



María Angélica Acosta Pérez

**Análise da Interação da Luz Laser de Alta Potência com
Rochas nos Processos de Perfuração por Fragmentação
Térmica**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Rio de Janeiro
julho de 2020



María Angélica Acosta Pérez

**Análise da Interação da Luz Laser de Alta Potência com
Rochas nos Processos de Perfuração por Fragmentação
Térmica**

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

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dra. Paula Medeiros Proença de Gouvêa

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Luiz Carlos Guedes Valente

Ouro Negro Tecnologias em Equipamentos Industriais S.A.

Dr. Roberth Waldo Angulo Llerena

Ouro Negro Tecnologias em Equipamentos Industriais S.A.

Dr. Giancarlo Vilela de Faria

Ouro Negro Tecnologias em Equipamentos Industriais S.A.

Rio de Janeiro, 24 de julho de 2020

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

María Angélica Acosta Pérez

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidad Francisco de Paula Santander - Colômbia em 2004. Possui Mestrado em Engenharia de Mecânica pela PUC-Rio, desenvolvendo o trabalho do Estudo Numérico da Interação entre um Jato Supersônico e uma Superfície Plana. Atualmente é pesquisadora na linha de petróleo e energia, na análise dos tipos de energia e suas aplicações.

Ficha Catalográfica

Acosta Pérez, María Angélica

Análise da interação da luz laser de alta potência com rochas nos processos de perfuração por fragmentação térmica / María Angélica Acosta Pérez; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga. – 2020.

162 f.: il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2020.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Perfuração de rochas com laser. 3. Laser de alta potência. 4. Energia específica para perfuração de rochas. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

***À minha filha Maria Victoria por me ensinar que tudo na vida
tem um propósito, e que sua presença me motiva a ser seu
exemplo e melhor pessoa.***

Agradecimentos

Agradeço inicialmente a Deus, a minha mãe María Pérez, a meu pai (R.I.P.), meu irmão Freiman Acosta, e a Miguel Carrascal o irmão que a vida me deu, pelo apoio de sempre e por me ajudar a tornar os sonhos realidade.

Ao meu orientador, Professor Arthur Braga, pelo estímulo, dedicação, apoio, e orientação durante todo o processo deste trabalho.

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

A Luiz Carlos Guedes pela orientação e pelo conhecimento compartilhado, para que os resultados fossem os melhores.

A Roberth Angulo pela ajuda e grande colaboração na montagem e desenvolvimento do projeto, além da amizade minha gratidão pelo apoio nos momentos de fraqueza.

Aos professores da PUC-Rio pelo ensino excelente, e pelos conhecimentos adquiridos.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Termociências, com quem sempre compartilhei ideias, nós apoiamos nos estudos e em especial pela amizade.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e seus funcionários pela colaboração.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Finalmente minha gratidão à PUC-RIO pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido possível.

Resumo

Acosta Pérez, María Angélica; Braga, Arthur Martins Barbosa (Orientador). **Análise da Interação da luz Laser de Alta Potência com Rochas nos Processos de Perfuração por Fragmentação Térmica.** Rio de Janeiro, 2020. 162p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste estudo é apresentada a análise da interação da luz laser de alta potência com rochas nos processos de perfuração por fragmentação térmica. O objetivo principal do trabalho é estabelecer, através de um estudo experimental, a possibilidade de utilizar a tecnologia a laser na perfuração de rochas duras, tais como o granito, quartzo, entre outros. Sua motivação encontra-se na aplicação de novas tecnologias para desenvolver ferramentas que melhorem a eficiência no processo de perfuração de poços (maior taxa de penetração), e conseguir retirar a maior quantidade de material fragilizado pela irradiação do laser. Para isto, foi necessário fazer uma montagem opto-mecânica envolvendo um sistema de limpeza que ajudasse a remover o material fragilizado pela ação do laser, usando-se gás de nitrogênio a alta pressão. Foram analisados diferentes intervalos de tempo de exposição da radiação do laser nas rochas, para avaliar a taxa de volume retirado, e a quantidade de energia específica requerida para perfurar diferentes materiais, em função da potência e do tempo de irradiação do laser. Seguindo a revisão bibliográfica na seleção do material, foram escolhidos três tipos de materiais (granito branco, granito cinza e travertino) conhecidos comercialmente no Brasil e que têm similitude (na composição química) com as rochas encontradas nas formações do Pré-sal. A partir desta seleção, foi indispensável conhecer a composição química dos materiais através de fluorescência, raios X, e Microscopia de Varredura (MEV). Além disso, estudou-se o comportamento termomecânico das rochas carbonáticas através de análises térmicas (Termogravimetria e Análise Térmico Diferencial), para identificar e compreender os fenômenos envolvidos no processo de perfuração. Os resultados obtidos são analisados para parametrizar as variáveis em consideração, melhorando as

