias específicas de corte foram calculadas pela equação 9.

Tabela 9 - Valores dos testes dinâmicos de 100s com pressão radial de 6,89MPa.

TESTE DINÂMICO COM PRESSÃO RADIAL DE 6,89MPa				
Tempo (s)	Potência (w)	Profundidade (mm)	Diâmetro do furo (mm)	Energia específica de corte (KJ/cm²)
100	1050	19,2	15,2	3,46
		27	14,2	2,46
		43	14,4	1,54

4.3.3.

Teste dinâmico de 200 segundos sem pressão radial e dois avanços

Foram realizados os testes dinâmicos sem pressão utilizando um bloco de dimensões, 250*250*48,8mm de Bege Bahia, com a finalidade de calcular a o diâmetro a profundidade e o a energia específica de corte. Assim, aa amostras foram perfurada com uma mesma potência de 1050W em todos os ensaios e densidade de potência de $3,27 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$, para tempos de perfuração de 200s. Este caso envolveu dois avanços (100s para cada), ou seja, a perfuração foi feita primeiro na

superfície, e depois foi repetida novamente após se aprofundar o laser por 15mm. Este procedimento foi realizado com o objetivo de aumentar a profundidade e diminuir a energia específica de corte. A tabela 10 mostra os valores dos parâmetros mencionados anteriormente.

Tabela 10 - Valores dos testes para a perfuração de 200s (dois avanços) sem pressão.

TESTE DINÂMICO SEM PRESSÃO COM DOIS AVANÇOS				
Tempo (s)	Potência (w)	Profundidade (mm)	Diâmetro do furo (mm)	Energia específica de corte (KJ/cm2)
100	1050	69	14	1,92
		67	17	1,98
		53	17,5	2,51

4.3.4.

Teste dinâmico de 200 segundos com pressão radial 6,89MPa e dois avanços

Foram realizados os testes dinâmicos com pressão radial de 6,89MPa, utilizando corpos de prova cilíndricos de 54mm de diâmetro de Bege Bahia, com a finalidade de calcular o diâmetro e a profundidade na operação de perfuração. Assim, amostra foi perfurada com uma mesma potência de 1050W e densidade de potência de $3,27 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ em todos os ensaios, para um tempo de perfuração de 200s. Novamente, foram utilizados dois avanços (100s para cada avanço). Para cada tempo de perfuração foram realizadas três perfurações com o objetivo de fazer um teste de repetitividade. A tabela 11 apresenta os valores dos parâmetros mencionados anteriormente, onde os valores de profundidade foram medidos e as energias específicas de corte foram calculadas pela equação 9.

Tabela 11 - Valores dos testes de 200s com pressão radial de 6,89MPa (dois avanços).

TESTE DINÂMICO COM PRESSÃO RADIAL 6,89MPa COM DOIS AVANÇOS				
Tempo (s)	Potência (w)	Profun- didade (mm)	Diâmetro do furo (mm)	Energia específica de corte (KJ/cm2)
100	1050	34,3	14,5	3,87
		52	15	2,55
		57,2	14,5	2,3

4.3.5.

Teste dinâmico de 200 segundos com pressão radial 10,34MPa e dois avanços

Foram realizados os testes dinâmicos com pressão radial de 10,34MPa, utilizando corpos de prova cilíndricos de 54mm de diâmetro de Bege Bahia, com a finalidade de calcular o diâmetro e a profundidade na operação de perfuração. Assim, a amostra foi perfurada com uma mesma potência de 1050W e densidade de potência de $3,27 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$ em todos os ensaios, para um tempo de perfuração de 200s. Novamente, foram utilizados dois avanços (100s para cada avanço). Para cada tempo de perfuração foram realizadas três perfurações com o objetivo de fazer um teste de repetitividade. A tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros mencionados anteriormente, onde os valores de profundidade foram medidos e as energias específicas de corte foram calculadas pela equação 9.

Tabela 12 - Valores dos testes de 200s com pressão radial de 10,34MPa
(dois avanços).

TESTE DINÂMICO COM PRESSÃO RADIAL 10,34MPa COM DOIS AVANÇOS				
Tempo (s)	Potência (w)	Profun- didade (mm)	Diâmetro do furo (mm)	Energia específica de corte (KJ/cm²)
P100	1050	43,5	14,7	3,05
		36,5	14,4	3,64
		34	15,5	3,91

4.4.

Resumo dos resultados dos testes dinâmico

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos nos testes dinâmicos sob diferentes condições (com pressão e sem pressão, um avanço e dois avanços) as figuras 48 e figura 49 mostram a Comparação dos resultados experimentais da variação da energia de corte e da profundidade, respectivamente, dos testes dinâmicos discutidos acima. As figuras mostram os resultados obtidos para os casos dinâmicos com e sem a aplicação da pressão externa de 6,89 MPa, para um (100s) e dois avanços (200s), e para o caso da pressão externa aplicada de 10,34MPa para dois avanços (200s).

Como se pode notar nas figuras, há uma dispersão entre os valores obtidos para os três ensaios realizados para cada caso. Este efeito ocorre devido à heterogeneidade das amostras. É possível também observar, ao se comparar as duas figuras, que quanto mais alta for a energia específica, menor será a profundidade.

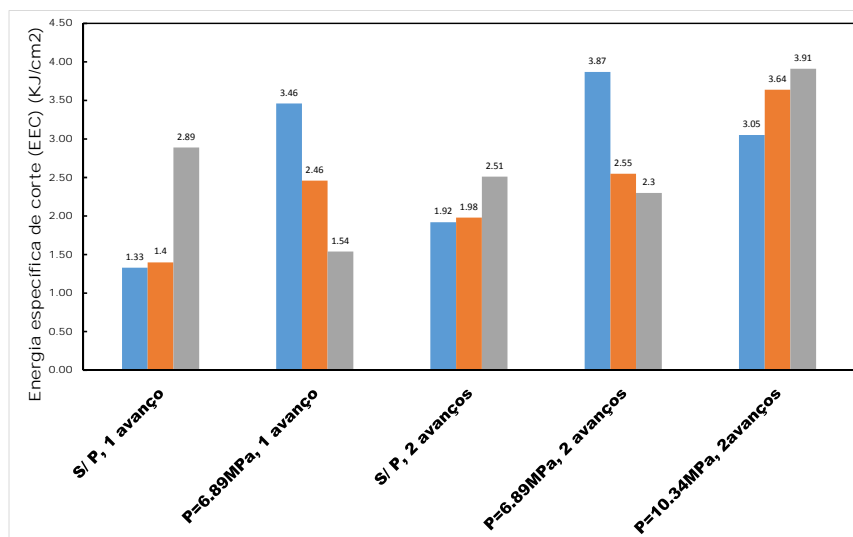


Figura 48 - Energia específica de corte vs Tipo de teste.

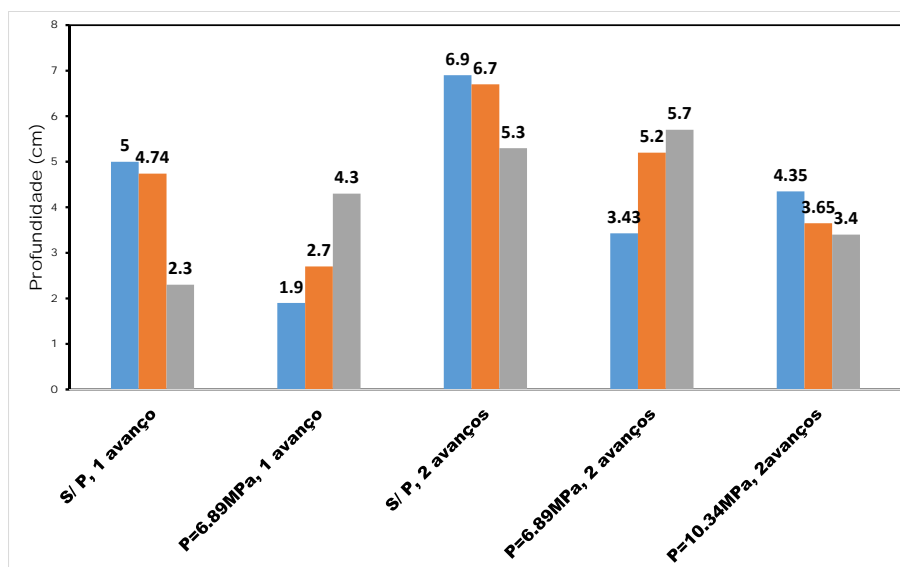


Figura 49 - Profundidade vs Tipo de teste.

Conforme mencionado anteriormente, nos parâmetros de volume do furo, diâmetro do furo, diâmetro da ZTA e profundidade do furo, os valores do teste com pressão externa são menores do que os valores sem pressão, uma vez que a pressão dificulta a saída de material, gerando menores diâmetros e profundidades.

Já para os parâmetros de volume da ZTA e energia específica, os valores no ensaio com pressão são maiores que os sem pressão. Isto se deve a uma quantidade maior de material compactado por causa da pressão e à energia necessária para realizar a perfuração nessas condições.

Em geral se observa que a perfuração sem considerar a pressão externa requer menos energia, porém a condição das rochas nos reservatórios conta com a ação da pressão hidrostática e da pressão de poros.

4.5.

Microtomografias do teste estático sem pressão e com pressão

Conforme mencionado acima, o cálculo do volume removido pelo método da glicerina líquida não forneceu uma repetitividade boa. Portanto, o volume removido foi calculado através das microtomografias obtidas para os corpos de prova após a perfuração.

Para a análise da microtomografia dos corpos de prova nos testes de 10 segundos com e sem pressão radial, não foi feita nenhuma preparação inicial como retirar lâminas. Foi empregada a mesma metodologia no processamento e análise digital de imagens e configuração do microtomógrafo, com o objetivo de garantir que as comparações fossem feitas sobre os mesmos critérios.

Em todas as análises utilizou-se a mesma resolução de 56 μm , permitindo uma varredura completa da amostra dentro de um tempo razoável. Foram testadas reconstruções a partir de 800, 1600 e 3201 projeções. Optou-se por um valor médio de 1600 projeções. A tabela 13 apresenta de forma detalhada as condições de aquisição.

Tabela 13 - configuração das condições de aquisição do microtomógrafo.

Tensão (kV)	150
Rotação total (°)	0 a 360
Tempo total de varredura	6 horas
Tempo de exposição para cada projeção (segundos)	10
Passo angular (projeções)	1600
Resolução espacial (µm)	56

Uma vez obtidas as imagens do microtomógrafo, segue-se a fase de processamento e análise digital de imagens (PADI e ADI), com o objetivo de calcular o volume removido pela operação a laser e a zona termicamente afetada. Para tal tarefa, foi necessário o desenvolvimento de um programa para processamento PADI e ADI feito em Matlab, conforme mencionado no capítulo 3.

4.5.1.

Microtomografias do teste de 10 segundos sem pressão

A figura 50, apresenta a reconstrução da imagem em 3D e no corte frontal feita no programa ORS (*Object Research Systems*) de uma amostra do Bege Bahia antes da operação de perfuração a laser. Este programa é especialmente usado na criação de imagens 3D e de cortes frontais e periódicos de corpo de prova. Para este processamento não fora usada a etapa de pré-processamento.

O objetivo de fazer a microtomografia antes e depois de realizar o processo de perfuração é observar a influência da zona termicamente afetada quando é realizado o processo de perfuração.

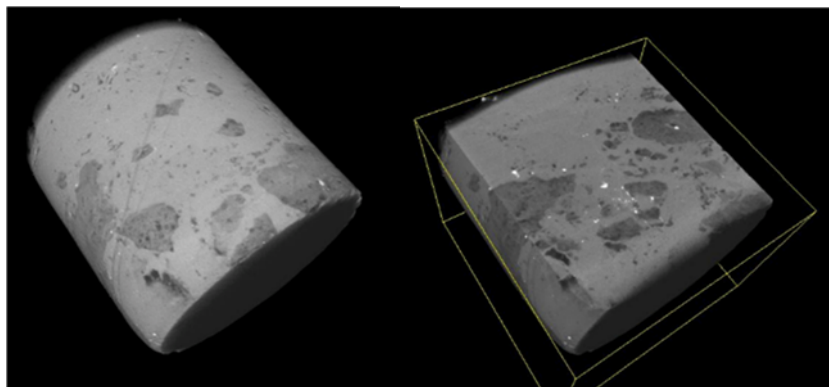


Figura 50 - Corpo de prova microtomografiado antes da perfuração.

Na

figura 51 apresenta-se a vista superior e a imagem em 3D do corpo de prova perfurado. Pode-se observar o diâmetro externo da perfuração; uma coroa em volta do furo, chamada de zona termicamente afetada (ZTA); e a medida do diâmetro externo, de 54mm. Esta medida foi tomada como referência, com o objetivo de verificar que as medidas feitas na imagem 3D estão corretas.

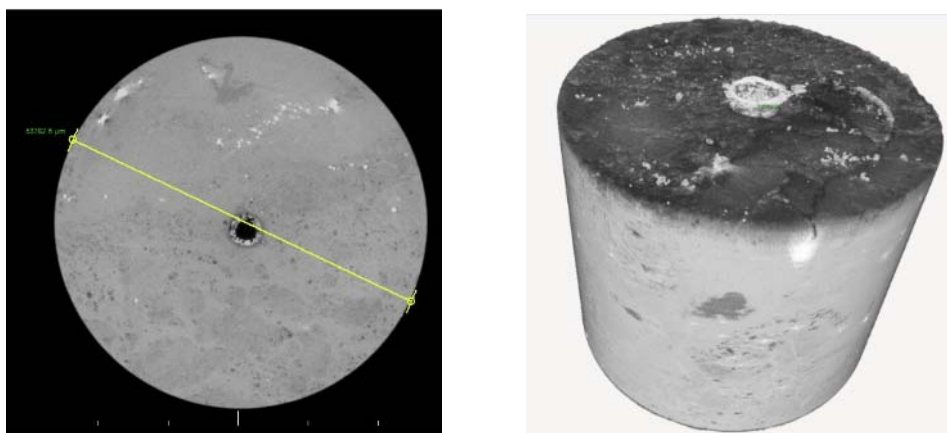


Figura 51 - vista superior e imagem 3D depois de furado o corpo de prova.

Na figura 52 apresenta-se um corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se o diâmetro interno da perfuração de 5,6mm (figura 52b) e o diâmetro externo da zona termicamente afetada (ZTA) de 6,7mm (figura 52a). Além disso, observa-se a geometria de perfuração correspondendo a um cone bem feito e a espessura da zona termicamente afetada. Também pode-se ver que não existe nenhum tipo de dano fora da zona termicamente afetada.



Figura 52 - Corte frontal da imagem.

A figura 53 apresenta um outro corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se a profundidade da perfuração de 17,44mm, além da geometria cônica da perfuração e a zona termicamente afetada.

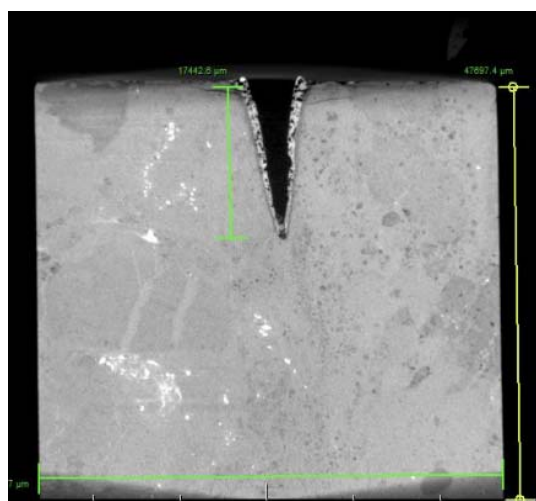


Figura 53 - Profundidade da perfuração para 10s sem pressão.

A figura 54 mostra o processamento de análise nas imagens da microtomografia para calcular os volumes do furo e da área termicamente afetada.

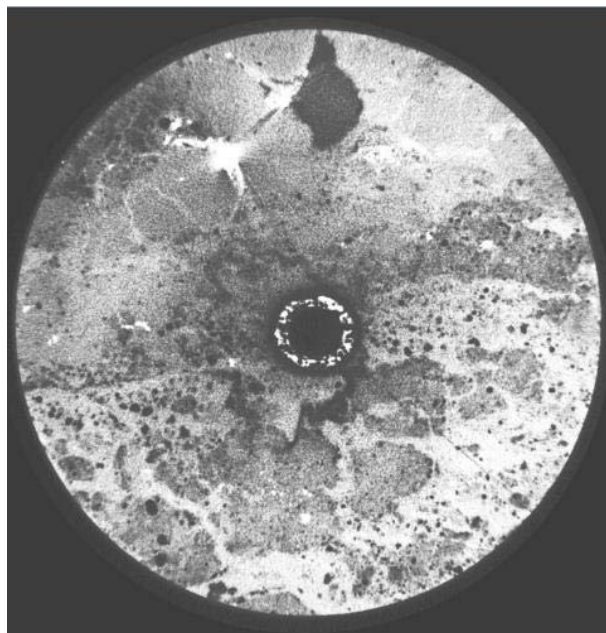


Figura 54 - Análise digital de imagem.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados do volume da perfuração e o volume da zona termicamente afetada, calculados a partir da análise e processamento digital de imagens com ajuda do programa desenvolvido em Matlab. A energia específica, também mostrada na tabela, foi calculada usando a equação 3 no Capítulo 2.

Tabela 14 - Valores de volume de furo e zona termicamente afetada.

Volume do furo	139 mm ³
Volume da zona termicamente afetada	36,27mm ³
Energia específica	75,5KJ/cm3

4.5.2.

Microtomografias do teste de 10 segundos com pressão radial de 6,89 MPa

A figura 55, apresenta a reconstrução da imagem em 3D e no corte frontal da amostra do Bege Bahia, antes da operação de perfuração a laser. O objetivo de fazer a microtomografia antes e depois de realizar o processo de perfuração é observar a influência da zona termicamente afetada quando é realizado o processo de perfuração.

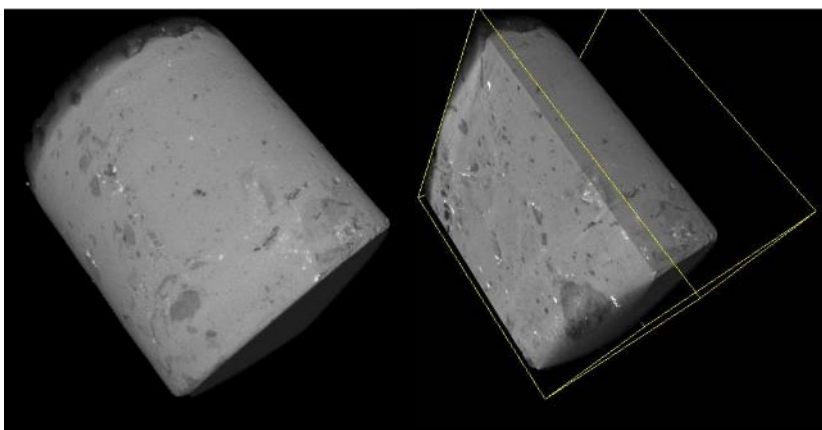


Figura 55 - Reconstrução em 3D do corpo de prova antes da perfuração.

Para este teste estático, a amostra foi irradiada durante 10 segundos, submetida à pressão de 6,89 MPa. Na figura 56 apresenta-se a vista superior e a imagem em 3D do corpo de prova perfurado. Pode-se observar o diâmetro externo da perfuração; uma coroa em volta do furo, chamada de zona termicamente afetada (ZTA); e a medida do diâmetro externo, de 54mm. Esta medida foi tomada como referência, com o objetivo de verificar se as medidas feitas na imagem 3D estavam corretas.

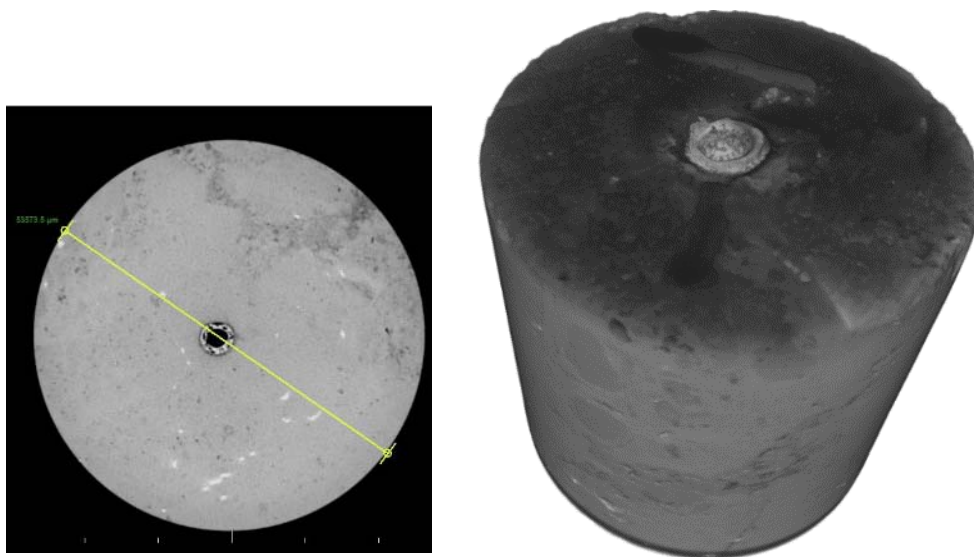


Figura 56 - Vista superior e imagem 3D do corpo de prova furado.

Na figura 57 apresenta-se um corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se o diâmetro interno da perfuração de 4,3mm (figura 57a) e o diâmetro externo da zona termicamente afetada (ZTA) de 6mm (figura 57b). Além disso, observa-se a geometria de perfuração correspondendo a um cone com a ponta irregular. Também é observado que a espessura da zona termicamente afetada é maior em Comparação com a do teste anterior de 10 segundos (sem pressão), devido à ação da pressão radial externa que dificulta a saída de material derretido. Também se pode ver que não existe nenhum tipo de dano fora da zona termicamente afetada.

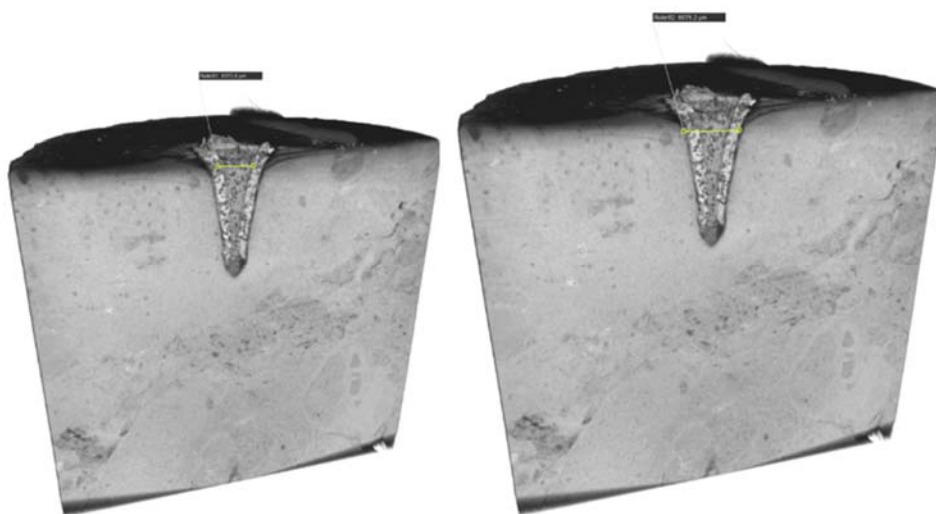


Figura 57 - Corte frontal apresentando os diâmetros externo e interno.

Na figura 58 apresenta-se um outro corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se a profundidade da perfuração de 15,7mm, além da geometria cônica da perfuração e a zona termicamente afetada. Também se evidencia que não existe dano térmico fora da área termicamente afetada.

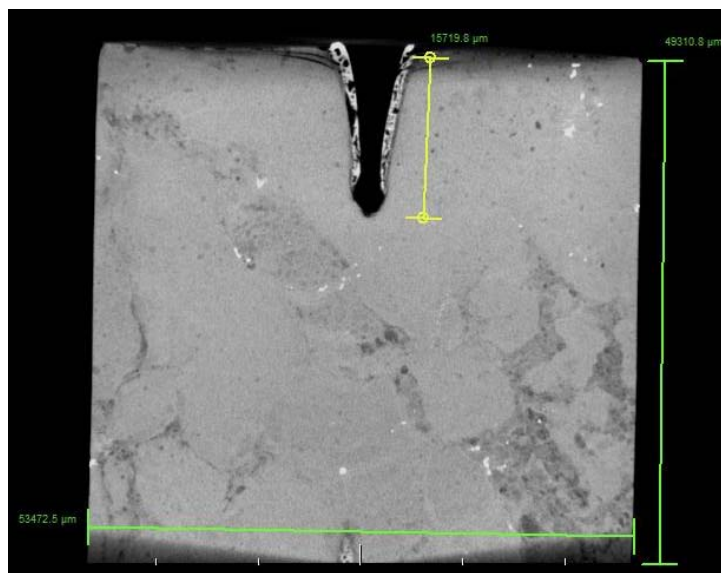


Figura 58 - Corte frontal apresentando a profundidade da perfuração.

A figura 59 mostra o processamento de análise nas imagens da microtomografia para calcular os volumes do furo e da área termicamente afetada.

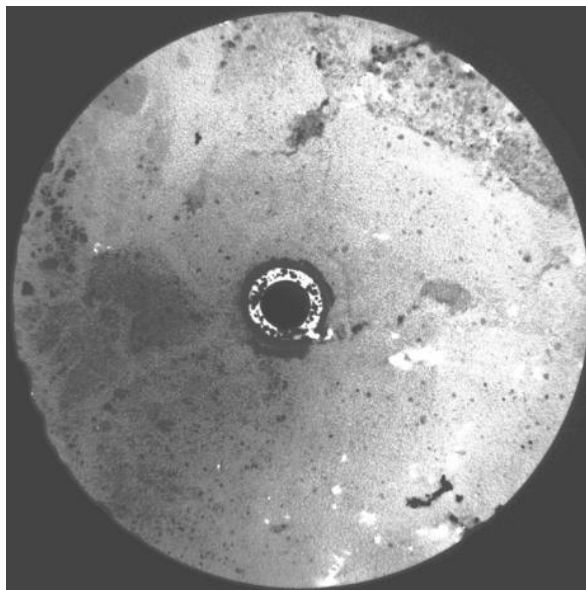


Figura 59 - Análise digital da imagem.