condições do processo de perfuração por fragmentação térmica, dependendo do material estudado.

Palavras-chave

Perfuração de rochas com laser; Laser de alta potência; Energia específica para perfuração de rochas.

Abstract

Acosta Pérez, María Angélica, Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Analysis of High-Power Laser Interaction with Rocks in Thermal Spallation Drilling Process.** Rio de Janeiro, 2020. 162p. Doctoral Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study presents the analysis of the interaction of high power laser light with rocks in thermal fragmentation drilling processes. The main objective of the work is to establish, through an experimental study, the possibility of using laser technology in the drilling of hard rocks, such as granite, quartz and others. The motivation is the application of new technologies to develop tools that improve the efficiency in the well drilling process (higher penetration rate), and to be able to remove the largest amount of material weakened by laser irradiation. For this, it was necessary to make an opto-mechanical assembly involving a cleaning system that would help to remove the material weakened by the action of the laser, using nitrogen gas at high pressure. Different exposure time intervals of laser radiation in the rocks were analyzed to evaluate the volume rate removed and the amount of specific energy required to drill different materials, depending on the power and irradiation time of the laser. Following the literature review in selecting the material, three types of materials (white granite, gray granite and travertine) known commercially in Brazil and that are similar (in chemical composition) to the rocks found in the pre-salt formations were chosen. From this selection, it was essential to know the chemical composition of the materials through fluorescence, X-rays, and Scanning Microscopy (SEM). In addition, the thermomechanical behavior of the carbonate rocks was studied through thermal analysis (Thermogravimetry and Differential Thermal Analysis) to identify and understand the phenomena involved in the drilling process. The results obtained are analyzed to parameterize the variables under consideration, improving the conditions of the drilling process by thermal fragmentation, depending on the material studied.

Keywords

Laser drilling; High-power lasers; Rock drilling specific energy.

Sumário

1 . Introdução	22
1.1. Objetivos	24
1.2. Estrutura do Trabalho	25
2 . Classificação das Rochas	27
2.1. Rochas Sedimentares	28
2.2. Rochas Metamórficas	29
2.3. Rochas Magmáticas (ígneas)	30
2.4. Propriedades de Identificação	30
2.4.1. Porosidade	31
2.4.2. Peso Específico	32
2.4.3. Permeabilidade	34
2.4.4. Durabilidade	34
2.5. Propriedades Físicas das Rochas para a Perfuração	35
2.6. Alterações Físicas e Químicas nas Rochas devido a Incidência do Laser	37
2.6.1. Alterações Físicas	37
2.6.2. Alterações Químicas	39
2.7. Técnicas de Análise e Caracterização de Materiais	40
2.7.1. Análise Termogravimetria (TG)	42
2.7.2. Análise Térmica Diferencial (DTA)	47
2.7.3. Fluorescência de Raios X	49
3 . Revisão das Tecnologias de Perfuração de Poços de Petróleo	51
3.1. Perfuração Convencional	52
3.1.1. Brocas com partes móveis	53
3.1.2. Brocas sem partes móveis	53
3.2. Perfuração Térmica	53
3.2.1. Perfuração por Jatos Quentes	55
3.2.2. Perfuração por Fragmentação Hidrotérmica	57
3.2.3. Perfuração por Eletropulsão	58

3.2.4. Perfuração a Laser	59
4 . O Processo de fragmentação Térmica de Rochas	63
4.1. Mecânica da Fragmentação de Rocha Induzida a Laser	66
4.2. Fases da Perfuração a Laser	73
4.3. Interação Laser-rocha	73
4.3.1. Refletividade	76
4.3.2. Absorção	77
4.3.3. Radiação do Corpo Negro	78
4.3.4. Condutividade Térmica	79
4.3.5. Capacidade Calorífica	80
4.3.6. Difusividade	82
5 . Tipos de Lasers	83
5.1. Lasers de Alta Potência	83
5.2. Lasers HF, DF, e MIRACL.	85
5.3. Laser COIL	85
5.4. Laser de CO ₂	85
5.5. Laser de CO	86
5.6. Laser FEL	86
5.7. Laser Nd:YAG	86
5.8. Laser KrF (excimer)	87
5.9. Laser de Diodo	87
5.10. Laser a Fibra	87
6 . Metodologia	88
6.1. Montagem Opto – Mecânica da Bancada de Testes	88
6.1.1. Verificação da Potência do Laser de CO ₂	90
6.1.2. Verificação da Potência do Laser de Diodo	92
6.1.3. Montagem da Linha do Gás	93
6.2. Rochas Usadas nesta Investigação	94
6.2.1. Granito Branco e Cinza	95
6.2.2. Travertino	97
6.3. Volume do Material Fragilizado	98

6.4. Energia Específica	101
6.5. Preparação das Amostras para Análise Térmica	105
7 . Resultados e Discussões	106
7.1. Classificação dos Testes	106
7.1.1. Teste preliminar sem gás	107
7.1.2. Teste Usando Gás Nitrogênio	111
7.1.3. Teste com liquido	112
7.2. Eficiência do Processo de Perfuração	113
7.3. Análise da caracterização dos Materiais	115
7.4. Irradiação das amostras com os Lasers CO ₂ e Diodo e Utilizando Gás para a Remoção do Material	121
7.4.1. Irradiação das Amostras de Granito Branco e Cinza	124
7.4.2. Irradiação da Amostra Mármore	128
7.5. Análise do Material Fragmentado Produzido pela Irradiação do Laser	132
7.5.1. Granito Branco	132
7.5.2. Granito Cinza	135
7.5.3. Travertino	139
7.6. Energia Específica	142
8 . Conclusões e Recomendações	147
8.1. Conclusões	147
8.2. Recomendações	150
9 Referências Bibliográficas	151

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplos de estruturas de rochas (GONZÁLEZ DE VALLEJO, 2002).	31
Figura 2 – Resumo das técnicas (FÖLDVÁRI, 2011)	41
Figura 3 – Classificação dos tipos de termobalanças, (a) suspensa; (b) Balança de topo; e (c) Horizontal. (FÖLDVÁRI, 2011)	42
Figura 4 – Tipos de análise Termogravimetria (FÖLDVÁRI, 2011)	43
Figura 5 – Análise Termogravimetria de uma reação simples (FÖLDVÁRI, 2011)	44
Figura 6 – (a) Análise Termogravimetria (TG) (b) e derivada do mesmo (DTG) (FÖLDVÁRI, 2011).	46
Figura 7 – Curva DTA típica para um composto hipotético (FÖLDVÁRI, 2011).	49
Figura 8 – Perfuração de rochas por fato quente (RAUENZAHN e TESTER, 1989)	56
Figura 9 – Método de sobreposição de feixes múltiplos para perfuração de grandes diâmetros e furos profundos (FARRA, NELSON e MOAVENZADEH, 1969).	64
Figura 10 – Mudanças no método de remoção do material da descamação por fusão (GAHAN, PARKER e BATARSEH S., 2001).	65
Figura 11 – Modelo simples da cadeia de eventos que leva à fragmentação (PRESTON, 1934).	69
Figura 12 – Espectro eletromagnético (em nanômetros) (HECHT, 1992).	84
Figura 13 – Montagem de suporte do laser de CO ₂ e do laser de diodo	89