A Tabela 15 apresenta os resultados do volume da perfuração e o volume da zona termicamente afetada, calculados a partir da análise e processamento digital de imagens com ajuda do programa desenvolvido em Matlab. A energia específica, também mostrada na tabela, foi calculada usando a equação 3.

Tabela 15 - Valores de volume de furo e zona termicamente afetada.

Volume do furo	132 mm ³
Volume da zona termicamente afetada	50,05mm ³
Energia específica	79,5KJ/cm ³

4.5.3. Microtomografias do teste de 2 segundos com pressão radial de 13,78 MPa

No teste estático a amostra foi irradiada durante 2 segundos por um feixe de laser, submetida à pressão de 13,78 MPa. A figura 60, apresenta a reconstrução da

imagem em 3D e um corte frontal da amostra do Bege Bahia, depois da perfuração a laser.

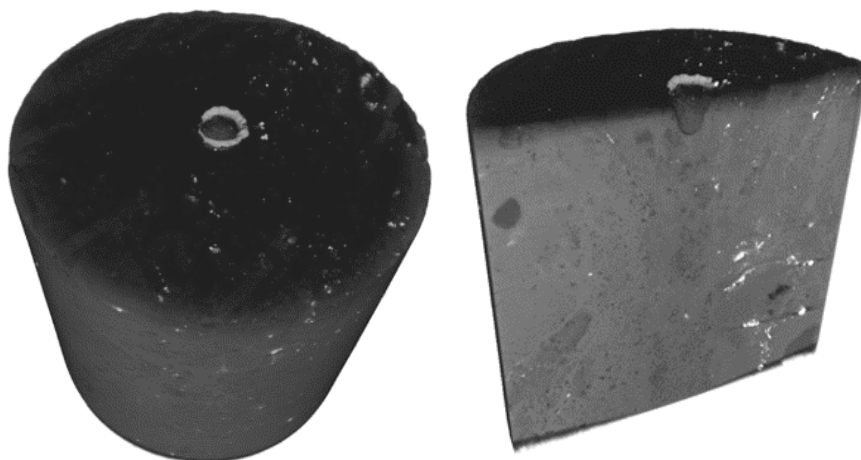


Figura 60 - Imagem 3D e corte frontal do corpo de prova depois da perfuração.

Na figura 61 apresenta-se novamente o corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se o diâmetro externo da ZTA de 4,9mm. Além disso, observa-se que a geometria de perfuração corresponde a um cone truncado. Foi observado que a espessura da zona termicamente afetada é mínima. Também se pode ver que não existe nenhum tipo de dano fora da zona termicamente afetada.

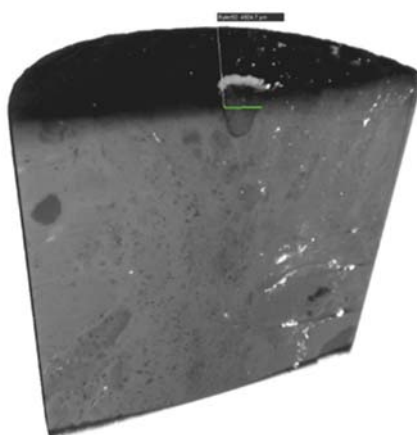


Figura 61 - Diâmetro e geometria da perfuração.

Na figura 62 apresenta-se novamente o corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se a profundidade da perfuração de 4,8mm, além da geometria cônica da perfuração e a zona termicamente afetada. Também se evidencia que não existe dano térmico fora da área termicamente afetada.

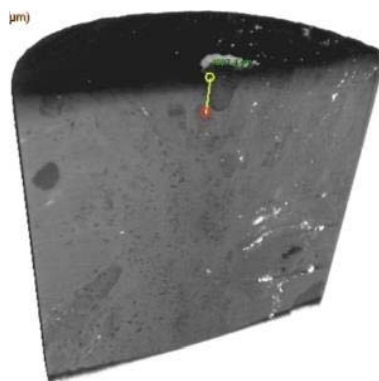


Figura 62 - Profundidade da perfuração para um tempo de 2s.

A figura 63 mostra o processamento de análise nas imagens da microtomografia para calcular os volumes do furo e da área termicamente afetada.

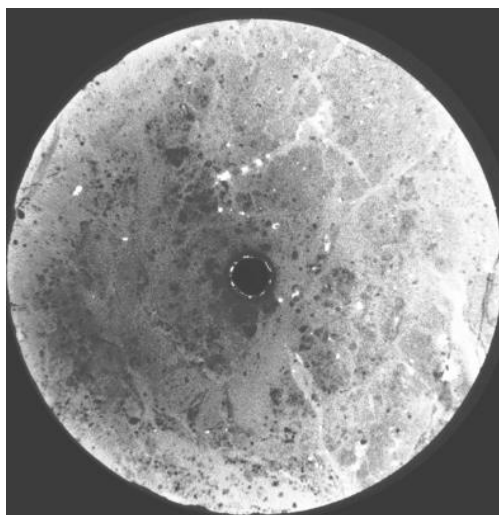


Figura 63 - Análise das imagens para calcular o volume do furo e a ZTA.

A Tabela 16 apresenta os resultados do volume da perfuração e o volume da zona termicamente afetada, calculados a partir da análise e processamento digital de imagens com ajuda do programa desenvolvido em Matlab. A energia específica, também mostrada na tabela, foi calculada usando a equação 3.

Tabela 16 - Valores de volume de furo e zona termicamente afetada.

Volume do furo	57,79mm ³
Volume da zona termicamente afetada	12,67mm ³
Energia específica	36,33KJ/cm ³

4.5.4.

Microtomografias do teste de 5 segundos com pressão radial de 13,78 MPa

No teste estático, a amostra foi irradiada durante 5 segundos por um feixe de laser, submetida à pressão de 13,78 MPa. A figura 64, apresenta a reconstrução da imagem em 3D e o corte frontal da amostra do Bege Bahia, depois da perfuração a laser.

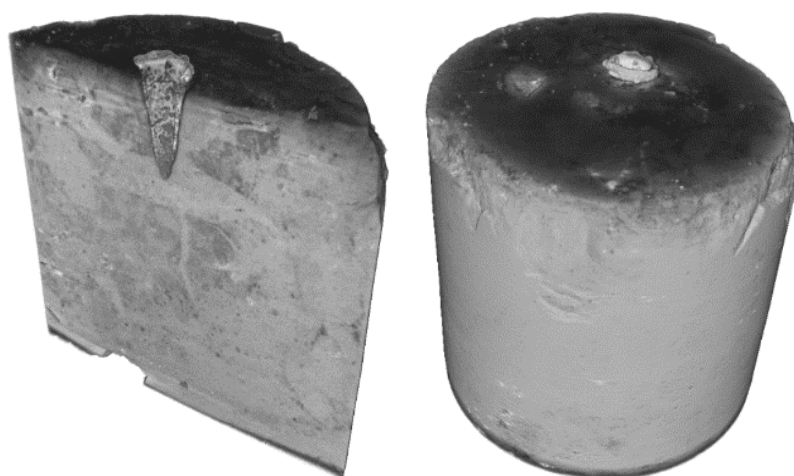


Figura 64 - Reconstrução em 3D do corpo de prova irradiado por 5s.

Na figura 65 apresenta-se novamente o corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se o diâmetro externo da ZTA de 5,74mm. Além disso, observa-se que a geometria de perfuração corresponde a um cone truncado. Foi observado que a espessura da zona termicamente afetada é maior que o caso de 2 segundos para a mesma pressão. Também se pode ver que não existe nenhum tipo de dano fora da zona termicamente afetada.

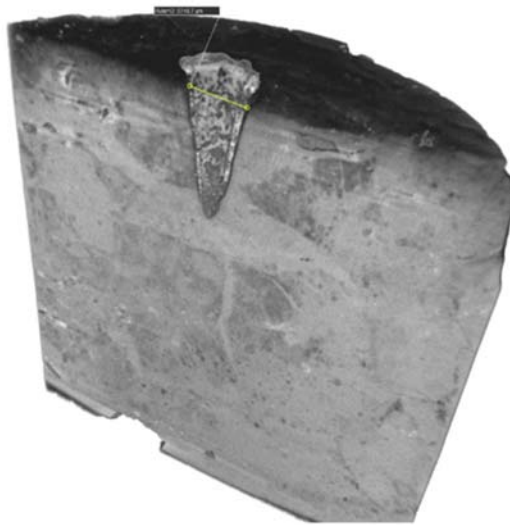


Figura 65 - Diâmetro externo da perfuração.

Na figura 66 apresenta-se novamente o corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se a profundidade da perfuração de 13,5mm, além da geometria cônica da perfuração e a zona termicamente afetada. Também se evidencia que não existe dano térmico fora da área termicamente afetada.

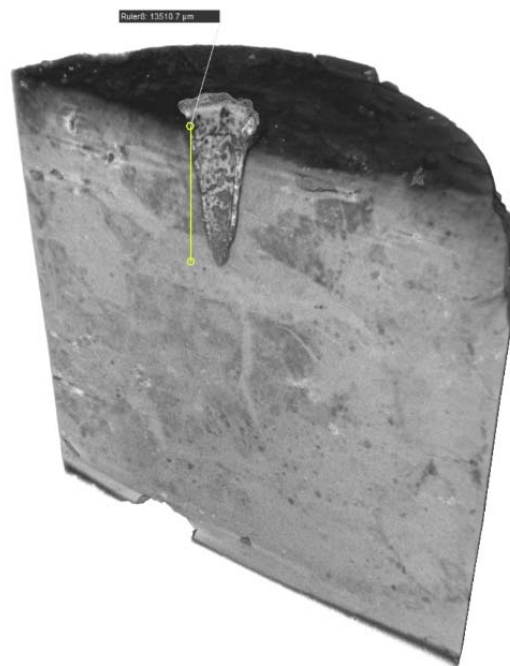


Figura 66 - Geometria e profundidade do corpo irradiado por 5s.

A figura 67 mostra o processamento de análise nas imagens da microtomografia para calcular os volumes do furo e da área termicamente afetada.

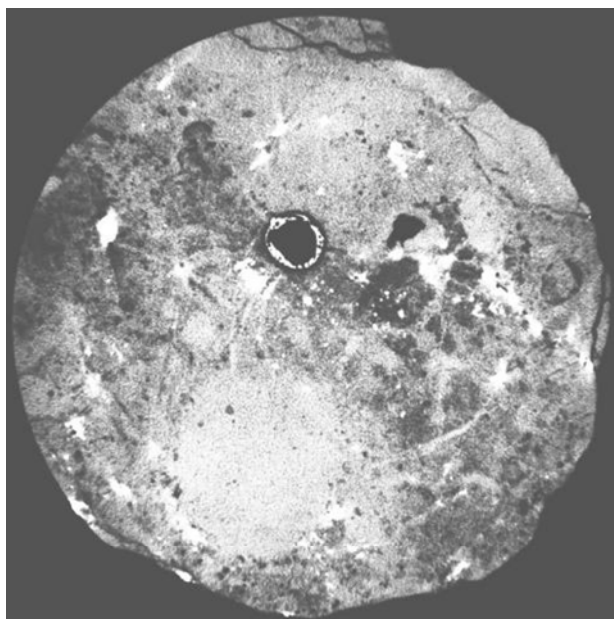


Figura 67 - Análise e processamento para calcular o volume do furo e ZTA da perfuração.

A Tabela 17 apresenta os resultados do volume da perfuração e o volume da zona termicamente afetada, calculados a partir da análise e processamento digital de imagens com ajuda do programa desenvolvido em Matlab. A energia específica, também mostrada na tabela, foi calculada usando a equação 3.

Tabela 17 - Valores do furo e da zona termicamente afetada.

Volume do furo	76,01mm ³
Volume da zona termicamente afetada	26,63mm ³
Energia específica	69,06 KJ/cm ³

4.5.5.

Microtomografias do teste de 20 segundos com pressão radial de 13,78 MPa

No teste estático a amostra foi irradiada durante 20 segundos por um feixe de laser, submetida à pressão de 13,78 MPa. A figura 68, apresenta a reconstrução da imagem em 3D e um corte frontal da amostra do Bege Bahia, depois da perfuração a laser.

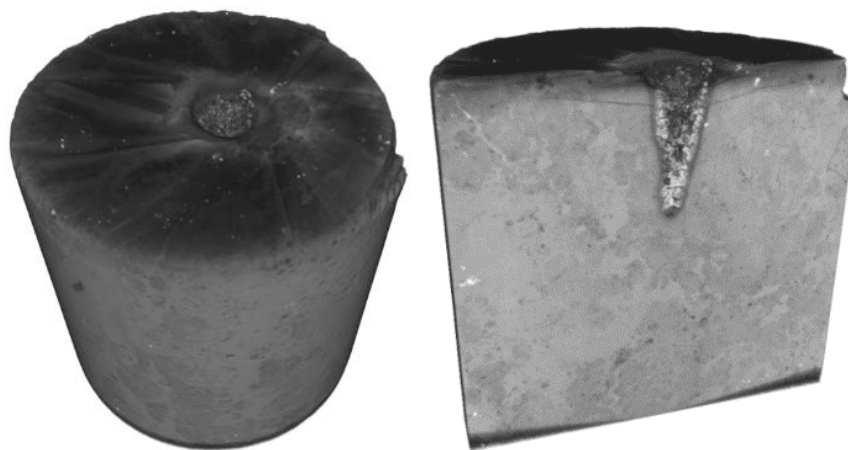


Figura 68 - Imagem 3D e corte frontal do corpo de prova irradiado por 20s.

Na figura 68 apresenta-se novamente o corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se o diâmetro externo da zona de 6,6mm (figura 69a) e um diâmetro interno de 4,2mm (figura 69b). Além disso, observa-se que a geometria de perfuração corresponde a um cone truncado. Foi observado que a espessura da zona termicamente afetada é maior do que a dos testes de 2s e 5s, submetidos à mesma pressão. Também é possível observar que não existe nenhum tipo de dano fora da zona termicamente afetada.

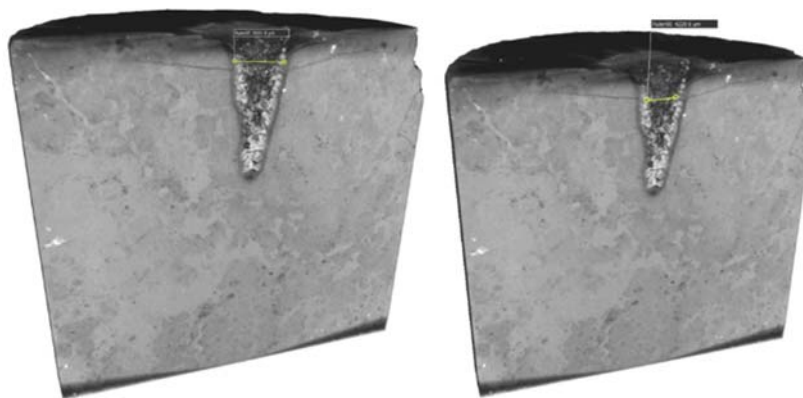


Figura 69 - Diâmetro externo e interno da perfuração.

Na figura 70 apresenta-se outro corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se a profundidade da perfuração de 22mm, além da geometria cônica da perfuração e a zona termicamente afetada, que é maior que as anteriores, conforme mencionado acima. Conclui-se que, nos testes estáticos, quanto maior tempo de exposição do feixe, maior são a profundidade e a área termicamente afetada. Também evidencia-se que não existe dano térmico fora da área termicamente afetada.

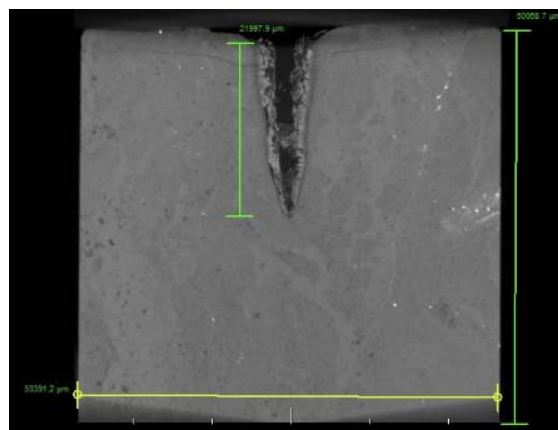


Figura 70 - Corte frontal e profundidade da perfuração.

A figura 71 mostra o processamento de análise nas imagens da microtomografia para calcular os volumes do furo e da área termicamente afetada.

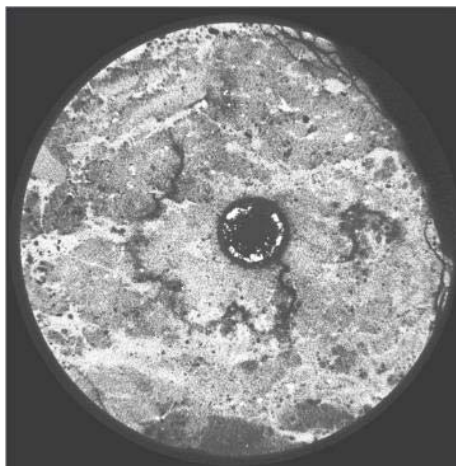


Figura 71 - Análise das imagens para calcular o volume do furo e ZTA.

A Tabela 18 apresenta os resultados do volume da perfuração e o volume da zona termicamente afetada, calculados a partir da análise e processamento digital de imagens com ajuda do programa desenvolvido em Matlab. A energia específica, também mostrada na tabela, foi calculada usando a equação 3 no Capítulo 2.

Tabela 18 - Valores do volume de furo e zona termicamente afetada.

Volume do furo	297,39mm ³
Volume da zona termicamente afetada	130,77mm ³
Energia específica	70,61KJ/cm ³

4.6.

Microtomografias do teste dinâmico com pressão de 6,89 MPa

No teste dinâmico a amostra foi irradiada durante 100 segundos por um feixe de laser que percorreu uma trajetória espiral em sua superfície, submetida à pressão de 6,89 MPa. A figura 72, apresenta a reconstrução da imagem em 3D e um corte frontal da amostra do Bege Bahia, depois da perfuração a laser. Observe que a amostra teve que ser enrolada com uma fita adesiva (listrada na foto) para não desmontar.

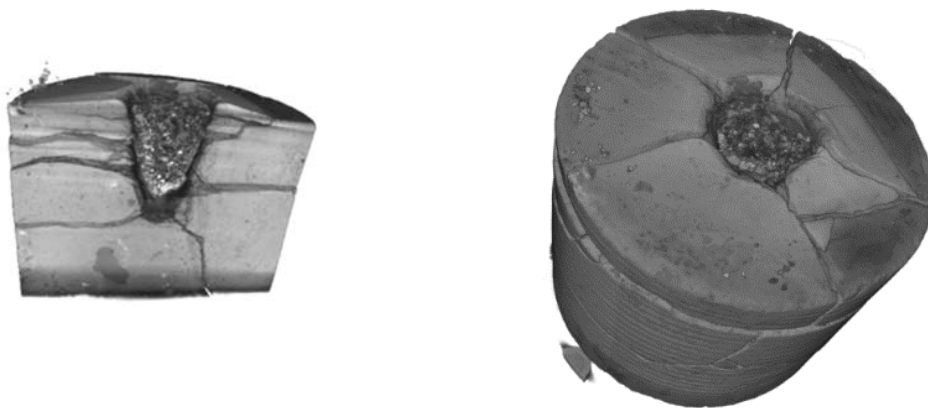


Figura 72 - Imagem em 3D e corte do corpo de prova irradiado por 100s.

Na figura 73 apresenta-se a vista superior do corpo de prova perfurado. Pode-se observar o diâmetro externo da perfuração; uma coroa em volta do furo, chamada como zona termicamente afetada (ZTA); e a medida do diâmetro externo, de 54mm. Esta medida foi tomada como referência, com o objetivo de verificar que as medidas feitas na imagem 3D estão corretas.

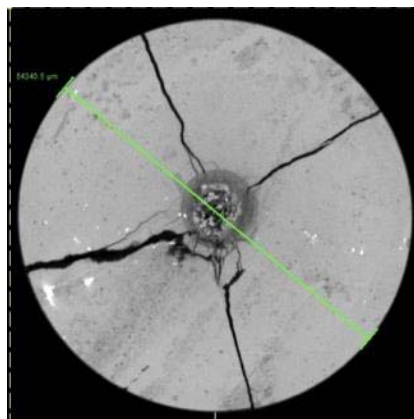


Figura 73 - Vista superior do corpo de prova perfurado.

Na figura 74 apresenta-se um corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se claramente o diâmetro externo da zona termicamente afetada (ZTA) de 15,2mm. Este diâmetro corresponde ao diâmetro médio a ser considerado nas operações normais de canhoneio. Além disso, observa-se que a geometria de perfuração corresponde a um cone com a ponta irregular. Também é observado que a espessura da zona termicamente afetada é maior em

Comparação com o teste estático com pressão e de 10 segundos. Conclui-se que o procedimento dinâmico é mais eficiente que o estático, pois retira um volume maior de rocha e causa dano também fora da zona termicamente afetada.

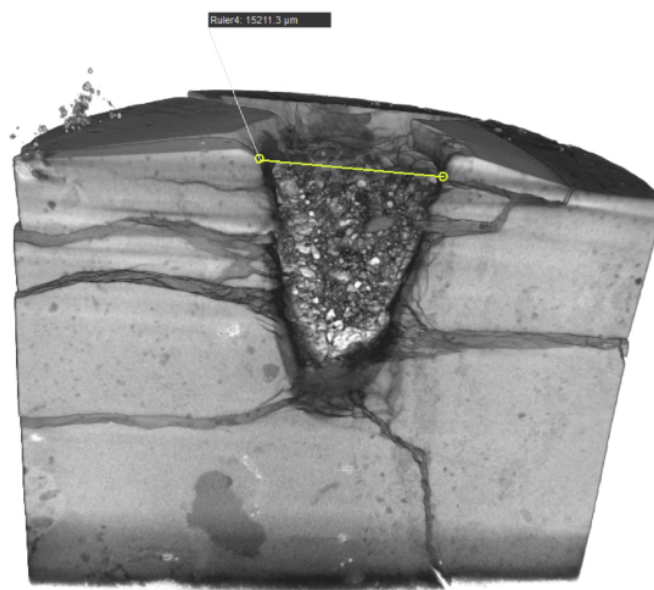


Figura 74 - Geometria da perfuração do corpo de prova de 100s.

Na figura 75 apresenta-se novamente o corte frontal da imagem em 3D do corpo de prova perfurado, observando-se a profundidade da perfuração de 19,2mm, além da geometria cônica da perfuração e a zona termicamente afetada. Também é evidente que existe dano térmico fora da área termicamente afetada.

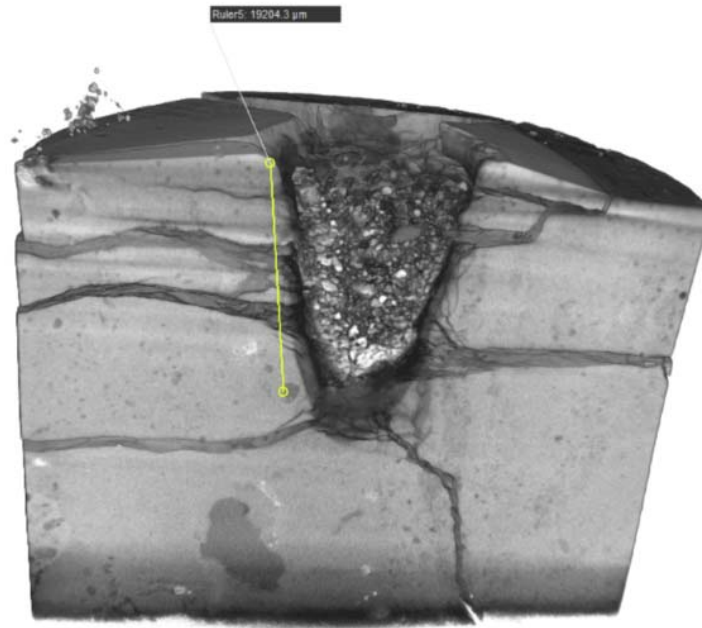


Figura 75 - Profundidade do corpo de prova irradiado por 100s.

A figura 76 mostra o processamento de análise nas imagens da microtomografia para calcular os volumes do furo e da área termicamente afetada.



Figura 76 - Análise das imagens para calcular o volume e ZTA da perfuração.

A Tabela 19 apresenta os resultados do volume da perfuração e o volume da zona termicamente afetada, calculados a partir da análise e processamento digital de imagens com ajuda do programa desenvolvido em Matlab. A energia específica, também mostrada na tabela, foi calculada adaptando o modelo de corte de (Maurer, 1980), tomando a equação 9 e substituindo o comprimento de corte pelo comprimento da trajetória em espiral de 157,89 mm.

Tabela 19 - Valores do volume de furo e de ZTA.

Volume do furo	3848mm ³
Volume da zona termicamente afetada	462,13mm ³
Energia Específica de corte	3.46 KJ/cm ²

4.7.

Resumo dos resultados das microtomografias

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos sob diferentes condições, a tabela 20 mostra o resumo dos resultados experimentais obtidos através das microtomografias para os ensaios estático e dinâmico. Além disso, a figura 77 mostra a Comparação de diversos parâmetros nos testes estáticos com tempo de 10s, com e sem a aplicação da pressão externa de 6,89 MPa.

Tabela 20 - Resumo dos resultados experimentais através da microtomografia.