Figura 14 – Curva da potência do laser de CO ₂ no modo pulsado (5 Hz, 10%).	92
Figura 15 – Potência real e nominal do laser de diodo	93
Figura 16 – Montagem da linha de remoção do material fragilizado	94
Figura 17 – (a) Interação do laser a superfície da rocha, (b) incidência da luz na amostra de granito branco.	96
Figura 18 – Microscopia Óptica da estrutura do travertino	97
Figura 19 – Placa usada para selecionar a massa para medir o volume removido.	98
Figura 20 – Princípio de Arquimedes (MOTT, 2006).	99
Figura 21 – Gráfico do volume dos furos da lamina de metal.	101
Figura 22 – Representação dos parâmetros de perfuração (MAURER, 1980).	103
Figura 23 – Amostra depois do processo de perfuração	105
Figura 24 – Irradiação do laser de CO ₂ sem remoção do material	108
Figura 25 – Amostra de granito branco. (a) Furos a potência máxima e variando o tempo, (b) furos removendo o material fragilizado.	109
Figura 26 - (a) Variação do diâmetro com o tempo; (b) Variação da profundidade com o tempo; (c) Energia aplicada para remover certa quantidade de material.	110
Figura 27 – Eficiência com o tempo	111
Figura 28 – Perfuração usando fluxo gás contínuo para remover as camadas de material fragilizado	112
Figura 29 - (a) Perfurações feitas com o laser de CO ₂ no modo contínuo. (b) Perfuração com o laser de CO ₂ no modo pulsado, o diâmetro maior deste furo é de 11,37 mm e profundidade de 2,21 mm.	113
Figura 30 – (a) Rocha exposta a laser de CO ₂ a uma distância de 208 mm do bocal. (b) Rocha exposta a laser de CO ₂ a uma distância de 208 mm do bocal.	114
Figura 31 – Profundidade obtida para diferentes tempos de exposição da amostra ao laser e com diferentes potências.	115

Figura 32 – Morfologia dos materiais empregados, utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). (a) Amostra ANP. (b) amostra de granito cinza. (c) amostra de Travertino. (d) amostra de granito branco	117
Figura 33 – Composição química usando a Microscopia Eletrônica de Varredura dos materiais empregados (a) granito branco, (b) granito cinza, e (c) travertino.	118
Figura 34 - Variação da massa do granito branco. (a) T = 1500 °C. (b) T = 1000 °C. (c) T = 600 °C.	119
Figura 35 – Variação da massa do granito cinza (T = 1500 °C).	120
Figura 36 – Variação de massa do travertino (a) T = 1500°C. (b) segunda volta T = 1000°C. (c) Comparação das duas voltas	120
Figura 37 – Comportamento térmico dos materiais analisados. (a) Granito branco. (b) Travertino. (c) Granito cinza.	121
Figura 38 – Diferenças de resultado na perfuração do granito branco que podem ser atribuídas à não homogeneidade do material (a) laser de CO ₂ máxima potência, tempo de exposição 10s. (b) laser de CO ₂ máxima potência, tempo de exposição 10s.	122
Figura 39 – Perfuração usando nitrogênio para limpar o material removido em granito branco.	123
Figura 40 – Furo à potência máxima com um tempo de 120 seg (Granito branco). (a) remoção do material manualmente (profundidade de 2,95 mm), e (b) usando nitrogênio para limpar o material removido (profundidade de 9,84 mm).	123
Figura 41 – Volume de material retirado em função da energia luminosa total utilizada. Pontos vermelhos sem retirar material fragilizado e pontos azuis com a retirada do material fragilizado com o nitrogênio entre irradiações do laser.	124
Figura 42 – Perfil do processo de perfuração do granito branco	125
Figura 43 – Sequência do processo de perfuração do granito cinza usando jatos de gás nitrogênio para remover o material fragilizado.	126

Figura 44 – Comparação dos lasers de CO ₂ e laser de diodo nas mesmas condições de trabalho para uma amostra de granito branco.	127
Figura 45 – Análise usando laser (CO ₂ e Diodo) no granito branco nas mesmas condições de trabalho. (a) energia necessária para remover certa quantidade de volume. (b) Eficiência dos lasers.	128
Figura 46 - (a) Densidade superficial de potência óptica insuficiente para fragilizar o material; (b) Material alterado que permanece no local e precisa ser retirado; (c) Regiões que sofreram efeito da radiação e posterior retirada do material fragilizado na forma de pó.	129
Figura 47 – Vista da transformação da composição química do travertino	129
Figura 48 – (a) Perfuração travertino laser CO ₂ (t = 60 s) (b) Furo passante no travertino pela irradiação do laser de CO ₂	130
Figura 49 – (a) Volume de material retirado em função da energia luminosa total utilizada, (b) Energia específica em função do tempo entre os jatos de gás de nitrogênio, (c) Profundidade perfurada em função do tempo com ambos os lasers em diversas condições de exposição.	131
Figura 50 – Variação da massa dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do granito branco (T = 1500 °C).	132
Figura 51 – Comportamento térmico dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do granito branco.	133
Figura 52 – Identificação das zonas para a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura	134
Figura 53 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura. (a) Região perfurada. (b) zona fronteira da região perfurada. (c) zona afastada da perfuração. (d) Região não perfurada.	134
Figura 54 – Imagem microscópica da lâ no granito cinza	135
Figura 55 – Criação de lâ no granito cinza pelo aumento da temperatura.	136

Figura 56 – Análise com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da lã de vidro gerada no granito cinza em diferentes pontos.	137
Figura 57 – Comportamento térmico dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do granito cinza.	138
Figura 58 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura no granito cinza. (a) Região perfurada. (b) fronteira da região perfurada. (c) Região não perfurada.	139
Figura 59 – Variação da massa dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do travertino ($T = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$).	140
Figura 60 – Comportamento térmico dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do travertino.	140
Figura 61 – Morfologia da amostra antes e depois do processo de perfuração	141
Figura 62 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura. (a) Região perfurada. (b) Região perfurada.	142
Figura 63 – Aspecto de furos em granito branco obtidas com laser de diodo (980 nm) à esquerda e com laser de CO_2 (10,6 μm) imagem à direita	142
Figura 64 – (a) Energia específica para perfuração com laser de CO_2 (10,6 μm), (b) Energia específica em função do volume retirado para perfuração com laser de diodo (980 nm).	143
Figura 65 – Resultados com ambos os lasers. (a) Energia empregada para remover o material fragilizado. (b) Eficiência do processo de perfuração no granito cinza.	144
Figura 66 – Testes a diferentes tempos de exposição do feixe do laser.	144
Figura 67 – (a) Energia aplicada para remover certa quantidade de material fragilizado pelo Laser de CO_2 . (b) Energia aplicada para remover certa quantidade de material fragilizado pelo laser de diodo.	145
Figura 68 - Profundidade perfurada em função do tempo com ambos lasers em diversas condições de exposição.	145