Condições		Resultados					
Estático	Pressão (MPa)	Volume furo (mm ³)	Volume ZTA (mm ³)	Energia específica (KJ/cm ³)	Diâmetro o furo (mm)	Diâmetro ZTA (mm)	Profundidade de furo (mm)
10s	0	139	36,27	75,5	5,6	6,7	17,44
10s	6,89	132	50,05	79,5	4,6	6	15,7
2s	13,78	57,79	12,67	36,33	4,3	4,9	4,8
5s	13,78	76,01	26,63	69,06	4,1	5,74	13,51
20s	13,78	297,39	130,77	70,61	4,22	6,55	22
Dinâmico	Pressão (MPa)	Volume furo (mm ³)	Volume ZTA (mm ³)	Energia específica de corte (KJ/cm ²)	Diâmetro o furo (mm)	Diâmetro ZTA (mm)	Profundidade de furo (mm)
100s	6,89	3848	462,13	3,46	14,2	15,2	19,2

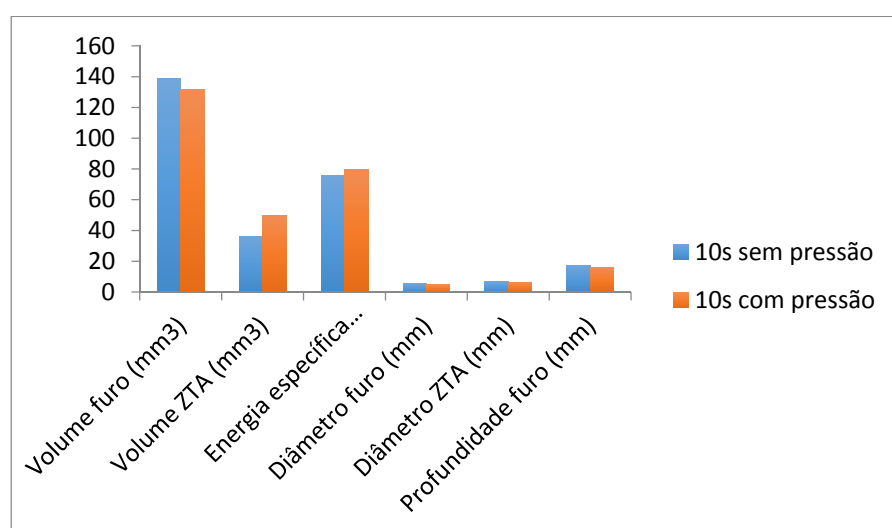


Figura 77 - Parâmetros dos testes estáticos.

Conforme mencionado anteriormente, nos parâmetros de volume do furo, diâmetro do furo, diâmetro da ZTA e profundidade do furo, os valores do teste com pressão externa são menores do que os valores sem pressão, uma vez que a pressão dificulta a saída de material, gerando menores diâmetros e profundidades.

Já para os parâmetros de volume da ZTA e energia específica, os valores no ensaio com pressão são maiores que os sem pressão. Isto se deve a uma quantidade maior de material compactado por causa da pressão e da energia necessária para realizar a perfuração nessas condições.

Em geral se observa que a perfuração sem considerar a pressão externa requer menos energia, porém a condição das rochas nos reservatórios conta com a ação da pressão hidrostática e da pressão de poros.

A Tabela 21 compara os resultados obtidos para o volume removido, a profundidade, o diâmetro do furo e a energia específica pelos métodos da glicerina líquida e da microtomografia para ensaios de 10s sem pressão.

Tabela 21 - Comparação dos resultados obtidos pelos métodos da glicerina e da microtomografia, sem pressão radial.

TESTE ESTÁTICO SEM PRESSÃO					
Tempo (s)	Potência (w)	Volume removido (cm³)	Profundidade (mm)	Diâmetro do furo (mm)	Energia específica (KJ/cm³)
10	1050	Glicerina líquida			
		0,2	18,7	8	52,2
		0,25	19,4	7,6	42
		0,3	16	5,3	35
		Microtomografia			
		0,139	17,44	5,6	75,5

A Tabela 22 compara os resultados obtidos para o volume removido, a profundidade, o diâmetro do furo e a energia específica pelos métodos da glicerina Líquida e da microtomografia para ensaios de 10s com pressão de 6,89 MPa.

Tabela 22 - Compara os resultados obtidos pelos métodos da glicerina e da microtomografia com pressão radial.

TESTE ESTÁTICO COM PRESSÃO RADIAL 6,89 MPa					
Tempo (s)	Potência (w)	Volume removido (cm³)	Profundidade (mm)	Diâmetro do furo (mm)	Energia específica (KJ/cm³)
10	1050	Glicerina líquida			
		0,15	14	5,7	70
		0,1	14,4	6,8	105
		0,175	16	4,6	60
		Microtomografia			
		0,132	15,71	4,3	79,5

Acreditamos que os resultados obtidos pelo processamento digital das imagens de microtomografia sejam resultados mais próximos dos valores reais. Por este motivo, recomendamos que este procedimento seja utilizado sempre que possível, de acordo com a necessidade.

4.8. Resultados da Modelagem Numérica do Teste Estático

4.8.1. Teste estático 2 segundos sem pressão radial

Nesta sessão são discutidos os resultados da modelagem numérica realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS para o teste estático com irradiação durante 2s sem pressão radial.

O perfil de temperatura obtido com a modelagem numérica para o teste estático de 2s é mostrado na fig. 78, onde se destaca a região que passou da temperatura de 1150K. De acordo com a literatura, nessa região o material encontra-se em estado fundido e as tensões nessa região são iguais a zero. Ao se afastar do

ponto de aplicação da fonte de calor, a temperatura reduz, chegando até a temperatura ambiente.

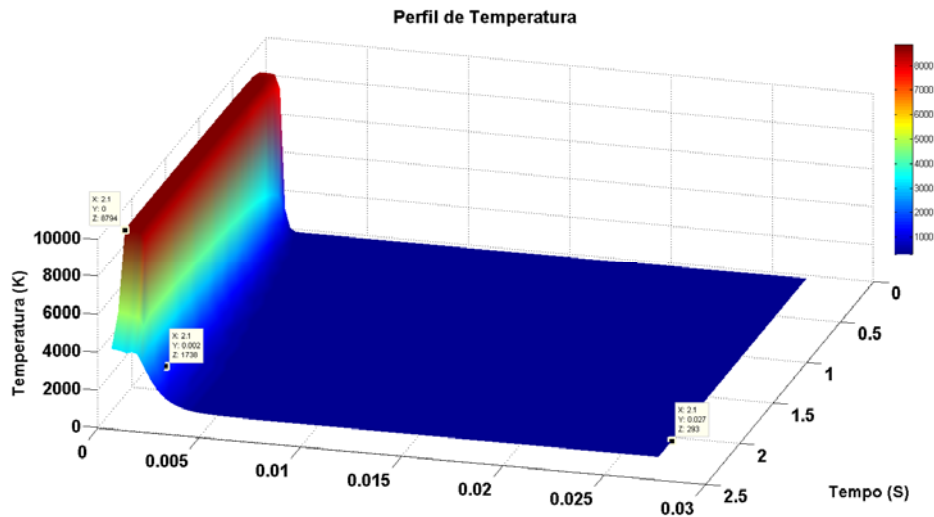


Figura 78 - Perfil de temperatura para um tempo irradiado de 2s.

A distribuição de temperaturas ao longo da peça no instante de 2s (Figura 79) mostra que a região em cinza, próxima da fonte de calor, possui temperaturas acima da temperatura de fusão e evaporação. Em seguida aparece a zona termicamente afetada, onde o material possui propriedades específicas, e então o restante da peça já está em estado sólido.



Figura 79 - Distribuição de temperatura no instante 2s.

O resultado da tensão radial (figura 80) mostra três regiões distintas: a região que não possui material sólido por efeito da temperatura, a zona termicamente afetada, e a região sólida do corpo de prova. No instante da conclusão da aplicação da carga térmica (2s), observa-se na região sólida tensões compressivas (aproximadamente 60 MPa), chegando a zero no diâmetro externo.

Neste resultado, a falta de tensões de tração indica que esta não é a componente principal para a propagação de trincas, uma vez que não há tensões de tração relevante nesse componente de tensão.

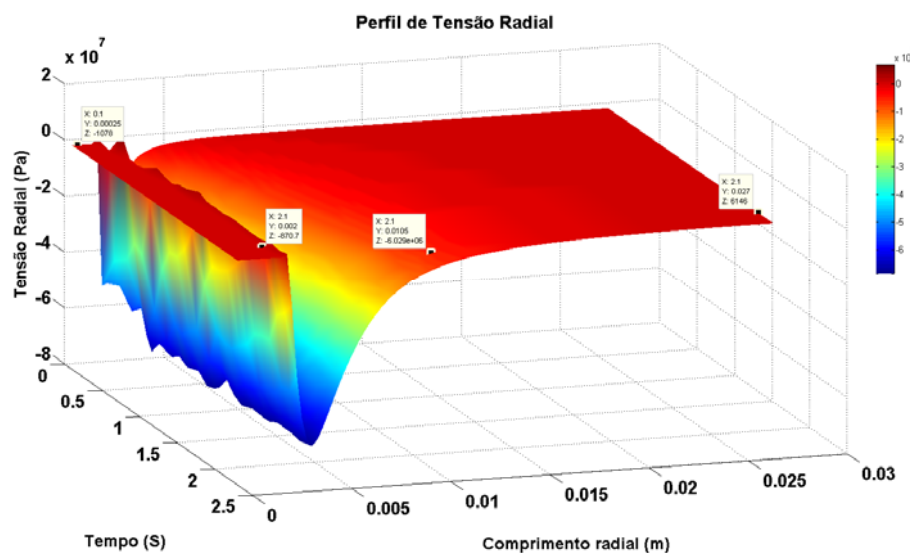


Figura 80 - Perfil da tensão radial para a perfuração de 2s.

O resultado das tensões radiais no instante de 2s, apresentado na figura 81, indica que a fonte de calor influencia as tensões prioritariamente na direção radial,

em Comparação com a direção axial. Na maior parte da peça o valor da tensão radial se mantém constante.

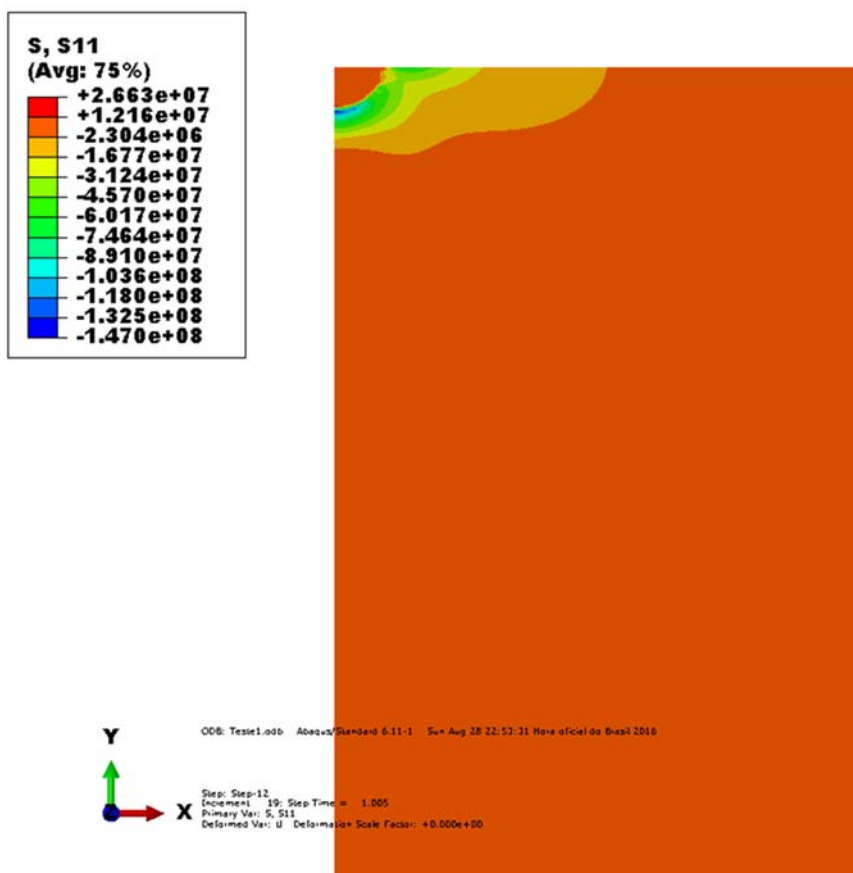


Figura 81 - Distribuição da tensão radial no instante de 2s.

O gráfico bidimensional da tensão radial em função da temperatura é apresentado na figura. 82, e mostra nas três regiões o comportamento da tensão na superfície superior do componente, ou seja: tensão zero onde não há material, uma região de tensões muito compressivas na ZTA, e tensões compressivas menores até chegar a zero no diâmetro externo da peça.

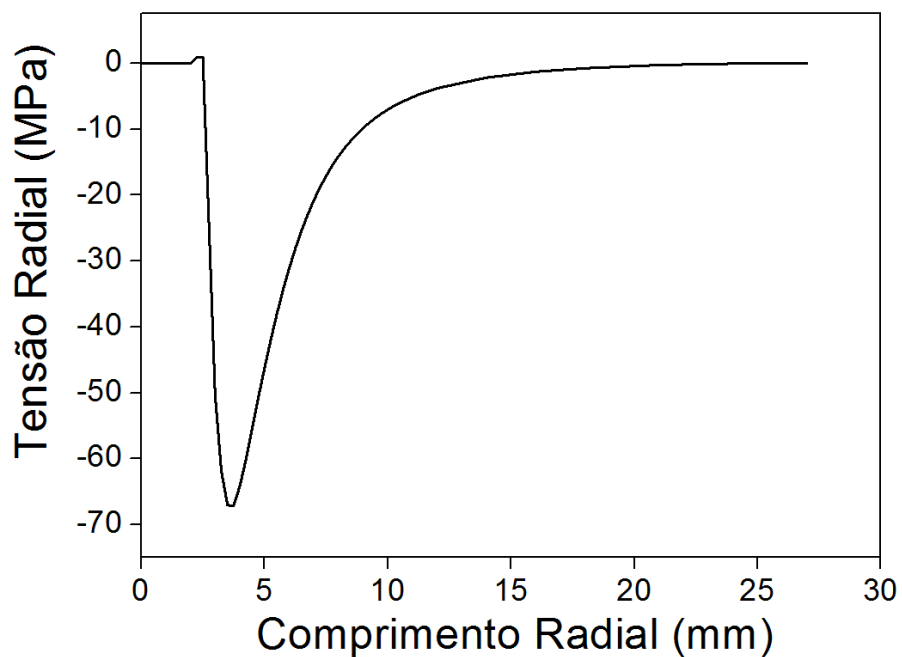


Figura 82 - Gráfico bidimensional da tensão radial em função da temperatura.

O resultado das temperaturas em relação à tensão circunferencial indica que na região sólida do modelo existem tensões de tração máximas de 10,79 MPa, apresentadas na figura 83. Esse tipo de tensão é responsável pela abertura de trincas radiais, que são iniciadas em função do valor da tensão e da heterogeneidade do modelo físico. Pode-se observar que na ZTA os valores de tensão compressivas aumentam em função do tempo.

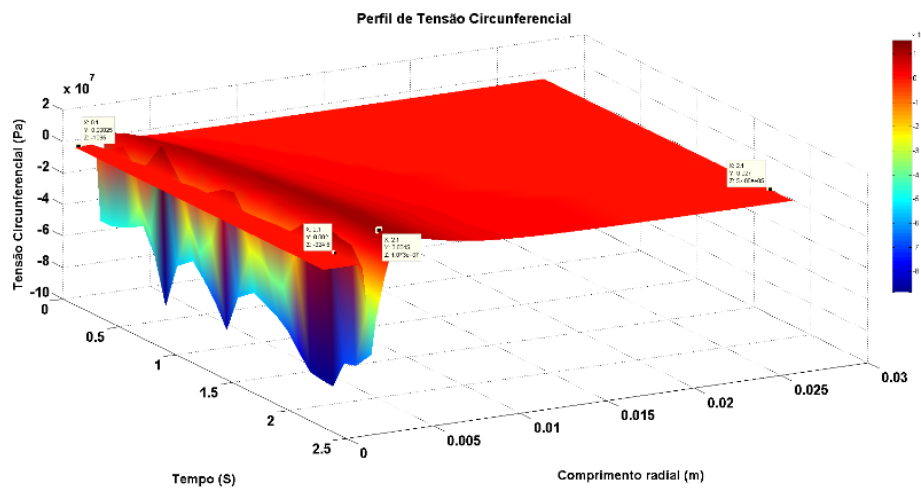


Figura 83 - Perfil da tensão circunferencial na perfuração de 2s.

Observa-se que no instante de 2s, a região sólida da peça encontra-se sob tensões circunferenciais de tração, sendo o local preferencial para a abertura de trinca próximo à ZTA propagando no sentido da face externa do corpo de prova.

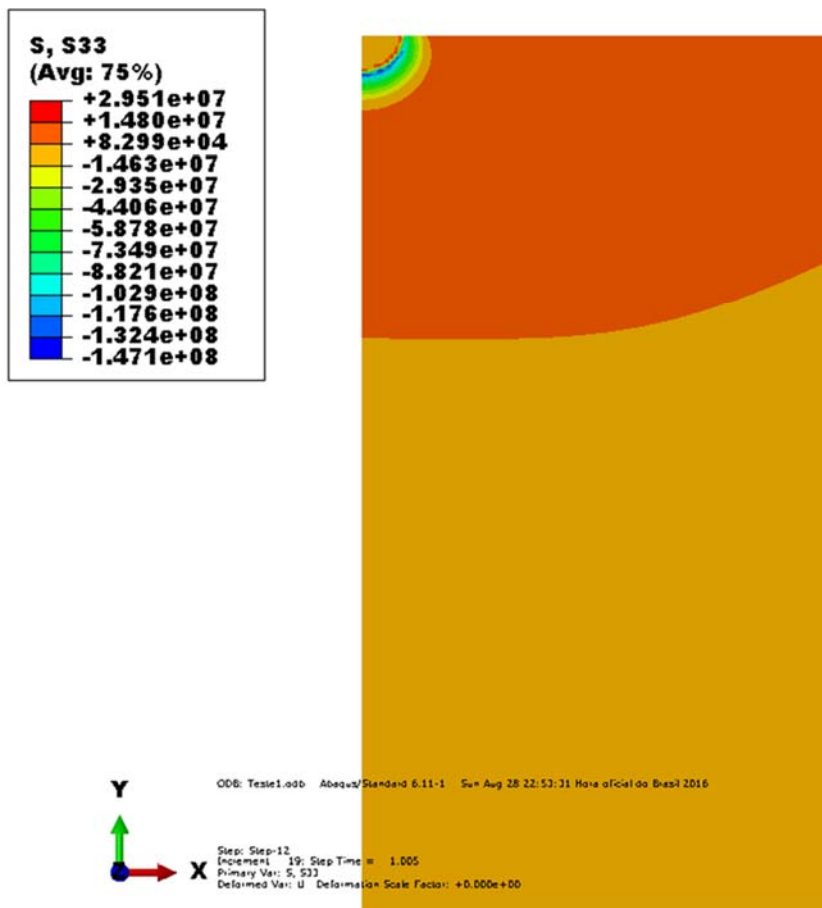


Figura 84 - Distribuição da tensão circunferencial da perfuração de 2s.

A figura 85 mostra a tensão circunferencial no instante de interesse nos nós da superfície superior. Fica evidente a região de tensões circunferenciais de tração e a redução dessas tensões ao se aproximar da face externa.

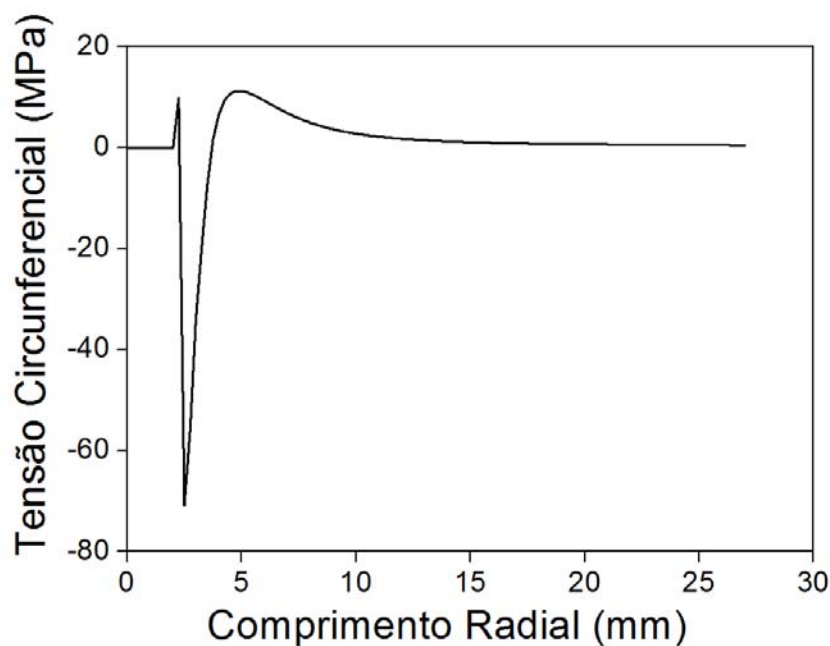


Figura 85 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial em função da temperatura.

4.8.2.

Teste estático 2 segundos com pressão radial

Nesta sessão são discutidos os resultados da modelagem numérica realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS para o teste estático com irradiação durante 2s com pressão radial.

A distribuição de temperatura no modelo com aplicação da carga térmica durante 2s e aplicação da pressão externa de 6,85MPa é apresentada na figura 86. A exemplo da condição de ensaio anterior, ocorre a redução gradual da temperatura em função do afastamento da fonte de calor.

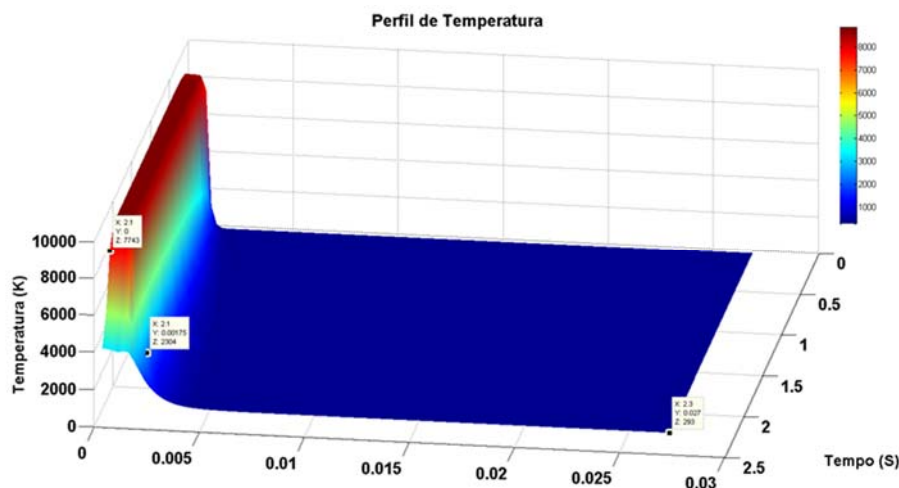


Figura 86 - Perfil de temperatura para a perfuração de 2s com pressão radial.

A figura 87 mostra a distribuição das temperaturas no instante de interesse, mostrando a região fundida (cinza), a ZTA (verde) e a parte sólida (azul) da peça.

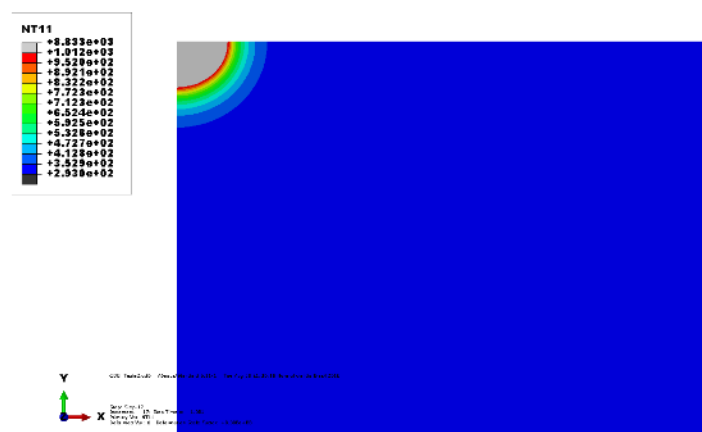


Figura 87 - Distribuição de temperatura no instante de 2s da perfuração com pressão radial.

O resultado das tensões radiais (figura 88) mostra como se comporta a componente de tensão radial ao longo da superfície superior nos diferentes instantes. Assim como no caso em que não foi aplicada a pressão radial, observa-se nitidamente o comportamento da ZTA com valores altamente compressivos, sendo o pico de compressão maior que no caso anterior. A região sólida sofreu valores

menores de compressão, com a tensão diminuindo, até que na face externa a tensão seja igual à pressão externa.

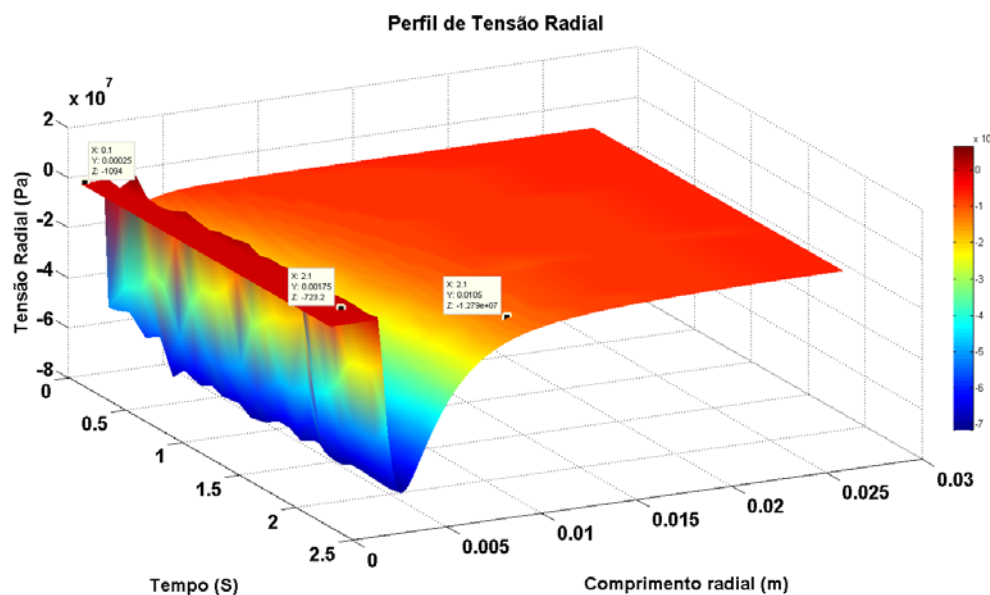


Figura 88 - Perfil da tensão radial da perfuração de 2s com pressão radial.

A figura 89 apresenta a distribuição da tensão radial em toda a peça no instante de 2s. Pode-se observar que o comportamento das tensões é sempre compressivo e tende a se tornar uniforme ao se afastar da fonte de calor.

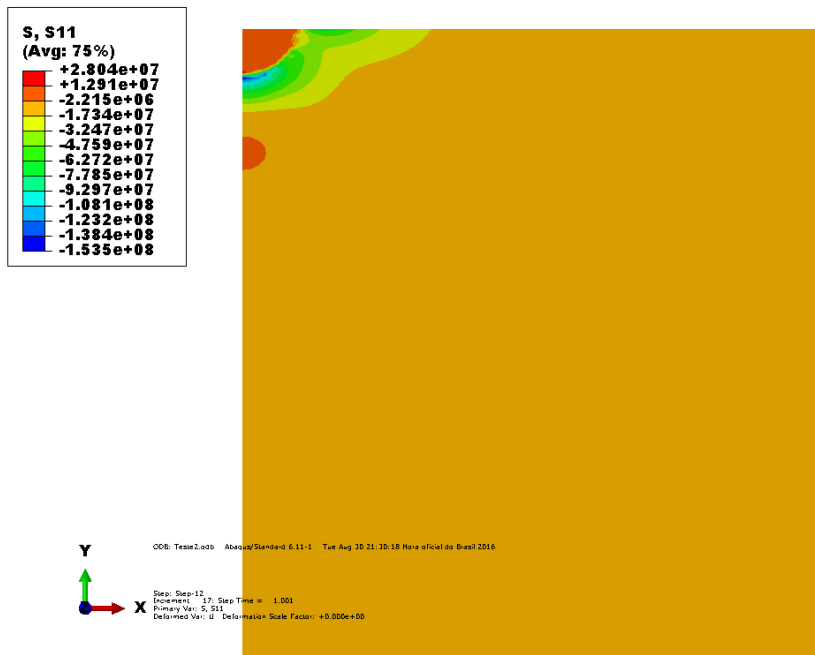


Figura 89 - Distribuição da tensão radial no instante de 2s, com pressão radial.

O gráfico da tensão radial ao longo da superfície superior no instante de 2s (figura 90) mostra que, depois do pico compressivo, as tensões diminuem, chegando a se igualar ao valor da pressão externa.

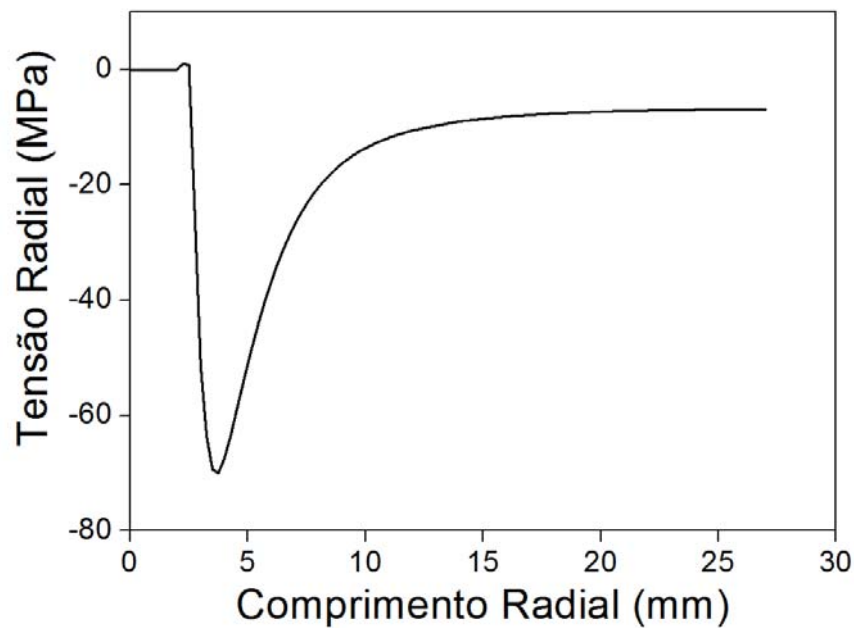


Figura 90 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante de 2s.

O resultado da tensão circunferencial (figura 91) indica que na região sólida do modelo existem tensões de tração menores que no modelo sem a pressão externa, porém ainda positivas.

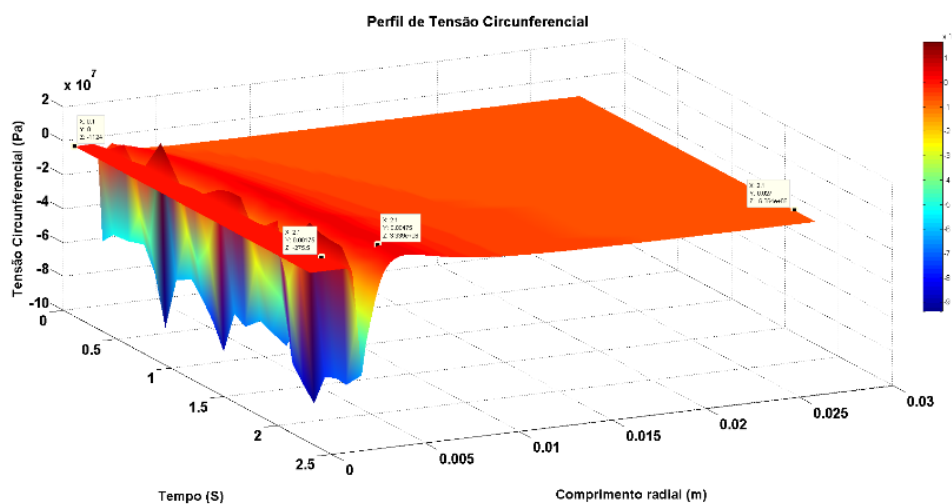


Figura 91 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 2s com pressão radial.

Observa-se que no instante de 2s, a região sólida da peça encontra-se em uma condição de tensões de tração, sendo o local preferencial para a abertura de trinca próximo à ZTA.

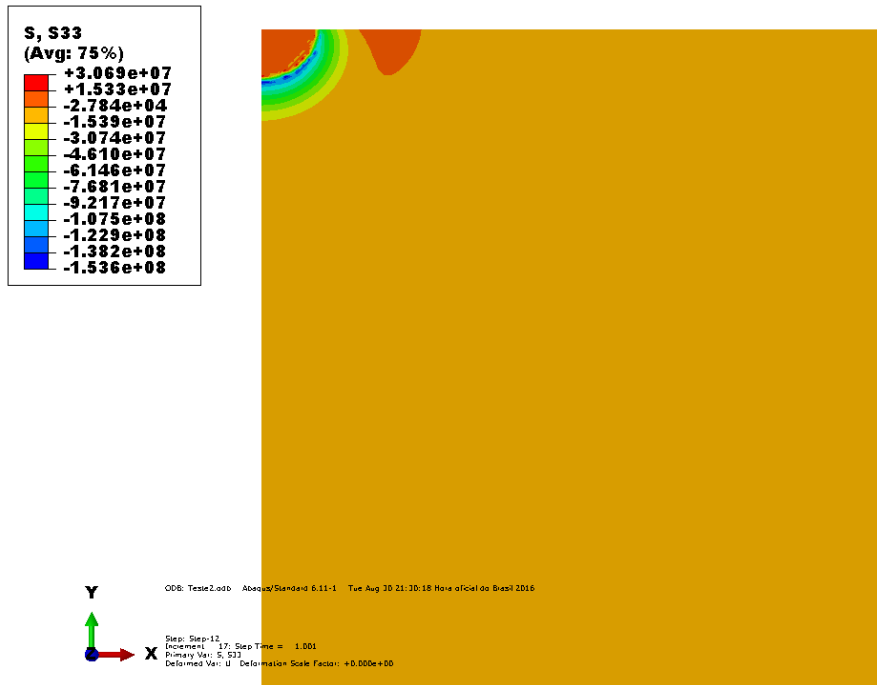


Figura 92 - Distribuição da tensão circunferencial no instante 2s com pressão radial.

Na figura 93 é possível observar a influência da pressão externa na componente circunferencial. Essa influência acontece em função do efeito de Poisson, ocasionando a redução da componente de tração para um valor máximo de 3,33MPa.

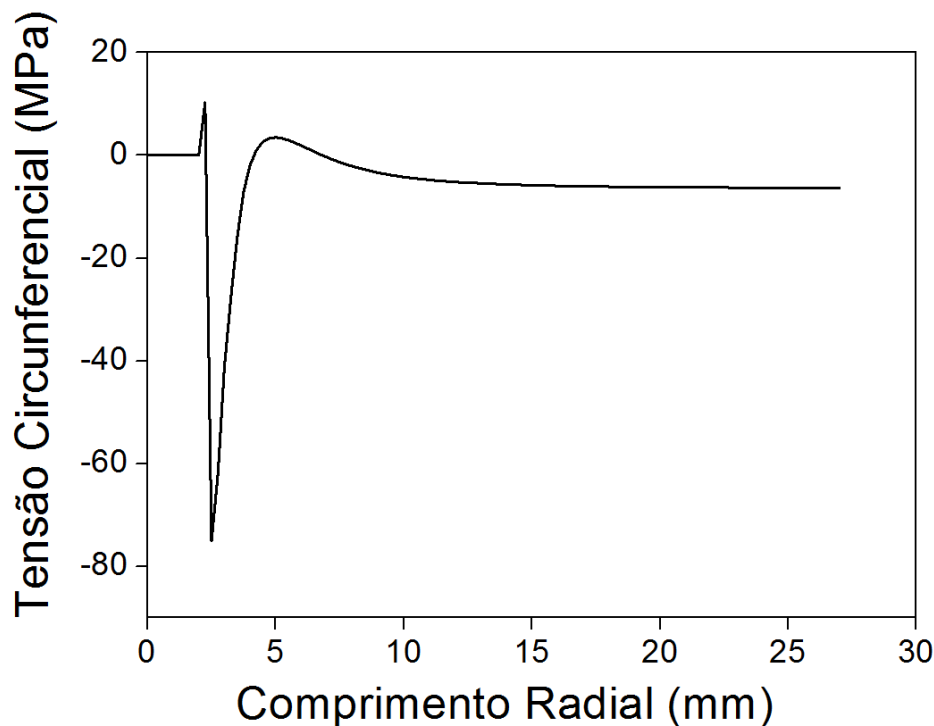


Figura 93 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial no instante de 2s com pressão radial.

4.8.3.

Teste estático 10 segundos sem pressão radial

Nesta sessão são discutidos os resultados da modelagem numérica realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS para o teste estático com irradiação durante 10s sem pressão radial.

O perfil de temperatura para o teste estático de 10s é mostrado na figura 94, onde se destaca a região que passou da temperatura de 1150K. Observe um aumento desta região em Comparação ao teste anterior de 2s sem pressão. Nessa região, o material se encontra em estado fundido e as tensões nessa região são próximas de zero. Ao se afastar do ponto de aplicação da fonte de calor, a temperatura reduz, chegando até a temperatura ambiente.

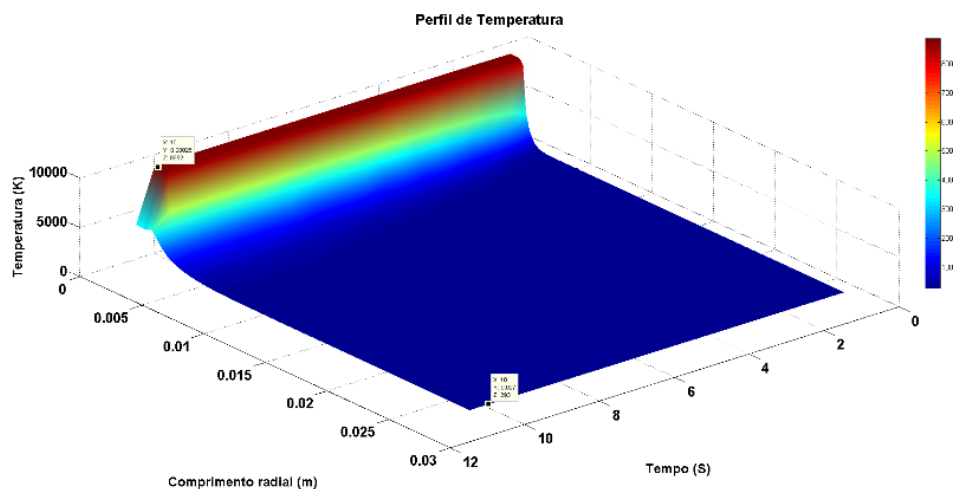


Figura 94 - Perfil de temperatura da perfuração de 10s sem pressão.

A distribuição de temperaturas ao longo da peça (figura 95) no instante de 10s mostra que a região em cinza, próxima da fonte de calor, possui temperaturas acima da temperatura de fusão e evaporação. A zona termicamente afetada é mostrada em verde, e é onde o material possui propriedades específicas. O restante da peça (em estado sólido) é mostrado em azul.

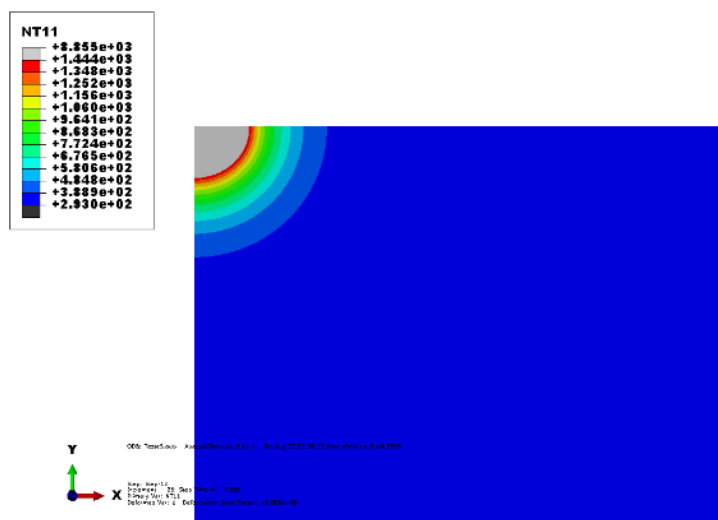


Figura 95 - Distribuição da temperatura no instante de 10s sem pressão.

O resultado da tensão radial (figura 96) mostra três regiões distintas: a região que não possui material sólido por efeito das temperaturas atingidas acima da temperatura de evaporação; a zona termicamente afetada; e a região sólida do corpo

de prova. No instante de 10s, observa-se na região sólida tensões compressivas (aproximadamente 70 MPa), chegando a zero no diâmetro externo.

Neste resultado a falta de tensões de tração indica que esta não será a componente principal para a propagação de trincas, uma vez que não há tensões de tração relevantes nesse componente de tensão.

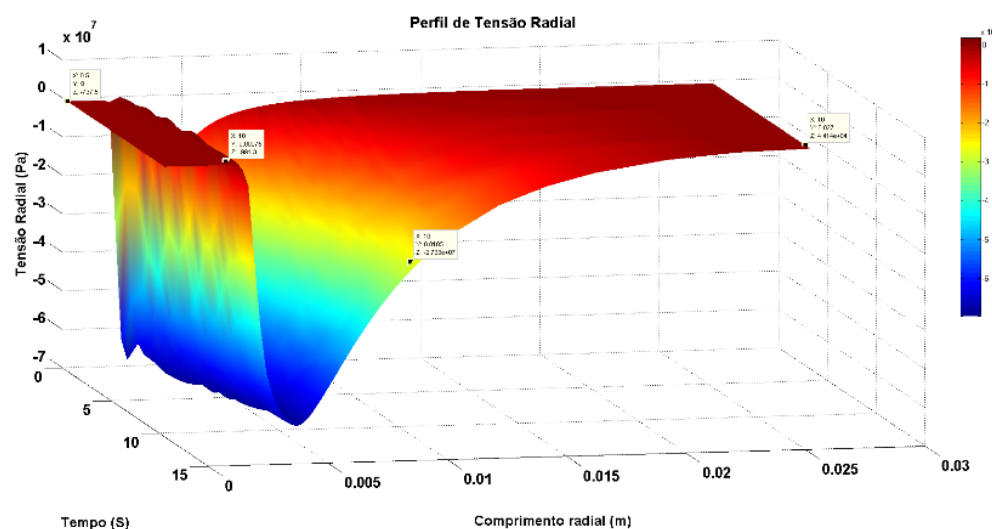


Figura 96 - Perfil da tensão radial na perfuração de 10s sem pressão.

O resultado das tensões radiais no instante de 10s (figura97) indica que a fonte de calor influencia as tensões na direção axial da peça menos que na direção radial.

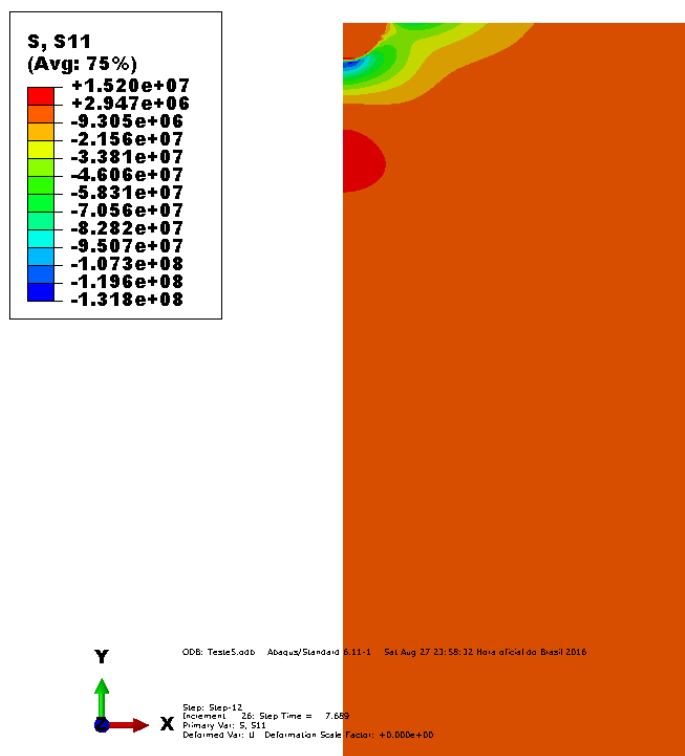


Figura 97 - Distribuição da tensão radial no instante de 10s sem pressão radial.

O gráfico bidimensional da tensão radial em função do raio na face superior é apresentado na figura 98, e mostra novamente as três regiões de destaque encontradas no teste de 2 segundos. Observe que a região onde não há material (tensão zero) para 10s sem pressão é maior que no caso de 2s sem pressão. Além disso, a região de tensões muito compressivas para o teste de 10s apresenta uma ZTA maior. As tensões compressivas no diâmetro externo da peça convergem para zero.

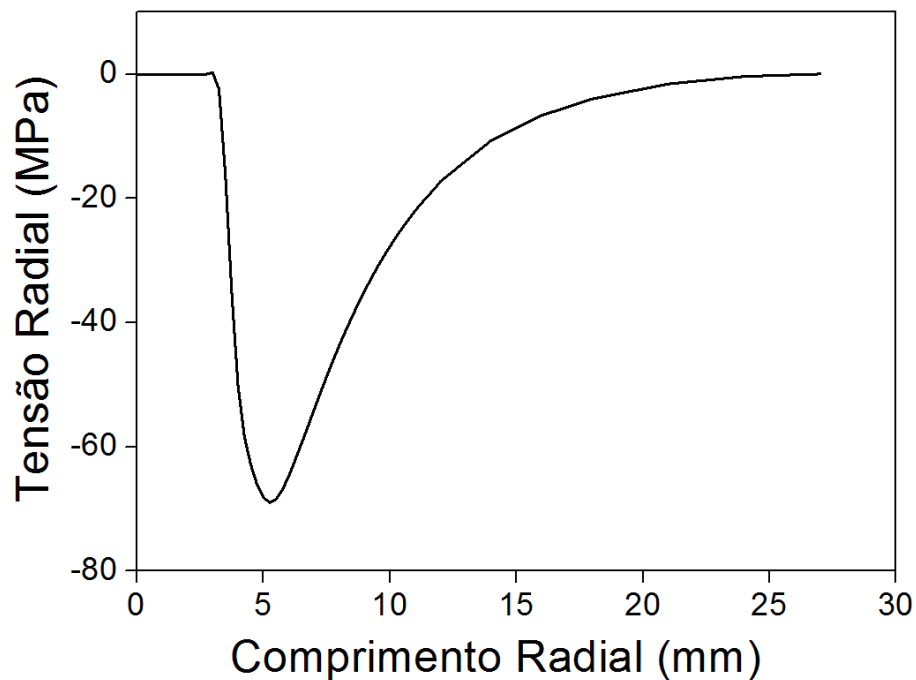


Figura 98 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante 10s sem pressão.

O resultado das temperaturas (figura 99) em relação à tensão circunferencial indica que na região sólida do modelo existem tensões de tração máximas de 12,73 MPa. Esse tipo de tensão é responsável pela abertura de trincas radiais, que vão iniciar em função do valor da tensão e de quanto o modelo físico é heterogêneo. Pode-se observar que na ZTA os valores de tensão compressivas aumentam em função do tempo.

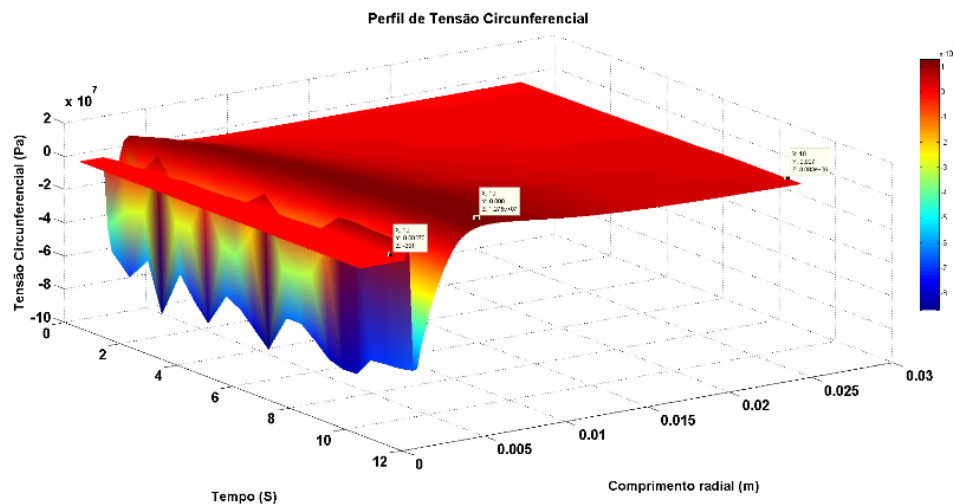


Figura 99 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 10s sem pressão.

Observa-se que, no instante de 10s, a região sólida da peça encontra-se sob tensões circunferenciais de tração (figura 100), sendo que o local preferencial para a abertura de trinca é próximo à ZTA, propagando no sentido da face externa do corpo de prova.

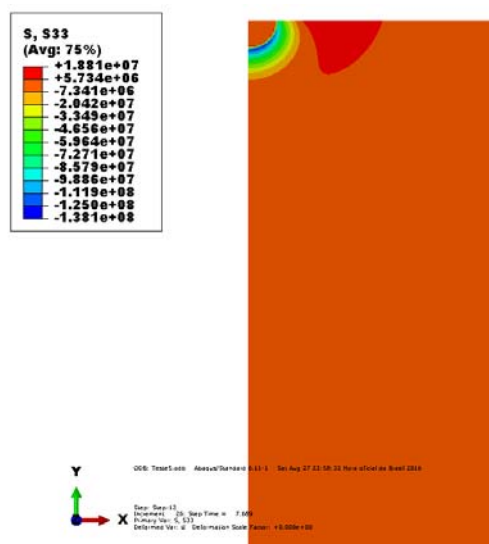


Figura 100 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 10s sem pressão.

A figura 101 mostra a tensão circunferencial no instante de 10s. Os nós da superfície superior representam regiões de tensões circunferenciais de tração maior,

em Comparação ao teste de 2s sem pressão radial, e a redução dessas tensões ao se aproximar da face externa.