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Valores da porosidade de solos e rochas (ROCHA, 1981)	32
Tabela 2 – Valores do peso específico seco de algumas rochas (ROCHA, 1981)	33
Tabela 3 – Permeabilidade de solos e rochas (ROCHA, 1981)	34
Tabela 4 – Temperaturas de Decomposição e Dissociação para Alguns Minerais (SOBOL, 1995)	40
Tabela 5 – Técnicas de análise térmica	41
Tabela 6 – Refletividade (ρ_r) de alguns minerais para radiação no espectro visível no mesmo comprimento de onda (BATARSEH, 2001)	76
Tabela 7 – Refletividade de minerais em função de diferentes comprimentos de onda (λ) no visível (BATARSEH, 2001).	77
Tabela 8 – Coeficiente de corpo negro (ϵ) em função da temperatura (BATARSEH, 2001).	78
Tabela 9 – Especificações dos lasers utilizados	90
Tabela 10 – Resultados com o sensor de alta potência do laser de CO ₂	91
Tabela 11 – Resultados com o sensor de alta potência do laser de diodo	92
Tabela 12 – Dados experimentais para o cálculo do volume dos furos	100
Tabela 13 – Dados obtidos no primeiro teste	108
Tabela 14 – Resultados semi-qualitativos obtidos nesta análise	116
Tabela 15 – Energia Específica	146
Tabela 16 – Volume retirado para diferentes energias específicas (tempo entre os jatos de gás 10 segundos)	146

Lista de Símbolos

V	Volume total
V_v	Volume de vazios
γ	Peso específico
γ_d	Peso específico seco
W	Peso total da amostra de rocha
W_s	Peso total da amostra de rocha seca na estufa
K	Coefficiente de permeabilidade
I_D	Índice de durabilidade
λ	Comprimento de onda
P	Potência
P_N	Potência nominal
P_R	Potência real
T	Temperatura
q	Fluxo constante de energia do laser
K	Difusividade térmica da rocha
k	Condutividade térmica da rocha
ρ	Densidade da rocha
c	Calor específico da rocha
t	tempo de exposição do laser
E	Energia aplicada
V_r	Volume removido
h	Profundidade atingida

Nomenclatura

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

BHA – *Bottom Hole Assembly*

ROP – *Rate of Penetration* – Taxa de penetração

FEL – *Free Electron Laser* – Laser Eletrônico Livre

MIRACL – *Mid-infrared advanced chemical laser*

COIL – *Chemical Oxygen Iodine laser*

HF – Fluoreto de Hidrogênio

DF – Fluoreto de deutério

PDC – Brocas de diamantes artificiais

CW – *Continuous Wave* – Onda continua

RP – *Range-gated Pulsed* – Pulsado por intervalos

SE – Energia específica

XRF – *X-ray fluorescence* – Fluorescência de Raio-X

TG – *Thermogravimetric Analysis* – Termogravimetria

DTG – *Differential Thermogravimetric Analysis* – Termogravimetria

Diferencial

DTA (*Differential Thermal Analysis*) Análise Térmico Diferencial

1.

Introdução

Um dos principais desafios na perfuração de rochas carbonáticas é superar a dureza do material, que afeta a vida útil das brocas utilizadas, e na taxa de penetração (ROP) durante a perfuração. (ALVES SILVA, ARAGAO LIMA, *et al.*, 2009), relataram os desafios enfrentados e as lições aprendidas quando a Petrobras (empresa nacional de petróleo) perfurou com técnicas convencionais os primeiros oito (8) poços na camada do pré-sal na Bacia de Santos. É bastante claro que novas tecnologias de perfuração capazes de aumentar a taxa de penetração em carbonatos podem trazer ganhos econômicos substanciais na exploração do petróleo de Pré-sal no Brasil. Uma nova tecnologia de perfuração viável que poderia ser usada nesta aplicação é a perfuração de rochas com o uso de lasers (XU, REED, *et al.*, 2004).