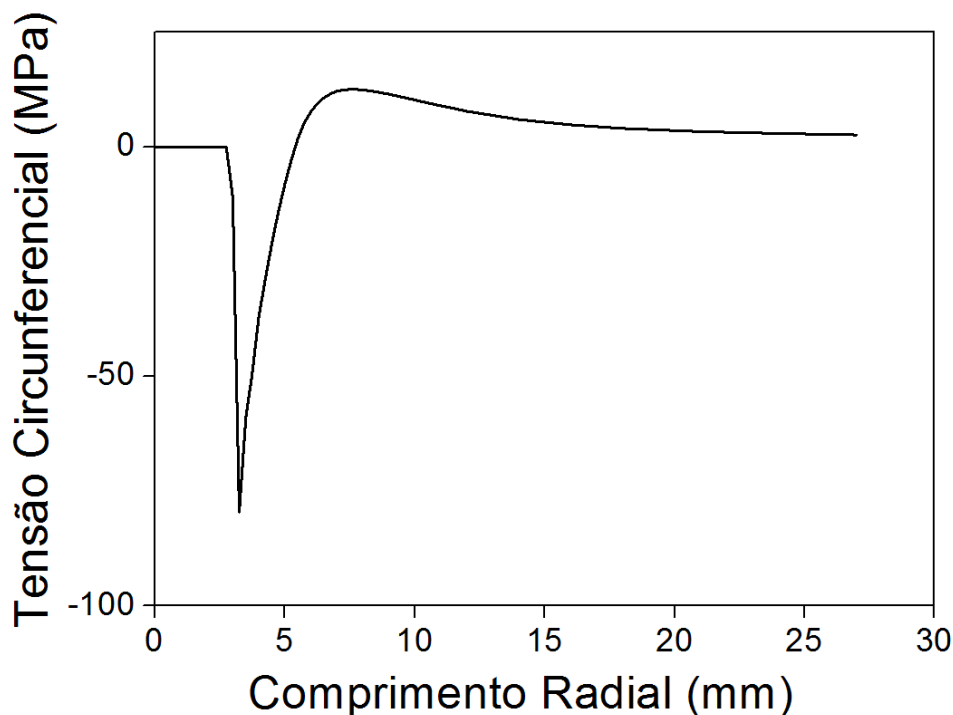


Figura 101 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial no instante de 10s sem pressão.

4.8.4.

Teste estático 10 segundos com pressão radial

Nesta sessão são discutidos os resultados da modelagem numérica realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS para o teste estático com irradiação durante 10s e com pressão radial.

O resultado da distribuição de temperatura no modelo com aplicação da carga térmica durante 10s e aplicação da pressão externa de 6,85MPa é apresentado na figura 102. A exemplo da condição de ensaio anterior de 10s sem pressão radial externa, ocorre a redução gradual da temperatura em função do afastamento da fonte de calor.

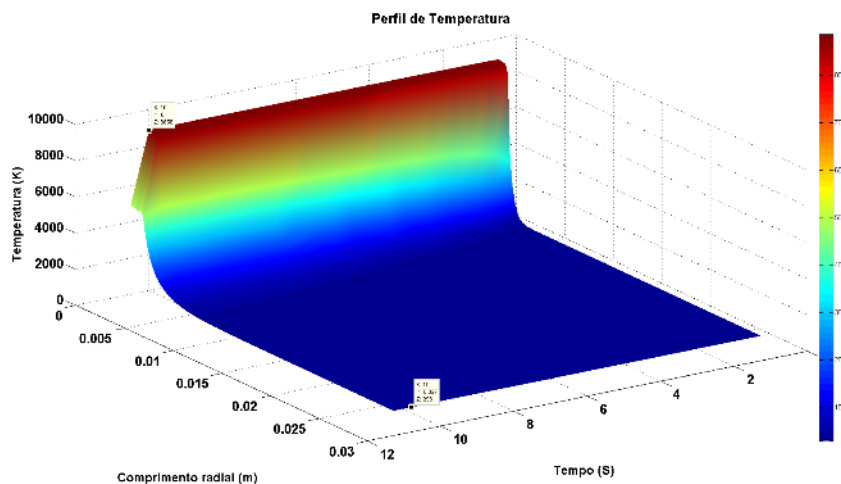


Figura 102 - Perfil de temperatura da perfuração 10s com pressão.

A figura 103 mostra a distribuição das temperaturas no instante de interesse, mostrando a região fundida (em cinza), a ZTA (em verde) e a parte sólida da peça (em azul).

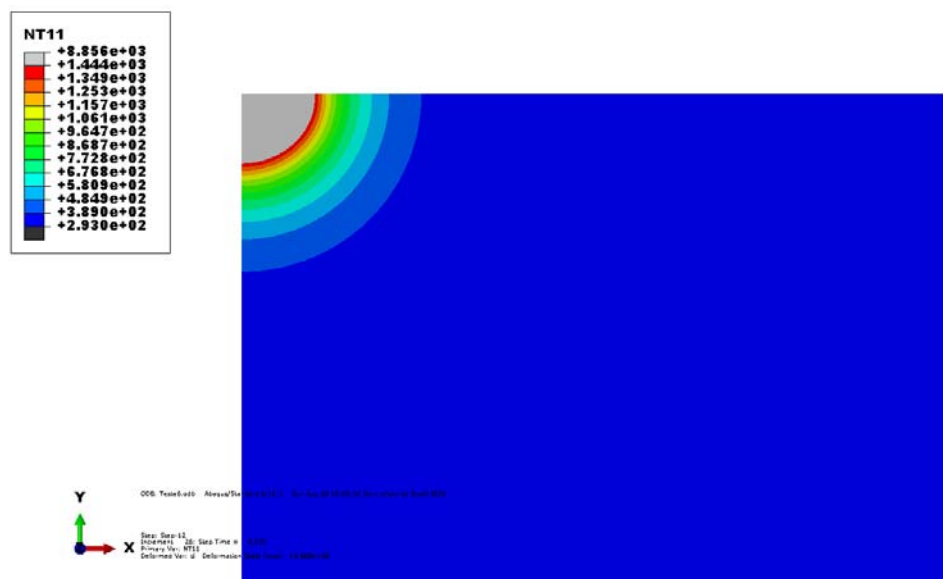


Figura 103 - Distribuição de temperatura no instante de 10s com pressão.

O resultado das tensões radiais (figura 104) mostra como se comporta esta componente de tensão ao longo da superfície superior nos diferentes instantes. Assim como no caso em que não foi aplicada a pressão radial, observa-se nitidamente o comportamento da ZTA com valores altamente compressivos, sendo

o pico de compressão maior que no caso anterior (10 segundos sem pressão). A região sólida apresenta valores menores de compressão, porém, desta vez a tensão diminui até que na face externa a tensão seja igual à pressão externa.

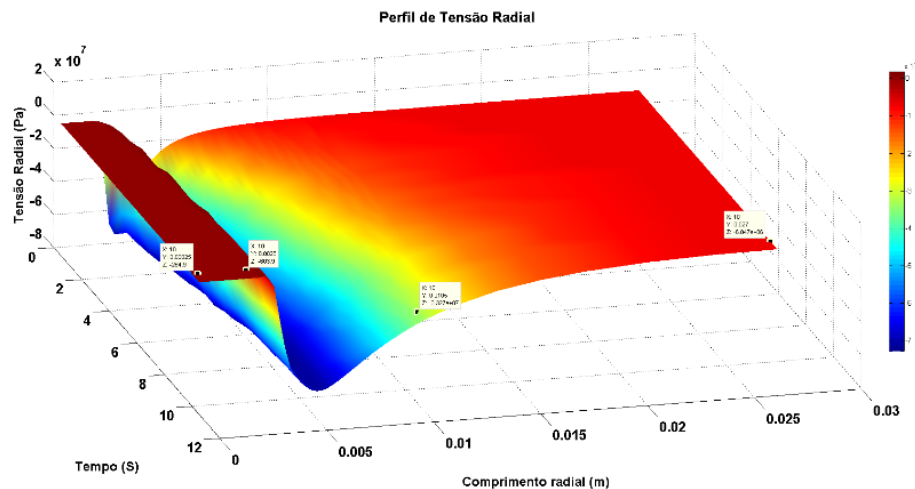


Figura 104 - Perfil da tensão radial da perfuração de 10s com pressão.

A figura 105 apresenta, no instante de 10s, a distribuição da tensão radial em toda a peça. Pode-se observar que o comportamento das tensões é sempre compressivo e tende a se tornar uniforme ao se afastar da fonte de calor.

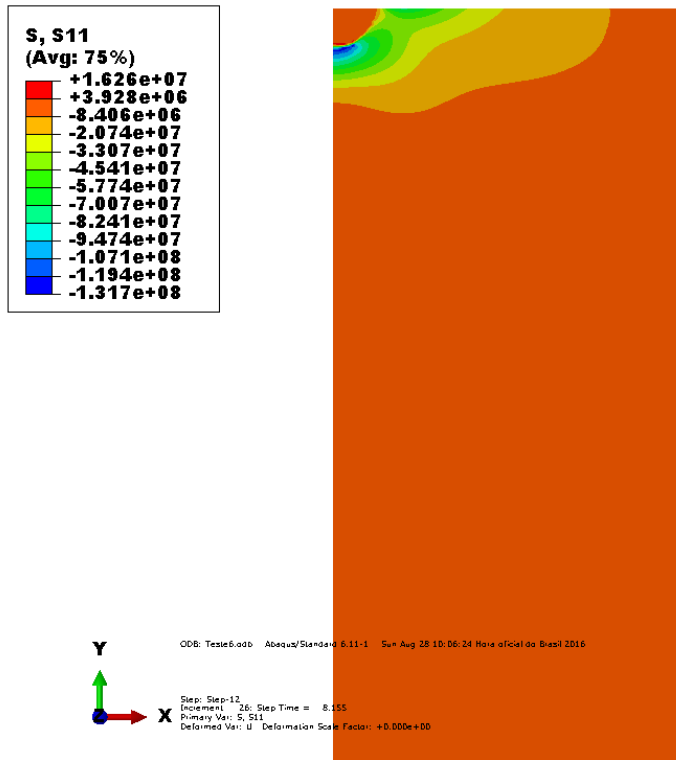


Figura 105 - Distribuição da tensão radial no instante de 10s com pressão radial.

O gráfico da tensão radial ao longo da superfície superior no instante de 10s (figura 106) mostra que, depois do pico compressivo, as tensões diminuem, chegando a se igualar ao valor da pressão externa.

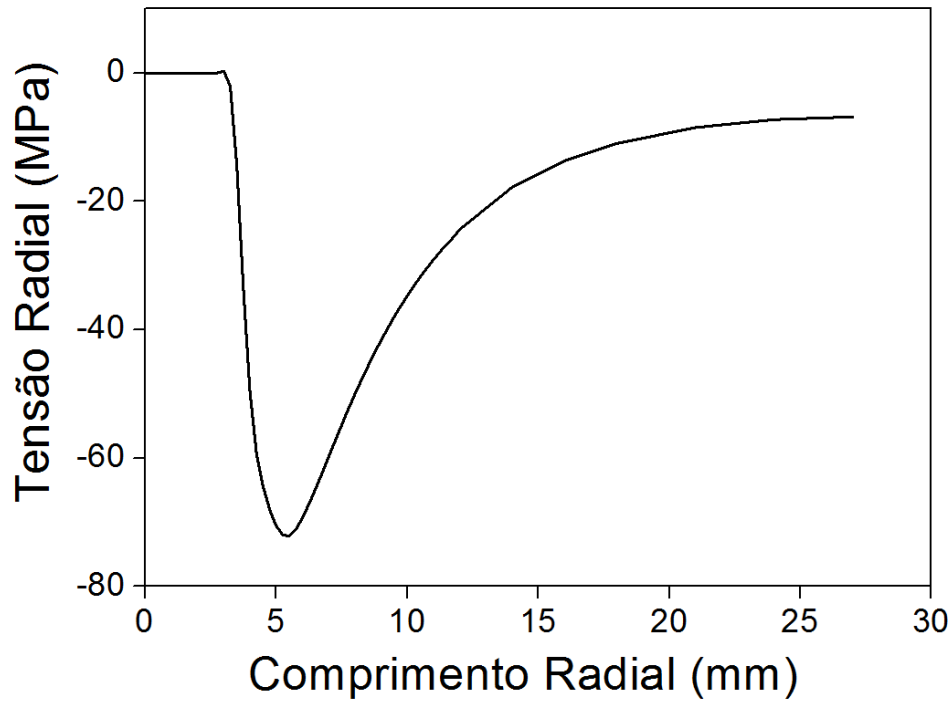


Figura 106 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante 10s com pressão.

O resultado da tensão circunferencial (figura 107) indica que na região sólida do modelo existem tensões de tração menores que no modelo sem a pressão externa, porém ainda positivas.

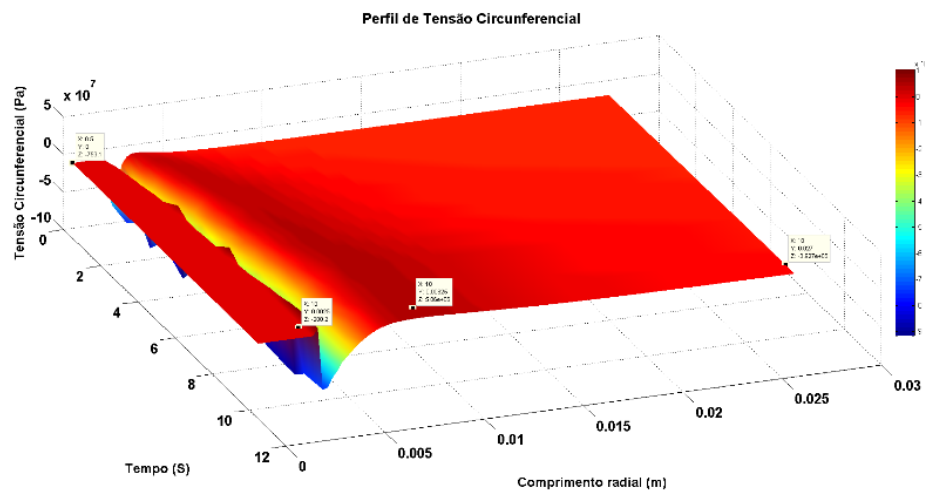


Figura 107 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 10s com pressão.

Observa-se que, no instante de 10s, a região sólida da peça encontra-se em uma condição de tensões circunferenciais de tração (figura 108), sendo o local preferencial para a abertura de trinca próximo à ZTA.

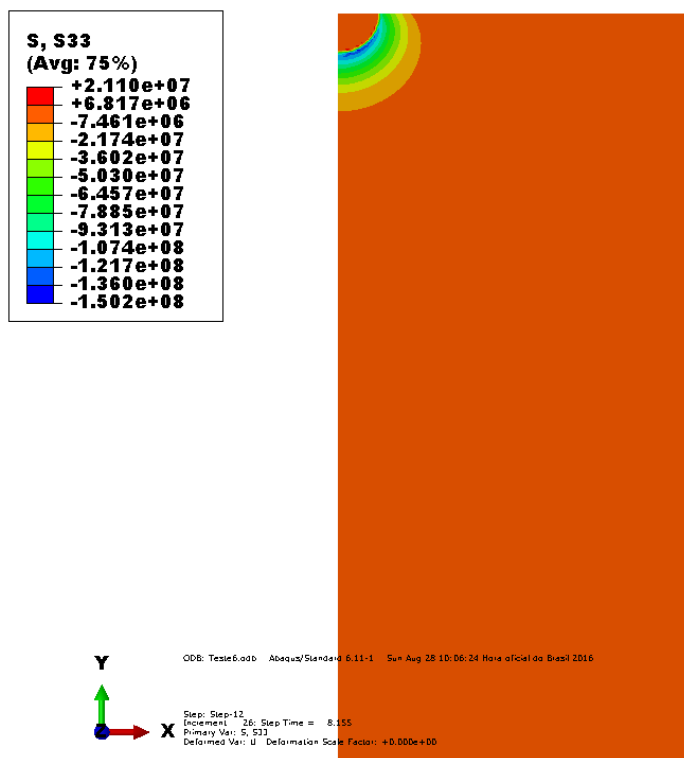


Figura 108 - Distribuição da tensão circunferencial no instante 10s com pressão.

Na figura 109 é possível observar a influência da pressão externa na componente circunferencial. Essa influência acontece em função do efeito de Poisson, ocasionando a redução da componente de tração para um valor máximo de 5,06MPa.

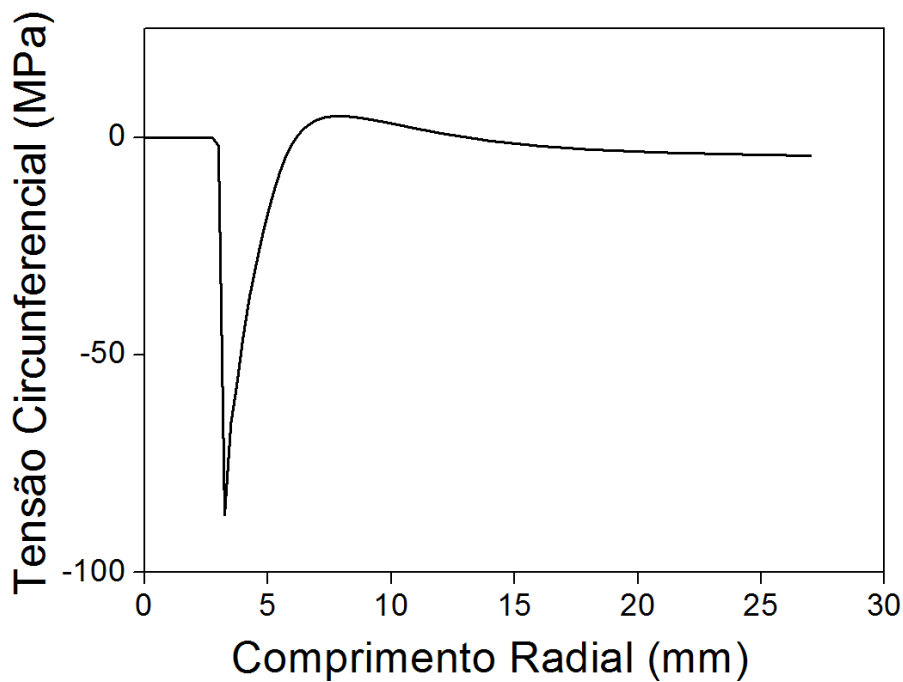


Figura 109 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial no instante 10s com pressão.

4.8.5.

Teste estático 20 segundos sem pressão radial

Nesta sessão são discutidos os resultados da modelagem numérica realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS para o teste estático com irradiação durante 20s sem pressão radial.

O perfil de temperatura é mostrado na figura 110, onde está destacada a região que passou da temperatura de 1150K. Esta região é maior que a obtida nos testes anteriores (2s e 10s) sem pressão. Nessa região, o material se encontra em estado fundido, e as tensões nessa região são aproximadamente zero. Ao se afastar do ponto de aplicação da fonte de calor, a temperatura reduz, chegando até a temperatura ambiente.

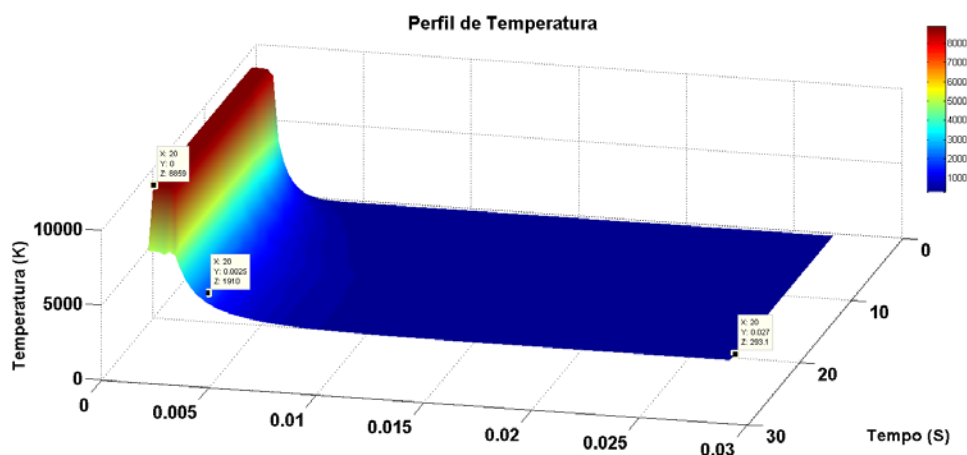


Figura 110 - Perfil de temperatura da perfuração de 20s sem pressão.

A distribuição de temperaturas ao longo da peça no instante de 20s (figura 111) mostra que a região em cinza, irradiada pela fonte de calor (laser), possui temperaturas acima da temperatura de fusão e evaporação. A zona termicamente afetada (em verde) é onde o material possui propriedades específicas, e o restante da peça, em estado sólido, está em azul.

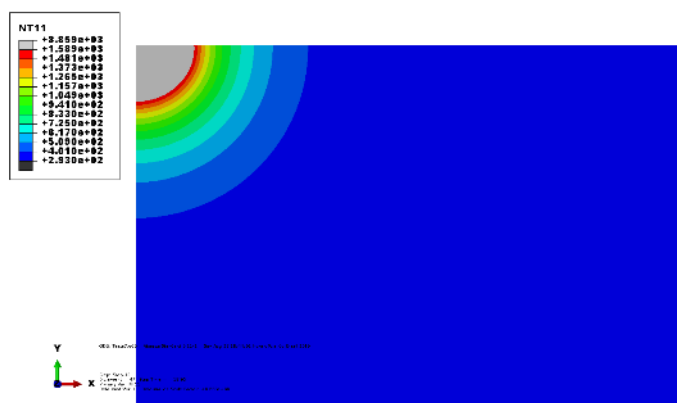


Figura 111 - Distribuição da temperatura no instante de 20s sem pressão.

O resultado da tensão radial (figura 112) apresenta de novo as três regiões distintas: a região que não possui material sólido por efeito das altas temperatura, a zona termicamente afetada e a região sólida do corpo de prova. No instante de 20s, observa-se na região sólida tensões compressivas (aproximadamente 70 MPa), chegando a zero no diâmetro externo. Neste resultado a falta de tensões de tração

indica que esta não será a componente principal para a propagação de trincas, uma vez que não há tensões de tração relevantes nesta componente de tensão.

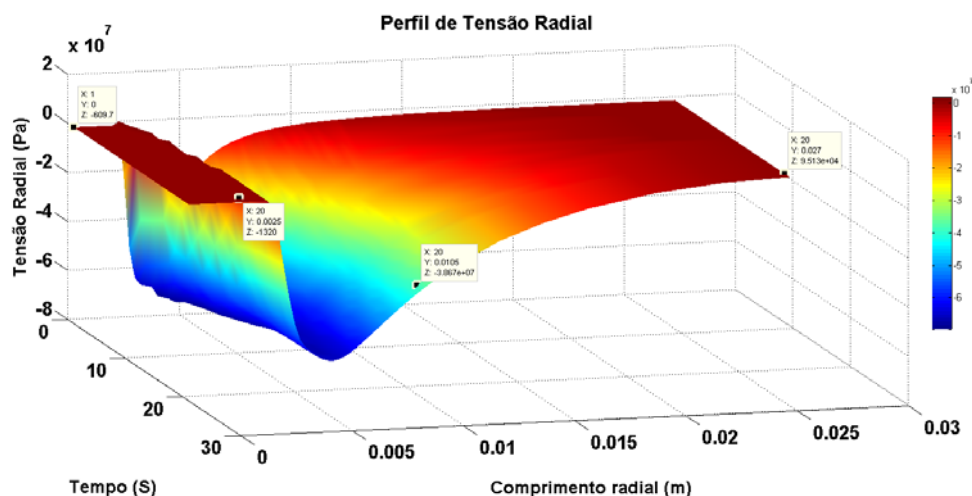


Figura 112 - Perfil da tensão radial na perfuração de 20s sem pressão.

O resultado das tensões radiais no instante de 20s (figura 113) indica que a fonte de calor influencia as tensões no comprimento maior em Comparação aos testes anteriores de 2 e 10 segundos, como consequência do maior tempo de exposição.

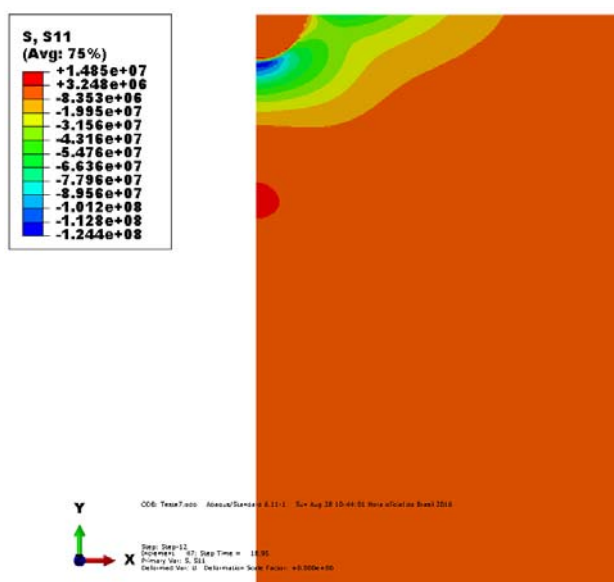


Figura 113 - Distribuição da tensão radial da perfuração de 20s sem pressão.

O gráfico bidimensional da tensão radial em função da temperatura é apresentado na figura 114 e mostra novamente as três regiões de destaque encontradas no teste de 2 e 10 segundos sem pressão externa radial. A região de tensão zero, onde não há material, é maior em Comparação aos testes de 2s e 10s. A região de tensões muito compressivas na ZTA também é maior que a dos testes de 2s e 10s, e possui tensões compressivas até chegar a zero no diâmetro externo da peça.

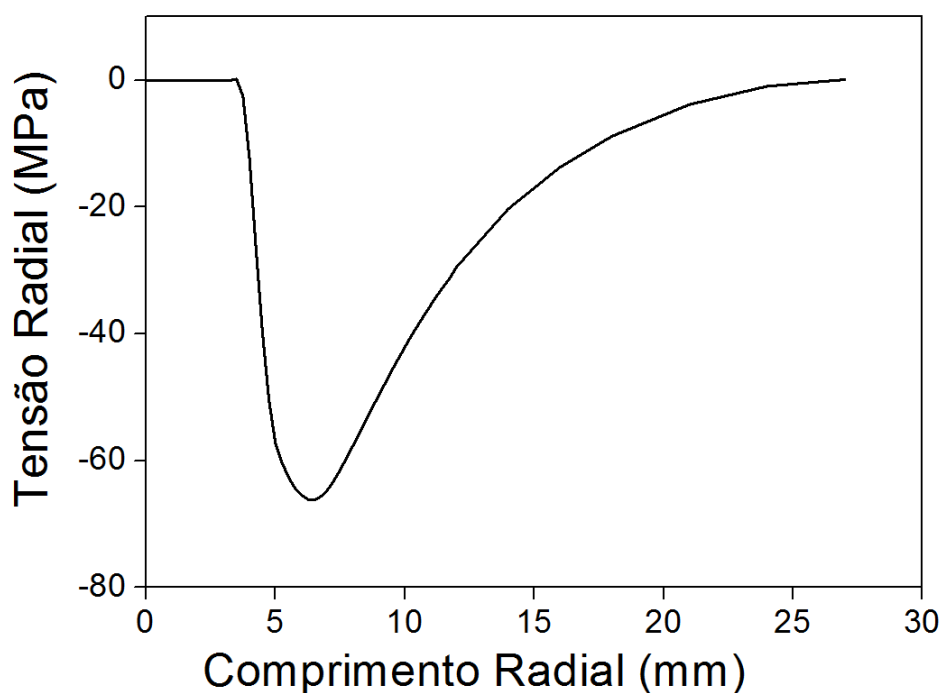


Figura 114 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante de 20s.

O resultado das temperaturas em relação à tensão circunferencial (figura 115) indica que na região sólida do modelo existem tensões de tração máximas de 14,3 MPa. Esse tipo de tensão é responsável pela abertura de trincas radiais, que vão iniciar em função do valor da tensão e de quanto o modelo físico é heterogêneo. Pode-se observar que na ZTA os valores de tensão compressivas aumentam em função do tempo.

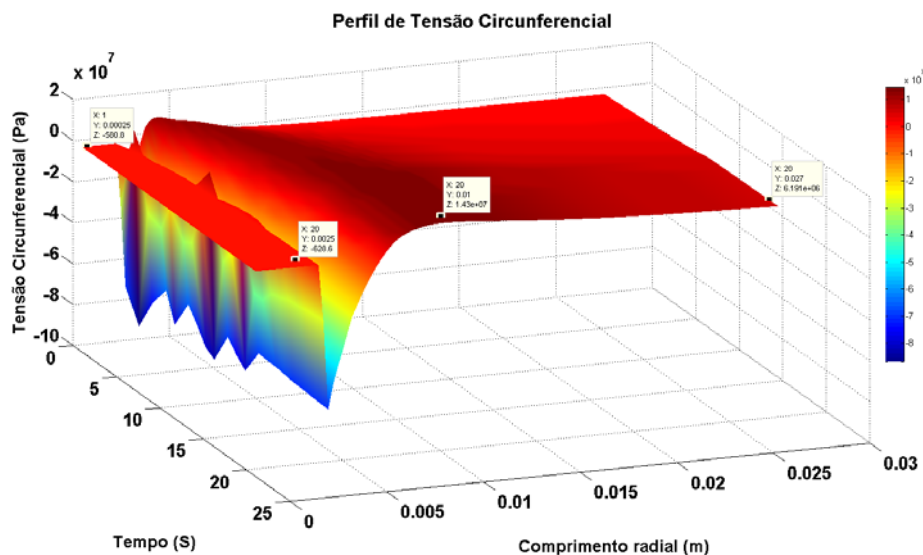


Figura 115 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 20s sem pressão.

Observa-se que, no instante de 20s, a região sólida da peça encontra-se em uma condição de tensões circunferenciais de tração (figura 116), sendo que o local preferencial para a abertura de trinca é próximo à ZTA, propagando no sentido da face externa do corpo de prova.

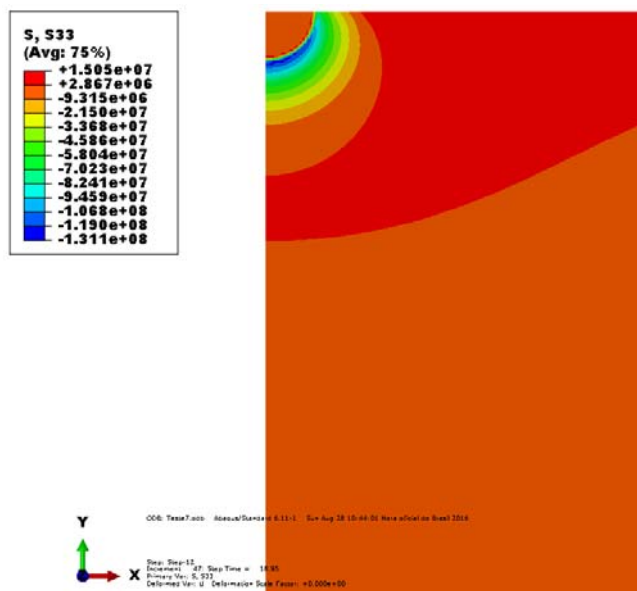


Figura 116 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 20s.

A figura 117 mostra a tensão circunferencial no instante de 20s os nós da superfície superior. Fica evidente a região de tensões circunferenciais de tração maior em Comparação aos testes de 2 e 10s sem pressão externa radial, e a redução dessas tensões ao se aproximar da face externa.

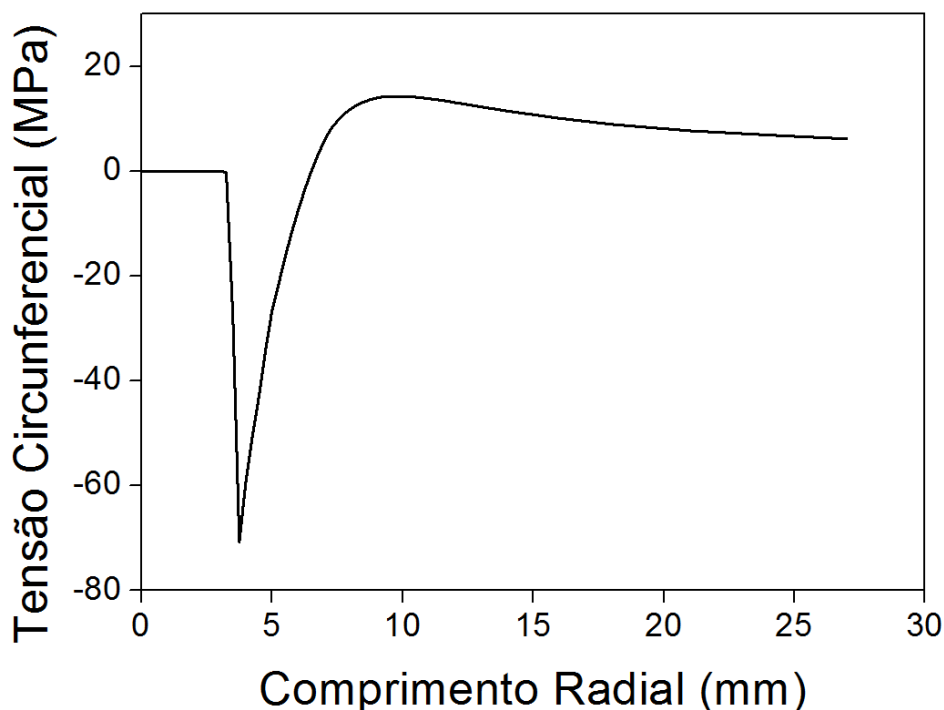


Figura 117 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial no instante de 20s sem pressão.

4.8.6.

Teste estático 20 segundos com pressão radial

Nesta sessão são discutidos os resultados da modelagem numérica realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS para o teste estático com irradiação durante 20s com pressão radial.

O resultado da distribuição de temperatura no modelo com aplicação da carga térmica durante 20s e aplicação da pressão externa de 6,85MPa é apresentado na figura 118. A exemplo da condição do ensaio anterior, 20s sem pressão radial externa, ocorre a redução gradual da temperatura em função afastamento da fonte de calor.

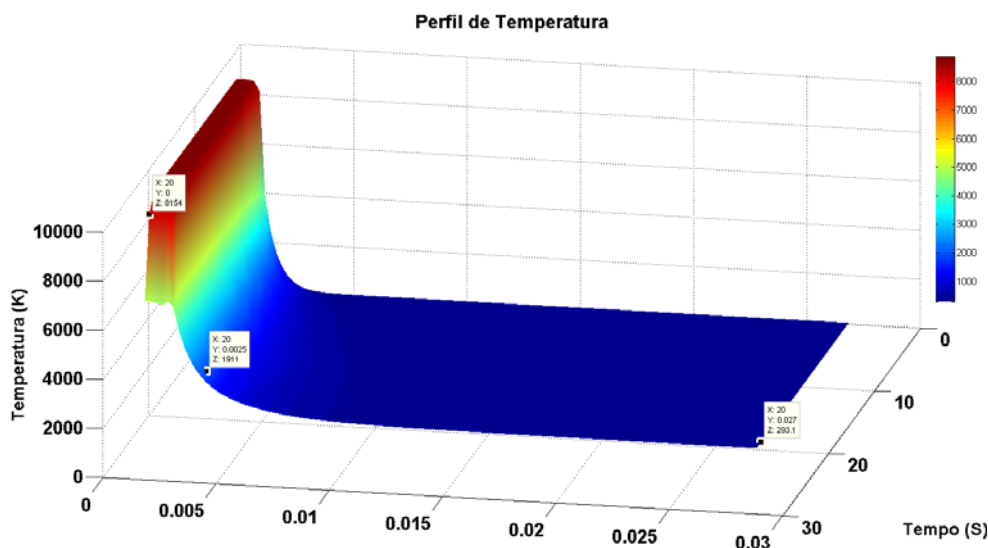


Figura 118 - Perfil da temperatura da perfuração de 20s com pressão radial.

A figura 119 mostra a distribuição das temperaturas no instante de interesse, apresentando as três regiões características: a região fundida (em cinza), a ZTA (em verde) e a parte sólida da peça (em azul).

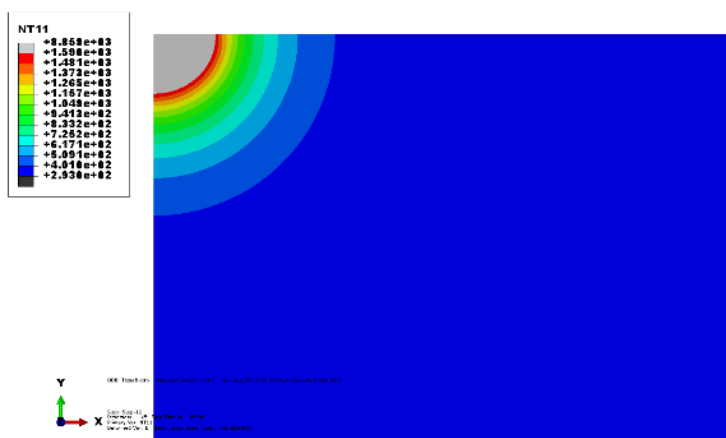


Figura 119 - Distribuição da temperatura no instante de 20s com pressão.

O resultado das tensões radiais (figura 120) mostra como se comporta esta componente de tensão ao longo da superfície superior nos diferentes instantes. Assim como no caso em que não foi aplicada a pressão radial, observa-se nitidamente o comportamento da ZTA com valores altamente compressivos, sendo o pico de compressão maior que no caso de 20 segundos sem pressão. A região sólida apresenta valores menores de compressão, diminuindo até que na face externa a tensão seja igual à pressão externa.

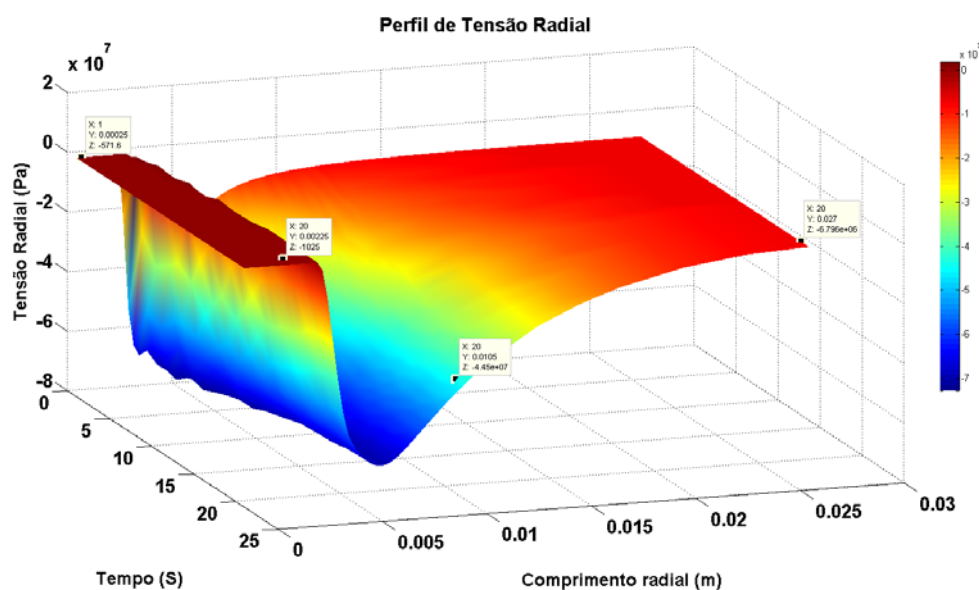


Figura 120 - Perfil de tensão radial na perfuração de 20s com pressão radial.

A figura 121 apresenta no instante de 20s a distribuição da tensão radial em toda a peça. Pode-se observar que o comportamento das tensões é sempre compressivo e tende a se tornar uniforme ao se afastar da fonte de calor.

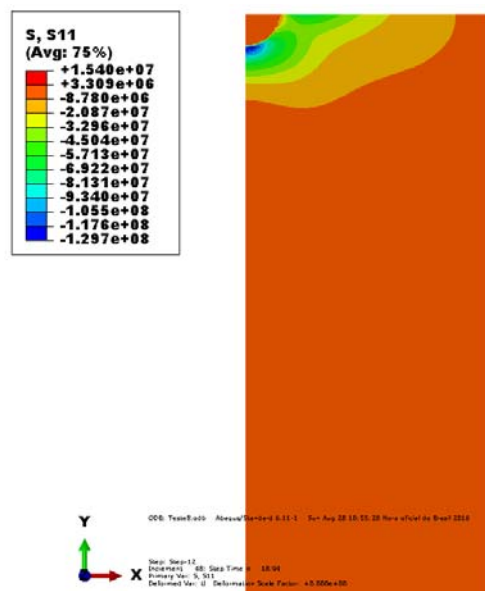


Figura 121 - Distribuição da tensão radial no instante de 20s com pressão radial.

O gráfico da tensão radial ao longo da superfície superior no instante de 20s (figura 122) mostra que, depois do pico compressivo, as tensões diminuem, chegando a se igualar ao valor da pressão externa.

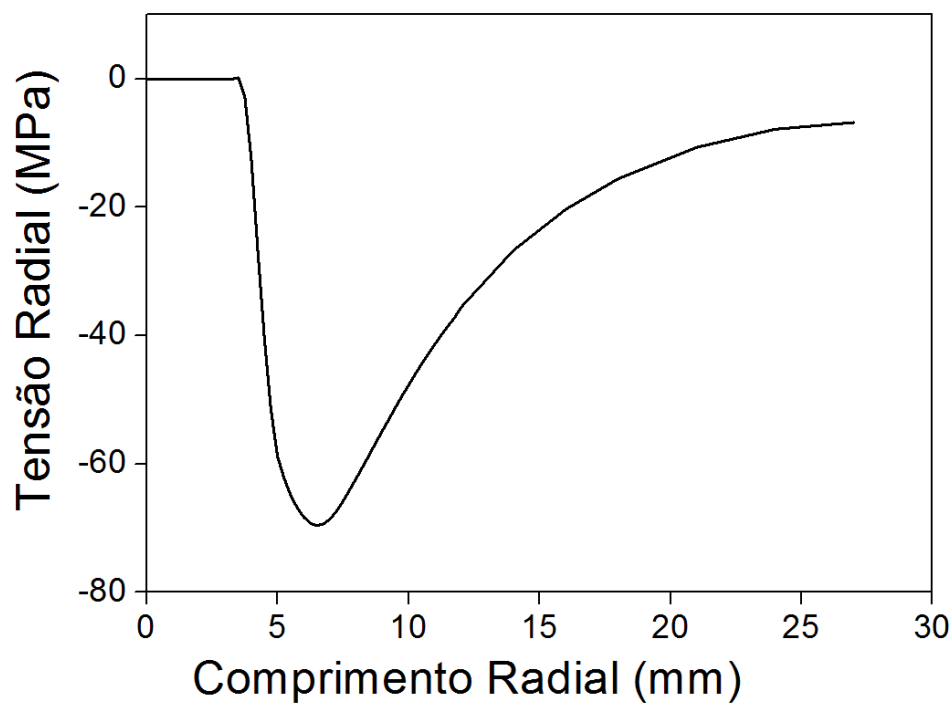


Figura 122 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante de 20s com pressão.

O resultado da tensão circunferencial (figura 123) indica que na região sólida do modelo existem tensões de tração menores que no modelo sem a pressão externa, porém ainda positivas.

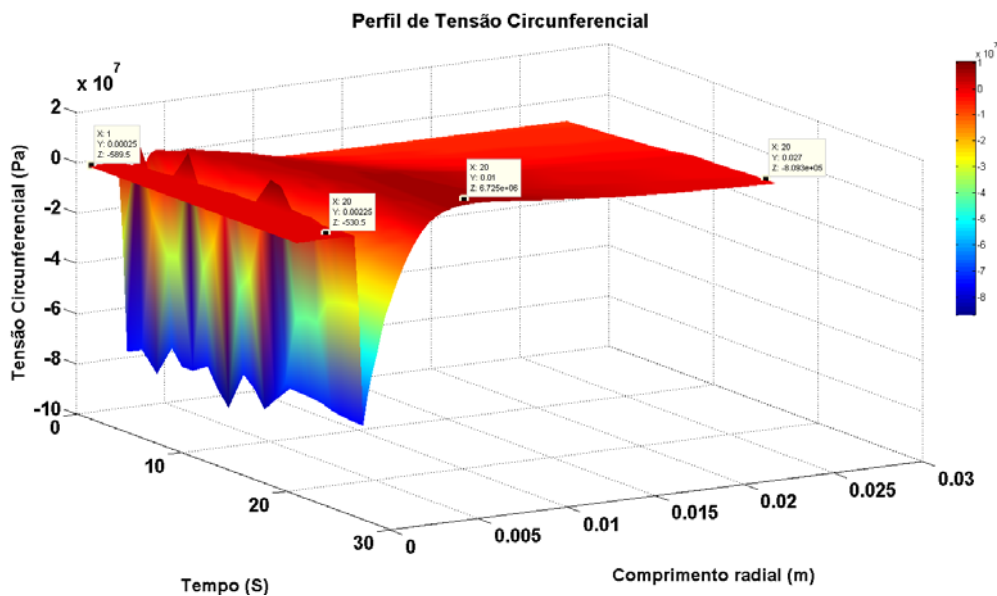


Figura 123 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 20s com pressão.

Observa-se que no instante de 20s a região sólida da peça encontra-se em uma condição de tensões circunferenciais de tração (figura 124), sendo o local preferencial para a abertura de trinca próximo à ZTA.

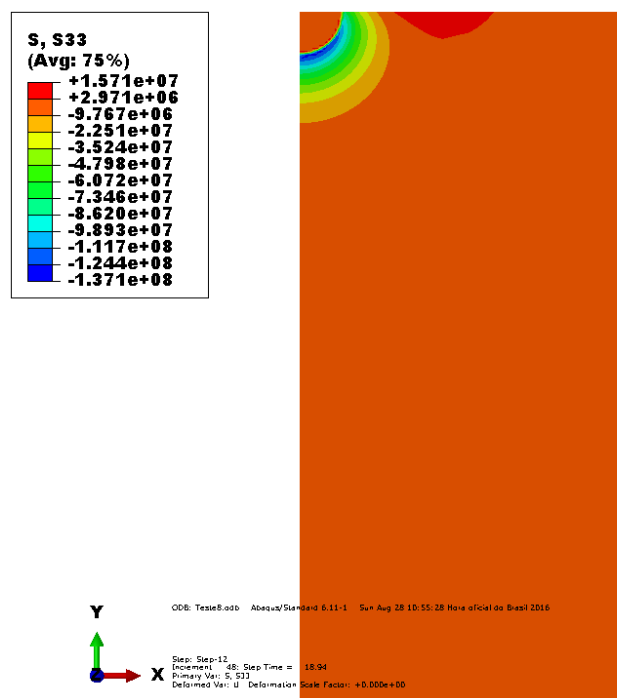


Figura 124 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 20s com pressão radial.

Na figura 125 é possível observar a influência da pressão externa na componente circunferencial. Essa influência acontece em função do efeito de Poisson, ocasionando a redução da componente de tração para um valor máximo de 6,75MPa.

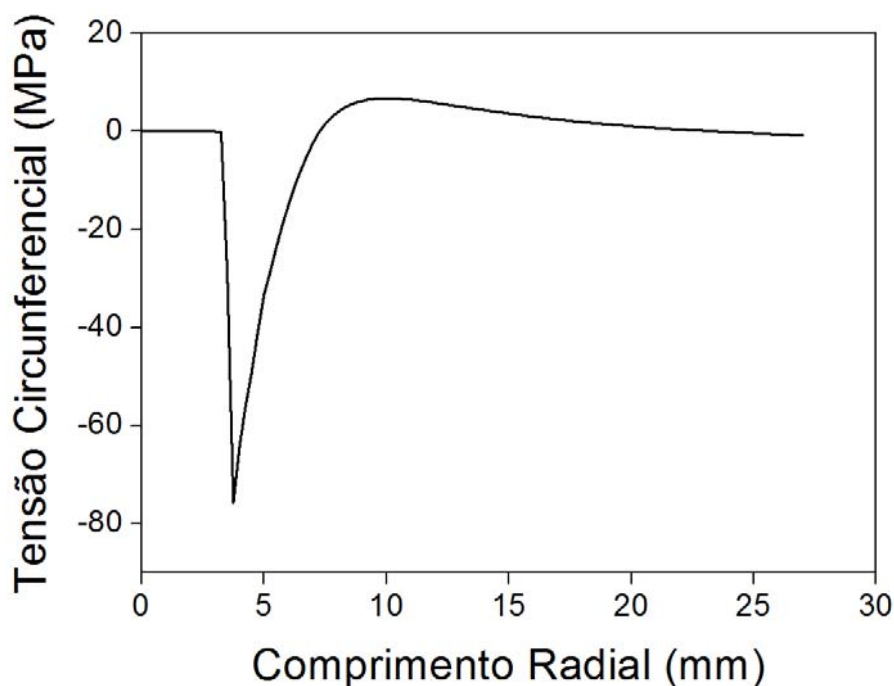


Figura 125 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial no instante de 20s com pressão radial.

4.9.

Comparação entre os resultados das microtomografias e a modelagem numérica do teste estático

Nesta sessão são comparados os resultados obtidos nos testes experimentais (microtomografias) e a modelagem numérica para o raio do furo (raio interno) e o raio externo (raio da ZTA) do teste estático sem pressão para um tempo de perfuração de 10s. A figura 126 apresenta os raios interno e da ZTA obtidos da modelagem termomecânica, enquanto que a figura 127 apresenta o raio interno e da ZTA obtidos da microtomografia. A Tabela 23 resume estes resultados, observando-se que os valores experimentais e numéricos são próximos, com uma diferença de 0,45mm.

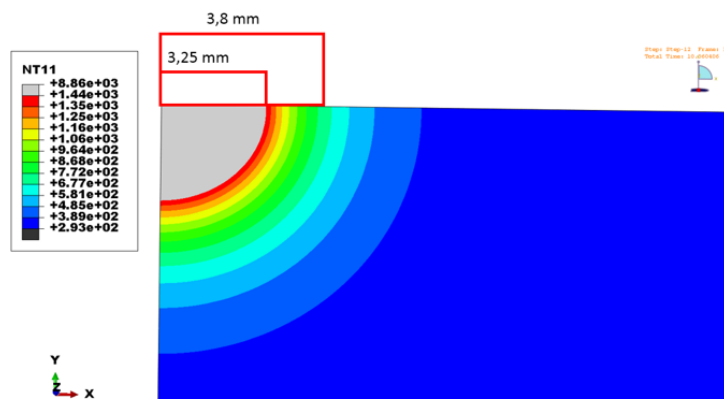


Figura 126 - Comparação dos raios entre a modelagem e a microtomografia.

Tabela 23 - Valores obtidos dos raios pelos métodos da modelagem e da microtomografia.

	Microtomografia	Modelagem Numérica
Raio do furo (mm)	2,8	3,25
Raio da ZTA (mm)	3,35	3,8

Conforme mencionado anteriormente, pode-se também ver que não existe nenhum tipo de dano fora da zona termicamente afetada. Conforme visto (ver figura 98), a tensão radial da modelagem é baixa para esta região, indicando que esta não será a componente principal para a propagação de trincas, uma vez que não há tensões de tração relevantes nesta componente de tensão.

Em relação à tensão circunferencial, observa-se que na região sólida do modelo existem tensões de tração máximas de 12,73 MPa (ver figura 101). Esse tipo de tensão é responsável pela abertura de trincas radiais, cujo início ocorre em função do valor da tensão e de quanto o modelo físico é heterogêneo.

Baseado nestes resultados, conclui-se que a tensão de tração máxima atingida na modelagem numérica dos testes estáticos não foi suficiente para a propagação de trincas e que não existe nenhum tipo de dano nas regiões externas à zona termicamente afetada, o que foi confirmado pelos dados experimentais.

4.10. Resultados da Modelagem Numérica do Teste Dinâmico

4.10.1. Teste Dinâmico 100 segundos sem pressão radial

Nesta sessão são discutidos os resultados da modelagem numérica realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS para o teste dinâmico com irradiação de trajetória espiral durante 100s sem pressão radial. Neste intervalo de tempo, o laser deu 5 voltas em torno do eixo central (20 s para cada uma), de dentro para fora. O resultado das temperaturas no modelo dinâmico está apresentado na figura 127, onde se encontram marcadas o início de cada uma das 5 voltas, assim como o final do teste.