A tecnologia laser desperta grandes interesses, pois consegue adicionar inúmeras vantagens. Entre as mais destacadas é que o colimador do laser é mantido afastado da superfície da rocha, não havendo, portanto, desgaste da ferramenta de corte, tem-se uma atmosfera controlada, alta densidade, a eficiência energética, a velocidade de perfuração, entre outros; a utilização destes lasers em poços é uma técnica que não há sido desenvolvida comercialmente já que não se conta com lasers que suportem a potência mínima necessária para uma perfuração eficiente e competitiva em comparação com dispositivos mecânicos. Embora diferentes estudos mostrem que o uso do laser tem uma aplicação diversificada, devido aos benefícios que abarcam mercados como a indústria aeroespacial, medica etc.

Nas últimas décadas, inúmeras empresas e laboratórios vêm estudando esta tecnologia, apresentado avanços significativos no uso da perfuração de poços petrolíferos, na extração de minerais ou no canhoneio. Há um grande interesse em reduzir o seu custo, contudo isto apresenta melhoras no desenvolvimento de

ferramentas híbridas onde cabeças de laser encontram-se ligados a uma broca de perfuração. Ao ser irradiada a superfície da rocha pelo feixe do laser, acontece o efeito de espalação, que induz microfissuras que permitem a fácil remoção das camadas de material fragmentado com a broca (BRAGA BARBOSA e MARTELLI, 2015).

A necessidade de desenvolver um método de perfuração mais barato e confiável de perfurar rochas duras foi gerada devido ao interesse recente em extrair a energia geotérmica em rochas secas quentes (HDR – “Hot Dry Rock”) em formação (TESTER, HERZOG, *et al.*, 2007). A quantidade de energia que pode ser extraída de HDR é limitada pela segunda Lei da Termodinâmica. Uma vez que as temperaturas geotérmicas aumentam linearmente com a profundidade, resultam poços mais profundos com um maior potencial para geração de energia. Um bom HDR típico teria de 3 - 8 km de profundidade e ocorreria em rochas graníticas subterrâneas. Assim, uma tecnologia capaz de reduzir substancialmente os custos associados à perfuração de rochas duras aumentaria o número de locais praticáveis para o uso de HDR e beneficiaria sua utilização como uma fonte de energia. Por isso, o custo de perfuração é um fator principal a ser considerado durante a avaliação econômica das atividades de exploração desta fonte de energia.

A fragmentação térmica é definida como a fratura de uma superfície sólida em pequenos discos ou flocos chamados de escamas. Isso ocorre devido ao rápido aquecimento na parte da superfície da rocha exposta à radiação. Este aquecimento rápido induz tensões térmicas de compressão devido à tendência da rocha a expandir-se quando a temperatura é elevada. A restrição a esta tendência é imposta pela existência da rocha fria circundante. Estas tensões causam a propagação de fissuras pré-existentes na rocha, fraturando assim a superfície em pequenas escamas.

O processo de perfuração por fragmentação térmica envolve diversos mecanismos termodinâmicos que são relativos ao comportamento de rochas, sendo fenômenos isoladamente abertos. Neste estudo uma parte destes mecanismos será levada em conta para compreender os fenômenos físicos

envolvidos no processo de perfuração. A fim de caracterizar a importância dos diferentes parâmetros influenciando na taxa de penetração na rocha, é necessário conhecer a quantidade de energia requerida para remover o material fragmentado, dependendo do material a ser irradiado pelo laser.

1.1. Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal avaliar a possibilidade de utilizar a tecnologia a laser na perfuração de rochas duras, tais como o granito, quartzo entre outros. Para isto, se analisaram dois tipos de lasers, um laser de CO₂ e um laser de diodo, a fim de caracterizar a importância dos diferentes parâmetros influenciados no processo de perfuração utilizando esta técnica, tais como a taxa de penetração na rocha, a quantidade de energia requerida em função da potência e do tempo de interação laser-rocha. Na seleção do material se teve em conta o encontrado na literatura estudada. Levando em consideração estes dados se estudaram três amostras de rochas (travertino, granito branco e granito cinza) conhecidas comercialmente no Brasil.