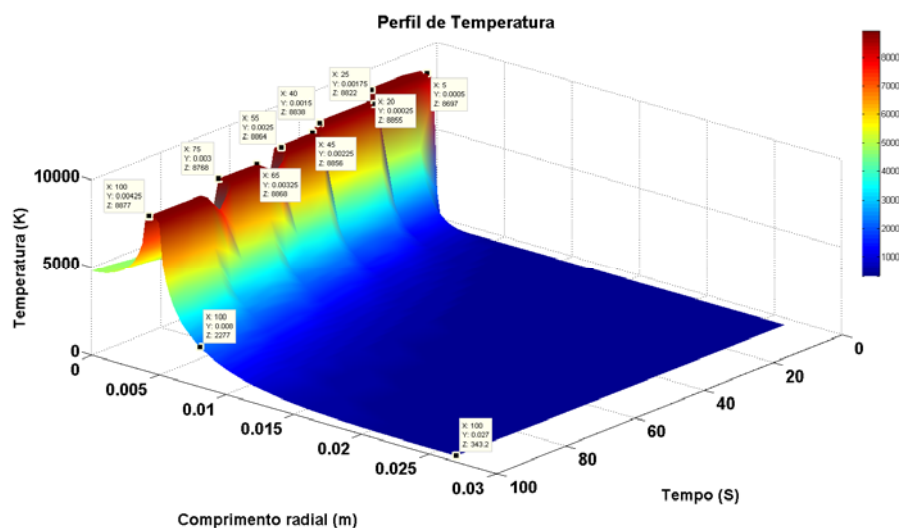


Figura 127 - Perfil de temperatura do teste dinâmico de 100s sem pressão radial.

A distribuição de temperatura na peça no instante de 100s (figura 128), mostra que a elevação de temperatura ocorre na superfície superior e também na profundidade da peça. Superfície superior do modelo ocorre uma elevação de temperatura na profundidade da peça. Observa-se uma zona termicamente afetada maior comparada com os testes estáticos realizados anteriormente, em função do perfil de aplicação da carga térmica (laser).

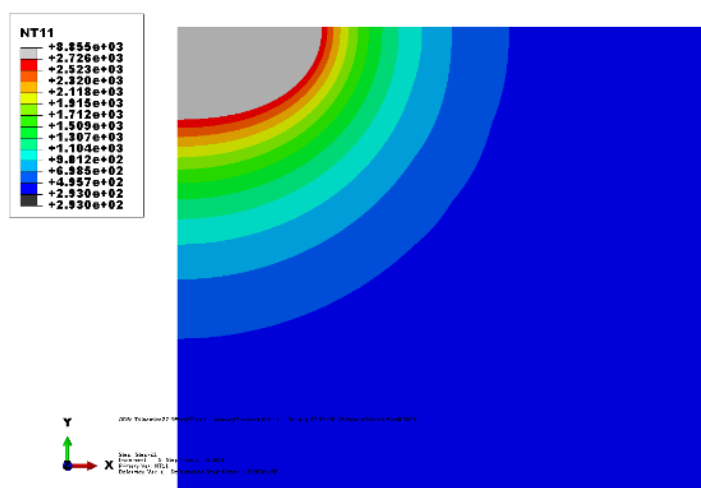


Figura 128 - Distribuição da temperatura no instante de 100s sem pressão.

As tensões radiais em função do tempo (figura 129) indicam um padrão de tensões compressivas na região exterior à ZTA.

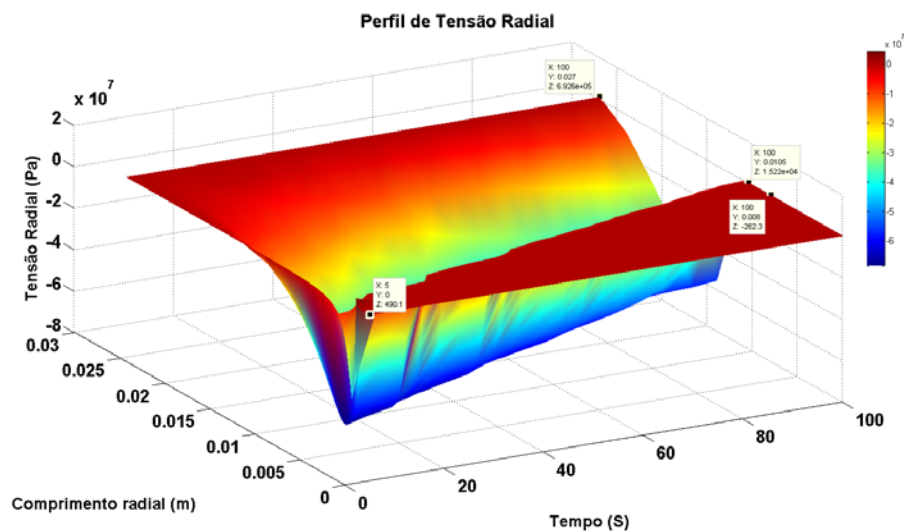


Figura 129 - Perfil da tensão radial da perfuração de 100s sem pressão.

A figura 130 expõe as tensões radiais no instante de 100s, mostrando um estado compressivo não apenas ao longo da superfície interna, como também na profundidade da peça.

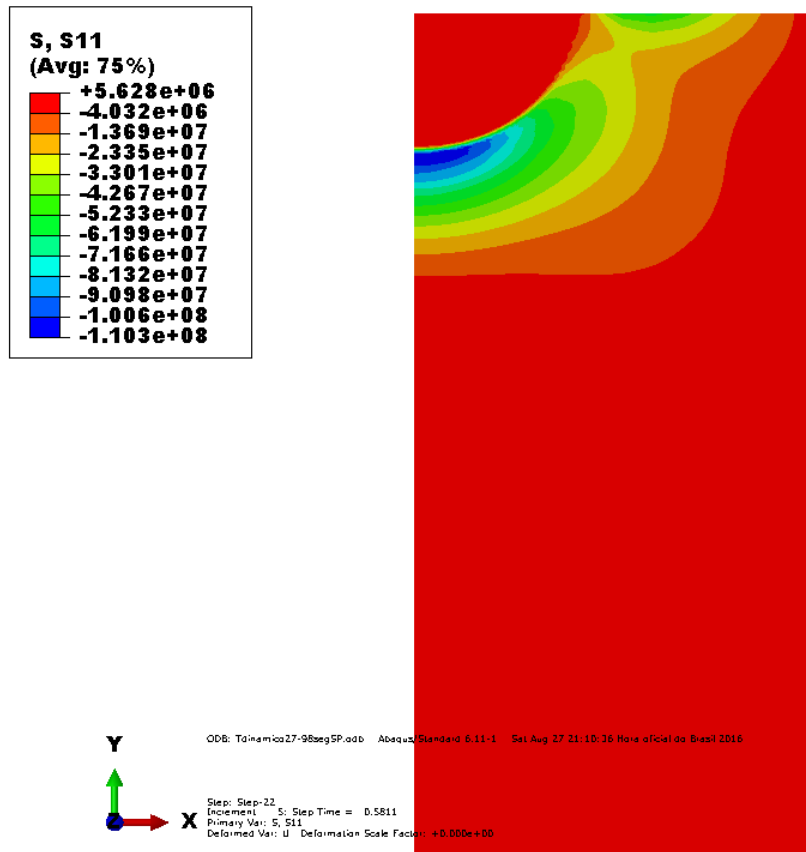


Figura 130 - Distribuição da tensão radial no instante de 100s sem pressão.

O gráfico da tensão radial na superfície da peça no instante de 100s (figura 131) mostra que, na superfície superior, na região exterior à ZTA, as tensões reduzem gradativamente até chegarem à próximo de zero na face externa.

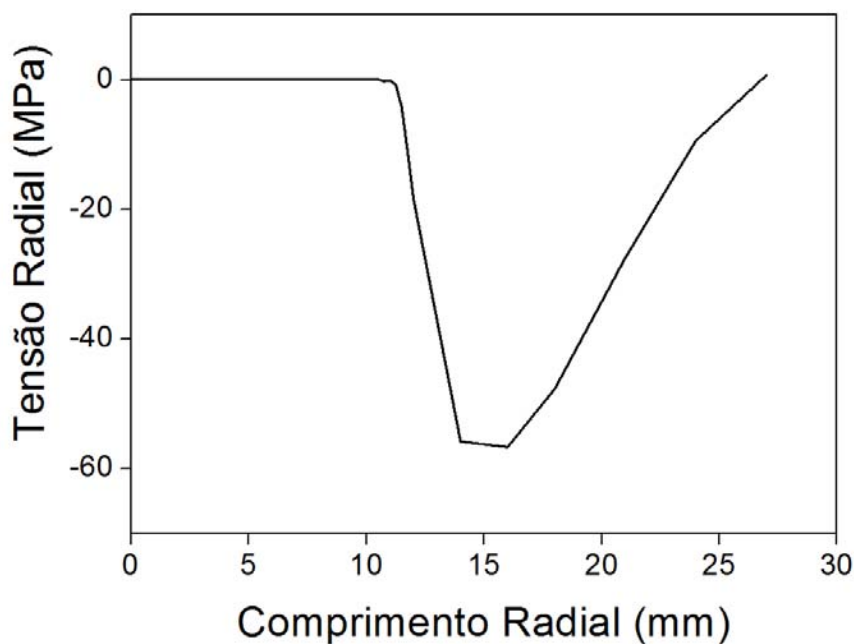


Figura 131 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante de 100s sem pressão.

As tensões circunferenciais são mostradas na figura 132, e mostram que na região sólida do corpo de prova, as tensões de tração ultrapassam 40 MPa. Esta região é a região preferencial para a iniciação de trincas no corpo de prova, pois tem alta tensão de tração. Em função do perfil de aplicação da carga térmica (laser), observa-se uma zona de fusão mais estendida.

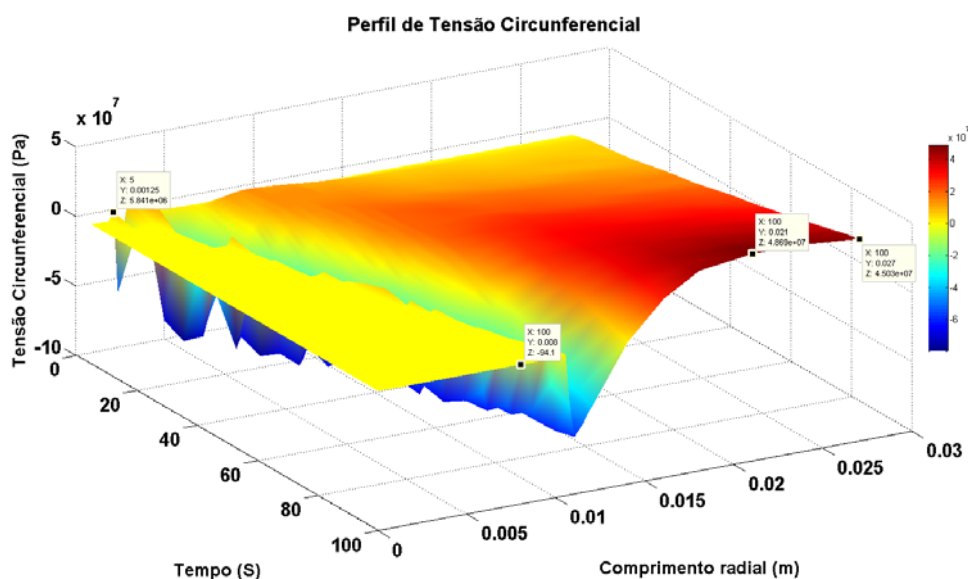


Figura 132 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 100s sem pressão.

A distribuição das tensões circunferenciais no instante de 100s (figura 133) indica que ocorrem tensões de tração na superfície superior até o diâmetro externo, e que a profundidade da ZTA é considerável, indicando ser um método que proporciona maiores profundidades de perfuração.

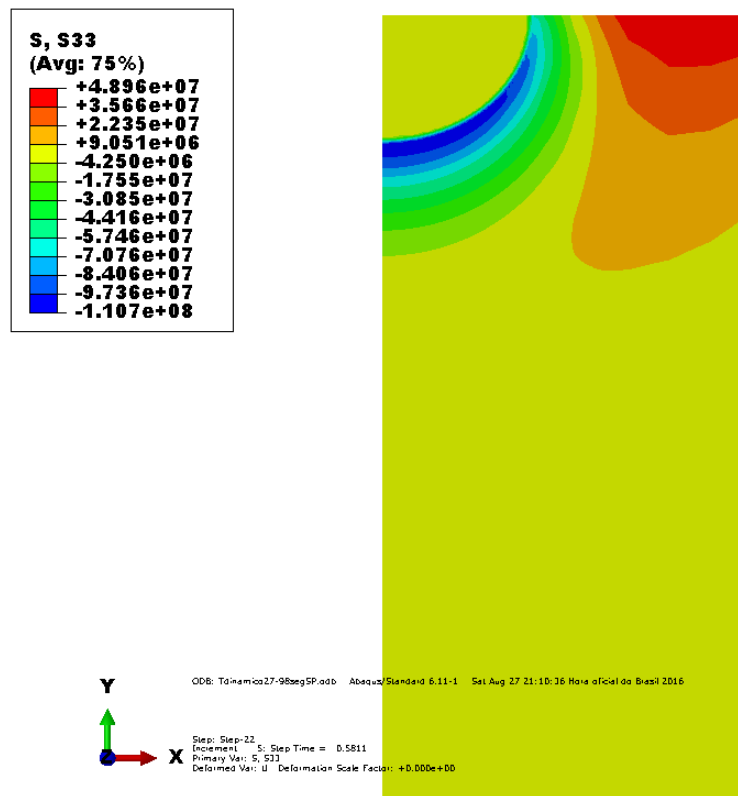


Figura 133 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 100s sem pressão.

O gráfico das tensões circunferenciais na superfície do cilindro (corpo de prova) mostra que a metade do raio da peça está submetida a um regime de tração, e a tração na direção circunferencial induz a abertura de trincas radiais, fenômeno observado nos ensaios experimentais (ver figura 134)

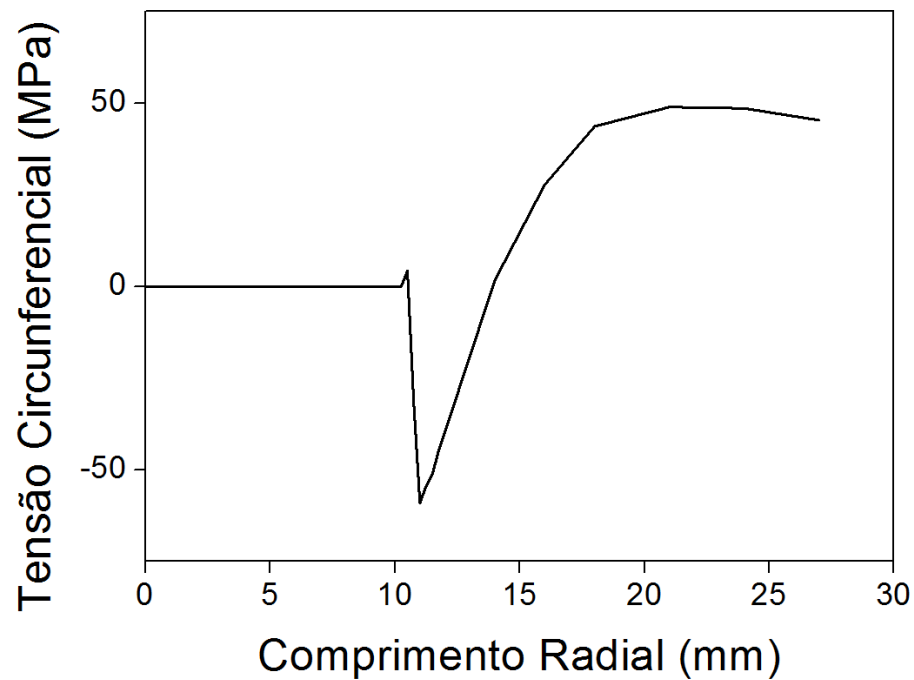


Figura 134 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial no instante de 100s sem pressão.

O gráfico das tensões axiais é mostrado na figura 135. O resultado apresenta na região correspondente ao material sólido tensões de tração com valores máximos de 15,78 MPa. Estes valores indicam a possibilidade de delaminação da peça.

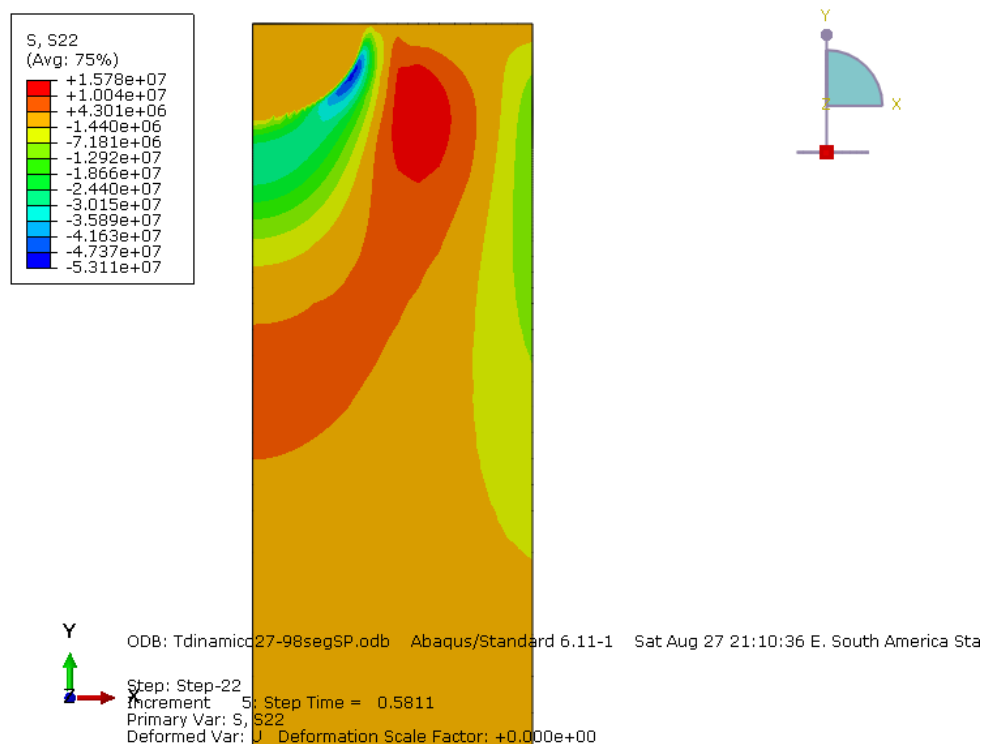


Figura 135 - Distribuição da tensão axial no instante de 100s sem pressão.

4.10.2.

Teste Dinâmico 100 segundos com pressão radial

Nesta sessão são discutidos os resultados da modelagem numérica realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS para o teste dinâmico com irradiação de trajetória espiral durante 100s com aplicação da pressão radial externa de 6,85MPa. Neste intervalo de tempo, o laser deu 5 voltas em torno do eixo central (20 s para cada uma), de dentro para fora. O resultado do perfil da distribuição de temperatura no modelo dinâmico está apresentado na figura 136, onde encontram-se marcadas o início de cada uma das 5 voltas, assim como o final do teste. A exemplo da condição de ensaio anterior, 100s sem pressão radial externa, ocorre a redução gradual da temperatura em função afastamento da fonte de calor.

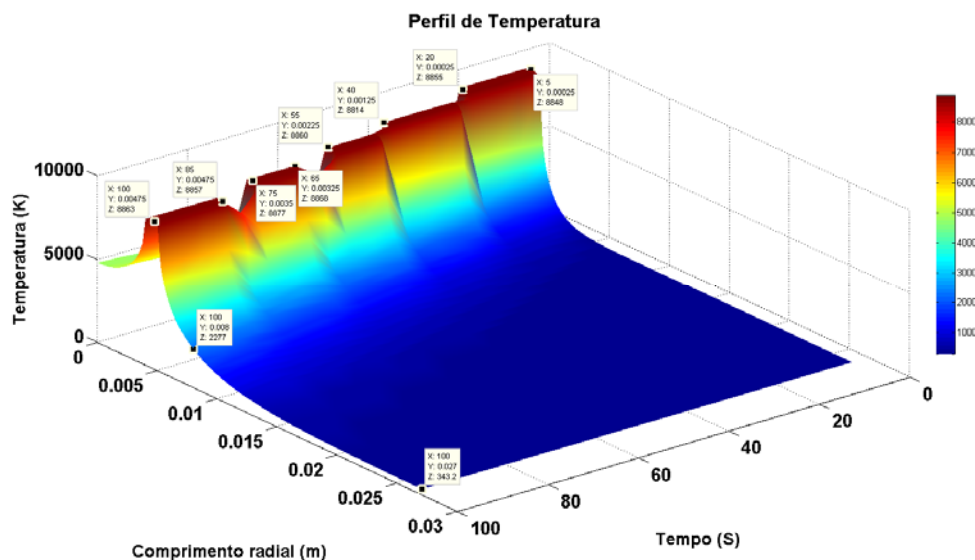


Figura 136 - Perfil da temperatura do teste dinâmico de 100s com pressão radial.

A figura 137 expõe a distribuição da temperatura na peça no instante de 100s, mostrando as três regiões características mencionadas anteriormente.

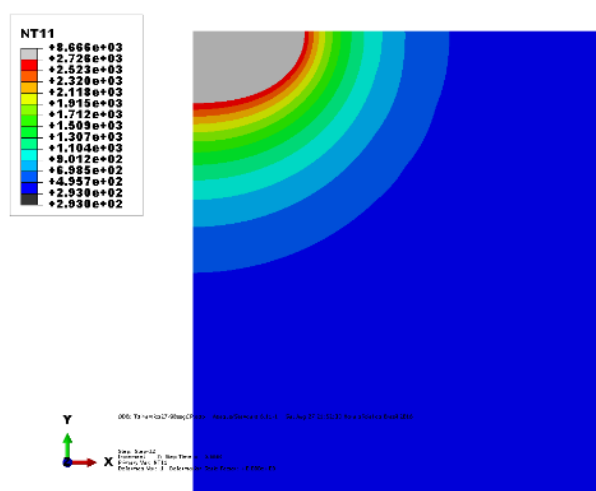


Figura 137 - Distribuição da temperatura no instante de 100s com pressão radial.

As tensões radiais em função do tempo (figura138) indicam um padrão de tensões compressivas na região exterior à ZTA. O valor de pico compressivo ocorre em valores similares aos casos de carga térmica estática, porém no diâmetro externo

ainda existe um valor residual de tensão compressiva de 6,22 MPa, próximo ao valor da pressão externa.

Observa-se nitidamente o comportamento da ZTA com valores altamente compressivos, sendo o pico de compressão maior que no caso anterior (100 segundos sem pressão radial). A região sólida apresenta valores menores de compressão, com a tensão diminuindo, até que na face externa a tensão seja igual à pressão externa.

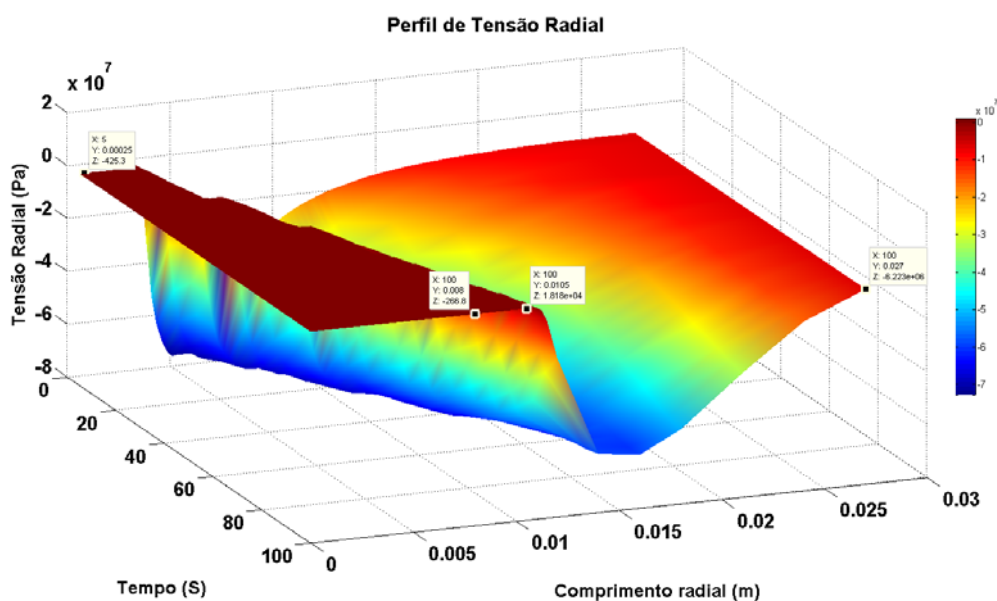


Figura 138 - Perfil da tensão radial da perfuração de 100s com pressão radial.

A figura 139 das tensões radiais no instante de 100s no caso dinâmico com pressão radial de 6,85MPa apresenta um estado compressivo, não apenas ao longo da superfície interna, como também na profundidade da peça.

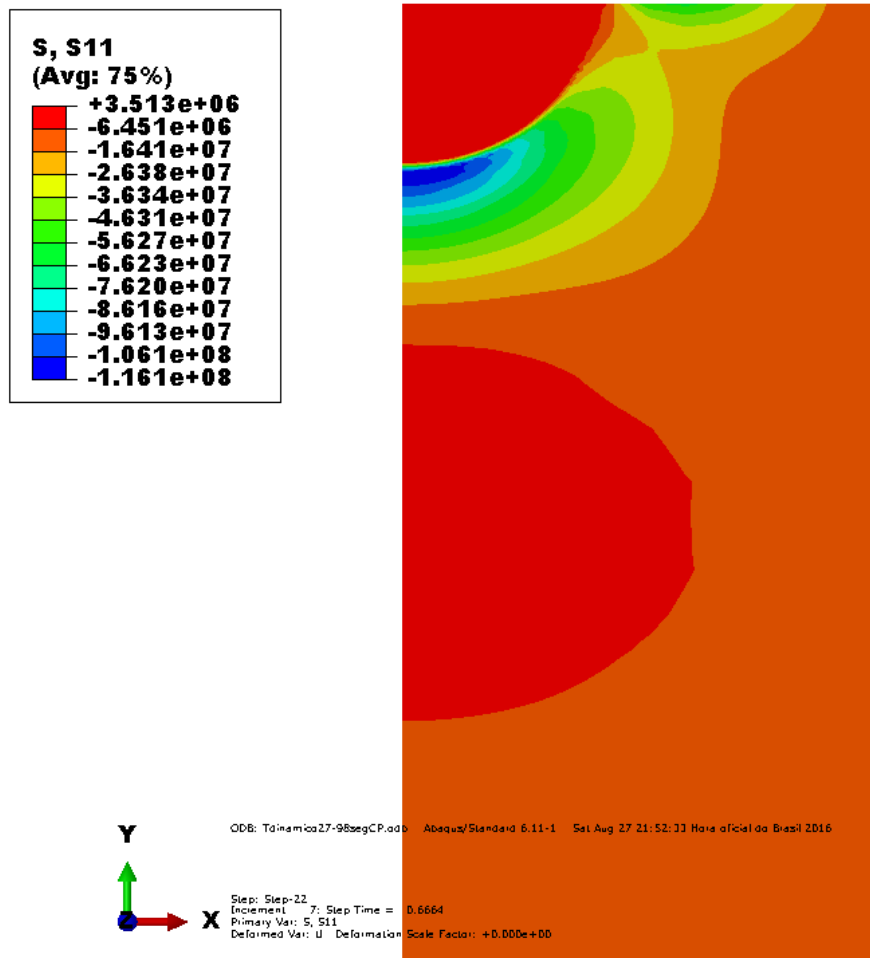


Figura 139 - Distribuição da tensão radial no instante de 100s com pressão radial.

O gráfico na tensão radial do modelo dinâmico no instante de 100s na superfície do corpo de prova (figura 140) mostra uma região menor de fusão, assim como os comportamentos da ZTA e da região sólida da peça. Comparando estes resultados com os do teste dinâmico sem pressão radial, chega-se à conclusão que a zona de fusão e a ZTA são menores que no caso sem pressão. Na região externa ao pico compressivo, as tensões diminuem, chegando a se igualar ao valor da pressão externa.

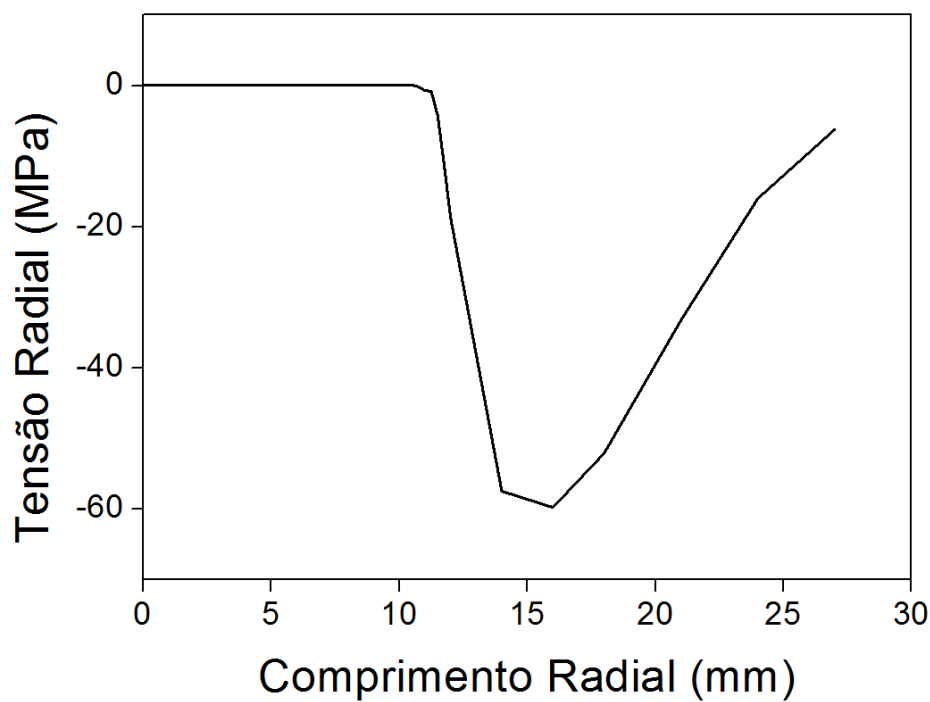


Figura 140 - Gráfico bidimensional da tensão radial no instante de 100s com pressão radial.

As tensões circunferenciais são mostradas na figura 141, e mostram que na região sólida do corpo de prova as tensões de tração ultrapassam 40 MPa, o que indica a região preferencial para a iniciação de trincas no corpo de prova. Em função do perfil de aplicação da carga térmica, observa-se uma zona de fusão mais estendida.

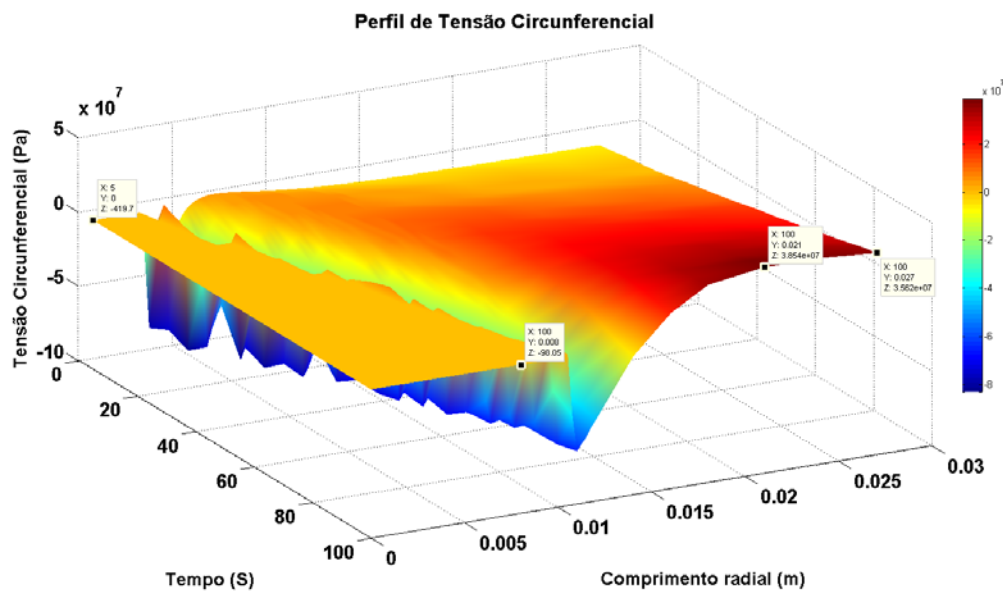


Figura 141 - Perfil da tensão circunferencial da perfuração de 100s com pressão radial.

A distribuição das tensões circunferenciais no instante de 100s (figura 142) indica que ocorrem tensões de tração na superfície superior até o diâmetro externo, e que a profundidade da ZTA é considerável, indicando ser este um método que proporciona maiores profundidades de perfuração.

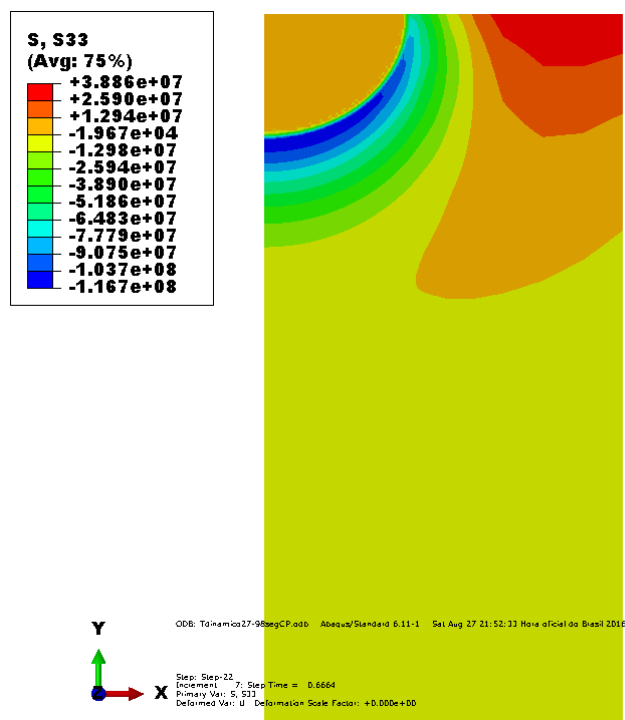


Figura 142 - Distribuição da tensão circunferencial no instante de 100s com pressão radial.

A distribuição da tensão circunferencial no instante de 100s na superfície do corpo de prova (figura 143) indica uma ZTA com profundidade maior que as encontradas nos testes estáticos. Como se pode ver no gráfico, os valores máximos compressivos na região sólida são ligeiramente maiores que 60MPa.

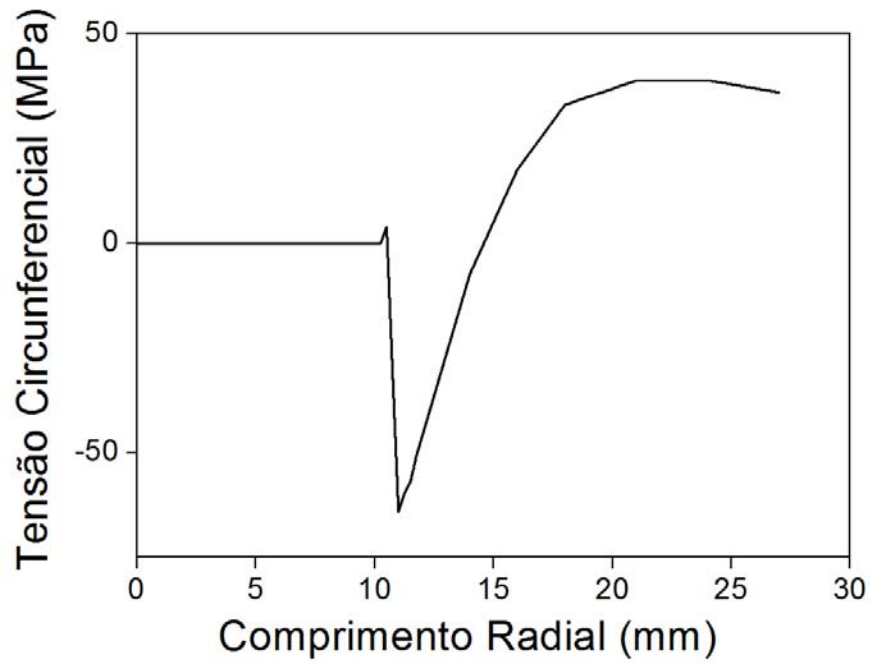


Figura 143 - Gráfico bidimensional da tensão circunferencial no instante de 100s com pressão radial.

O gráfico das tensões axiais no modelo dinâmico com pressão é mostrado na figura 144.

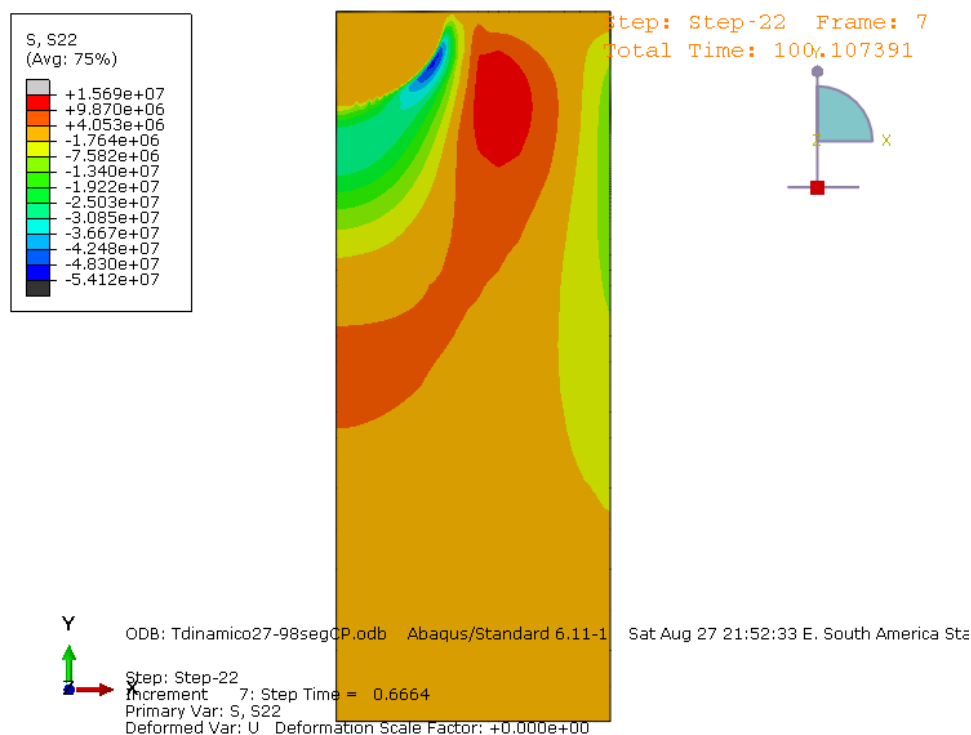


Figura 144 - Distribuição da tensão Axial no instante de 100s com pressão radial.

O resultado apresenta comportamento semelhante ao do modelo dinâmico sem pressão radial, porém com valores menores. No entanto, os valores ainda são positivos, o que indica a possibilidade da abertura de trincas.

4.11.

Comparação entre os resultados das microtomografias e da modelagem numérica do teste dinâmico

Nesta sessão, são comparados os resultados obtidos nos testes experimentais (microtomografias) e na modelagem numérica para o raio do furo (raio interno), o raio externo (raio da ZTA) e a profundidade do teste dinâmico com pressão para um tempo de perfuração 100s. A figura 145 apresenta a Comparação dos raios interno da microtomografia da ZTA obtidos da modelagem termomecânica, enquanto que a figura 145 apresenta o raio interno e da ZTA obtidos da microtomografia. A Tabela 24 resume estes resultados, observando-se que os valores experimentais e numéricos são próximos.

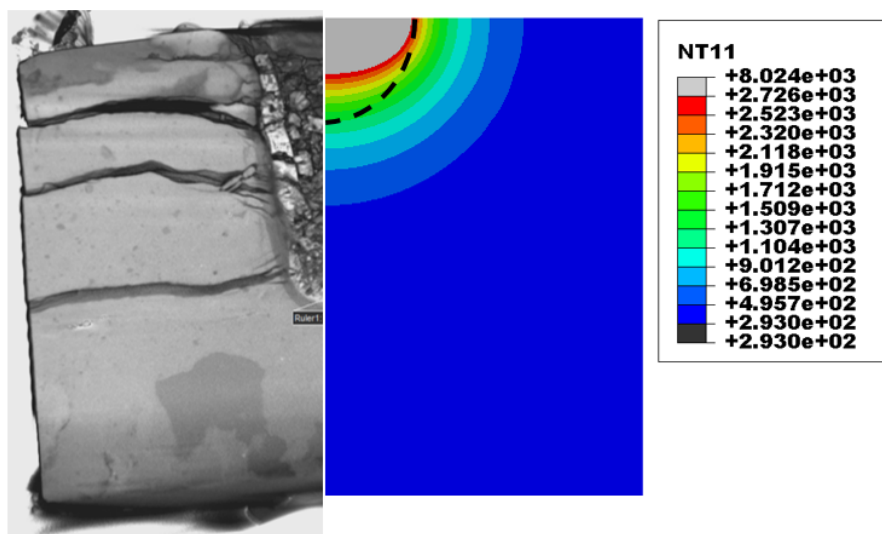


Figura 145 - Comparação dos raios e a profundidade entre a modelagem e a microtomografia.

Tabela 24 - Resume dos valores da obtidos pelos métodos da modelagem e microtomografia.

GRANDEZA	MICROTOMOGRRAFIA	MODELAGEM NUMÉRICA
Raio do furo (mm)	7,6	11
Raio da ZTA (mm)	10	12

As tensões circunferenciais são mostradas na figura 143, e mostram que na região sólida do corpo de prova, as tensões de tração ultrapassam 45 MPa, na direção circunferencial, o que induz a abertura de trincas radiais. As tensões radiais (figura 140) são da ordem de 12MPa. Este resultado concorda com o teste dinâmico experimental microtomografiado, onde se pode ver delaminações.

5

Conclusões e Recomendações

Este trabalho contribuiu para a tecnologia de canhoneio a laser em rochas carbonáticas através do estudo do comportamento termomecânico desta rocha quando perfurada por um laser no processo de canhoneio. Foram utilizadas simulações pelo método de elementos finitos através do desenvolvimento de um modelo termomecânico elástico transiente axissimétrico para simular condições de canhoneio no caso estático e dinâmico. Testes experimentais foram realizados a pressão atmosférica e sob pressão. A análise dos corpos de prova foi feita através de inspeção e de caracterização por microtomografia, o que permitiu verificar as propriedades da rocha e a zona termicamente afetada (ZTA), assim como as características geométricas do furo. Os resultados numéricos e experimentais foram comparados. Mostrou-se que a perfuração sob condição dinâmica foi a mais eficiente.

Os resultados experimentais mostraram a influência de diversos parâmetros no processo de canhoneio a laser, tais como o tempo de aplicação da fonte de calor, a presença ou não da pressão externa, e o tipo de aplicação da carga térmica (estática ou dinâmica). A análise do resultado do canhoneio foi feita por inspeção no laboratório e pelo método da microtomografia.

Os resultados avaliados em laboratório tiveram boa correlação com a microtomografia, apesar de possuir uma exatidão menor. O cálculo da energia específica é diferente nos dois métodos, sendo que a microtomografia apresenta valores maiores de tal grandeza.

O tempo de aplicação da fonte de calor influencia no volume de material removido nos casos em que não se aplica a pressão externa. Quando a pressão é aplicada, volume de material removido se mantém e há um aumento no volume da ZTA, conforme se aumenta o tempo de aplicação da fonte de calor.

Foi possível observar nos testes dinâmicos um volume de material removido maior que os vistos nos testes estáticos, e isto se deve tanto ao tempo de aplicação da fonte de calor, quanto pelo caminho percorrido por essa mesma fonte.

A abertura de trincas foi verificada principalmente nos ensaios dinâmicos. Essas trincas são observadas tanto na direção radial quanto sob forma de delaminação da rocha, o que indica estado de tensão de tração nas direções circunferencial e axial dos corpos de prova.

Foram observadas trincas em ensaios estáticos com tempos de 20s. Nesses casos a abertura das trincas dependeu das tensões nos corpos de prova, e da heterogeneidade do material.

Foi desenvolvido um modelo axissimétrico com acoplamento termomecânico que, a partir da aplicação de uma fonte de calor, calculou a distribuição de temperatura até o resfriamento da peça e apresentou como resultados a distribuição de temperaturas e as tensões radial, axial e circunferencial. Os resultados do modelo numérico apresentam valores de tensões e temperaturas que não são fornecidos pelos métodos experimentais aplicados.

Os resultados do modelo foram coerentes com os observados experimentalmente, principalmente ao se analisar as temperaturas, com a delimitação do material fundido, a ZTA e a parte sólida do modelo.

Os resultados das tensões também se mostraram bem relacionados com os experimentos, uma vez que as tensões circunferenciais mostraram regiões de tração em todos os modelos, sendo os maiores valores no modelo dinâmico. Estes modelos dinâmicos apresentaram abertura de trincas nos testes experimentais. As tensões axiais também mostraram valores trativos em certas regiões da peça, e se observou nas microtomografias a delaminação (trincas) nos corpos de prova nas regiões mostradas nas simulações.

Nos testes experimentais, para simular as rochas do reservatório, foi utilizada a rocha carbonática Bege Bahia. Este resultado é positivo porque o trabalho desenvolvido para esta tese pode ser considerado como o caso extremo de perfuração das rochas dos reservatórios do Pré-sal.

Como trabalhos futuros, é recomendado caracterizar outra rocha que apresente maior porosidade e permeabilidade, para então poder repetir os testes de perfuração. Espera-se que estes resultados se mostrem mais próximos das condições de perfuração de rochas em reservatórios. Os resultados devem também mostrar que a taxa de perfuração neste caso é mais alta que a com a rocha Bege Bahia.

Os testes também devem ser realizados sob valores de pressão mais altos, entre 1500 PSI (10,34 MPa) e 3000Psi (20,68 MPa), sob condições estáticas e dinâmicas. Além disso, devem ser realizados testes sob pressão axial, pois os testes descritos nesta tese envolvem somente pressão radial. Para este propósito, será necessário projetar uma nova câmara de pressão.

Outros testes que deverão ser realizados são a perfuração com o feixe do laser na direção horizontal. Estes testes são importantes uma vez que o canhoneio a laser também será realizado na direção horizontal, de forma que estes testes se aproximarão mais ainda das condições reais de reservatório. Para a realização destes testes, será necessário aumentar um grau de liberdade na automação da estrutura da saída da luz do laser para permitir furar na posição horizontal e inclinada.

Finalmente, será necessário realizar os testes de perfuração com as rochas saturadas, conforme as condições reais de reservatório.

ABAQUS. **ABAQUS User's Manual**. Rohde USA: 2010.

AHMADI, M. The effect of interaction time time and saturation of rock on specific energy in ND:YAD laser perforating. **Optics & Laser Technology**, 2010.

AHR, W. M. **Geology of Carbonate Reservoirs**. New Jersey: John Wiley & sons, 2008.

BATARSEH, S. Well Perforation Using High Power Lasers. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, Denver, Colorado 2003.

BAZARGAN, M. Feasibility of using Laser bit beside common bits drilling slim holes. **International Petroleum Technology Conference**, March 2013.

BAZARGAN, M. Utilization of Lasers in Petroleum Drilling Industry. **International Petroleum Technology Conference**, March 2013.

BULLETIN, A. **Rock Fabric/Petrophysical Classification of Carbonate Pore Space for Reservoir Characterization**. 9. ed. [S.l.]: v. 79, 1995.

C, V. L. Energy Efficiency of Drilling Granite and Travertine with CO₂ Laser and 980 nm Diode Laser, 2012.

DOMINGUES, D. L. P. **Caracterização Geológica e Geomecânica de travertinos**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

FERREIRA SILCA, L. **Adquisição, Processamento e Análise de imagens 3D**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade de Rio De Janeiro, 2014.

GAHAN, B. C. Analysis of Efficient High-Power Fiber Laser for Well Perforation. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, Houston, Texas 2004.

GOMES, H. S. **Dissertação de mestrado, departamento de Engenharia Mecânica**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.

GOMES, O. F. M. **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, 2001.

GRAVES, R. M. StarWars laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas wells. **SPE 49259**, 1998.

GRAVES, R. M. Comparison of Specific Energy Between Drilling With High Power Lasers and Other Drilling Methods. **SPE 77627**, San Antonio, Texas, p. 8, September 2002.

HERNANDEZ, P. R. L. **Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil**. Rio de Janeiro: Pontificia Universidade Catolica de Ri de Janeiro, 2013.

K, N. Study on Rock Excavation with Laser, 2000.

LIANYING, Z. Temperature, Experimental Study On The Mechanical Properties Of Rocks At High. **Science in China serie E**, 2009.

LIU, S. An experimental study on the physico-mechanical properties of two post-high-temperature rocks. **Engineering Geology** , p. 7, 2015.

LUZA, H. C. A. **Estudo experimentaldo comportamento geomecânico do travertino**. Rio de Janeiro: Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.

M, O. B. A review of light amplification by stimulated emission of radiation in oiland gas well drilling. **Mining Science and Technology**, 2010.

MARTINS GOMES, O. **Processamento e Análise De Imagens Aplicados à Carateização Automatica de Materiais**. Rio de Janeiro: Pontificia Universidade Catolica do Rio de Janeiro, 2001.

MAURER, W. C. **Advanced Drilling Techniques Petroleum**. [S.l.]: Publishing, 1980.

O'BRIEN. StarWars Laser Technology for Gas Drillingand completions in the Century. **SPE 56625**, 1999.

ORLANDO, L. F. G. **Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica**. Rio de janeiro: Pontificia Universidade Catolica do Rio de Janeiro, 2014.

PARKER, R. Drilling Large Diameter Holes in Rocks Using Multiple Laser Beams, 2001.

ROBERTSON, E. C. **Thermal Properties of Rocks**. Reston, Virginia:, 1988.

S. BATARSEH, B. C. G. R. M. G. Well Perforation Using High-Power Lasers. **SPE 84418**, Denver, Colorado, p. 10, 5-8 October 2003 2003.

SCHLUMBERGER. Yacimientos carbonatados, p. 16, 2008.

SILVA, M. G. F. **Dissertação de mestrado Departamento de Engenharia Mecânica**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

XU, Z. Application of High Powered Lasers to perforated Completions. **International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics**, 2003.

XU, Z. Specific Energy for Pulsed Laser Rock Drilling. **SPE**, 2003.

XU, Z. Laser Rock Drilling by a Super-Pulsed CO₂ Laser Beam. **SPE**, 2004.

XU, Z. Laser Spallation of Rocks for Oil Well Drilling. **23th International Congress on Application of Lasers & Electro-Optics**, Chicago 2004.

XU, Z. Specific Energy for Laser Removal of Rock. **20th International Congress on Application of Laser & Electro-Optics**, Jacksonville Florida 2001.

Z. XU, G. K. A. C. B. R. **Specific Energy for Laser Removal of Rocks**. The 20th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Jacksonville, Florida USA.: 2001.

ZEISS. **XRM FLAT PANEL USER'S GUIDE**. Pleasanton USA.: 2015.