No decorrer do trabalho, são estudados diferentes intervalos de tempo de exposição da radiação do laser nas rochas, para avaliar a taxa de volume retirado, a quantidade de energia específica requerida para perfurar diferentes materiais, em função da potência e do tempo de irradiação do laser. Para este fim, foi necessário montar um sistema de limpeza que permitisse a remoção do material fragilizado pela ação do laser.

A partir destas condições é indispensável conhecer a composição química dos materiais através de fluorescência, raios X, Microscopia de Varredura (MEV) e análise térmica, e assim identificar os processos térmicos envolvidos durante a perfuração, a fim de analisar e comparar os resultados obtidos com os dois lasers em relação aos tempos e eficiências dos mesmos.

1.2. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em nove (9) capítulos e um anexo, assim distribuídos:

O capítulo 1. Apresenta introdução, os objetivos para o desenvolvimento da tese, e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2. Apresenta a classificação das rochas de acordo com a natureza de seu conteúdo mineral, além das propriedades físicas e químicas, e como estas podem afetar o processo de perfuração. É dada ênfase nas técnicas de análise e caracterização que são parte fundamental desta pesquisa e ajudam a compreender os fenômenos que ocorrem na interação do laser-rocha.

O capítulo 3. Contém a revisão das tecnologias de perfuração de poços de petróleo: descreve conceitos gerais sobre as tecnologias de perfuração, apresentando uma revisão bibliográfica das técnicas de perfuração.

O Capítulo 4. Trata de forma sucinta como ocorre o processo de fragmentação térmica nas rochas, abordando diferentes aspectos levados em consideração nas fases de perfuração a laser. Foi necessário discutir quais são as propriedades da rocha que interferem na interação laser-rocha, e como é transferida a energia sob a superfície da mesma.

Capítulo 5. São apresentados os tipos de lasers que podem ser utilizados no processo de perfuração, em relação a seu funcionamento e características.

Capítulo 6. Descreve a metodologia empregada para o desenvolvimento dos testes. A metodologia é experimental para a obtenção dos resultados, onde se tiveram em conta diversos parâmetros dos lasers empregados, como o tempo de exposição, modo de operação contínuo e/ou pulsado, potência. Além disso, foi implementado um sistema que permitisse a remoção do material fragilizado pela ação do laser, levando em consideração cada material testado.

Capítulo 7. É apresentada a análise dos resultados tendo em conta os parâmetros já estabelecidos no capítulo 6, com os quais se pretende comparar a eficiência destas técnicas de perfuração com a técnica convencional de perfuração de rochas duras. Para compreender os fenômenos físicos que ocorrem neste processo foram feitas análises de fluorescência, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), e as análises térmicas, Termogravimetria (TG) e análise diferencial térmica (DTA).

O Capítulo 8. Destina-se às conclusões e recomendações para trabalhos futuros, evidenciando os próximos passos que deverão ser dados dentro do tema abordado.

Finalmente, o capítulo 9 apresenta a bibliografia que foi o apoio para o desenvolvimento da tese.

2. Classificação das Rochas

Uma rocha é constituída de um mineral ou da associação de dois ou mais minerais que mantêm certa uniformidade de composição e de características na crosta terrestre. Entretanto, podem ocorrer rochas constituídas, essencialmente, de um só mineral, como no caso do calcário e do mármore, sendo os dois formados pelo mineral calcita (carbonato de cálcio) (DE OLIVEIRA MENESES, 2013).

Os minerais mais importantes que entram na formação das rochas pertencem a dois grupos: os minerais félsicos e os minerais máficos. Os primeiros são ricos em silício e alumínio, e incluem feldspatos, quartzos, entre outros; os segundos contêm ferro e magnésio, e incluem piroxênios, olivinas e biotina. Para reconhecimento de uma rocha, além da composição mineral, é importante analisar sua estrutura, a textura, e a dureza de seus minerais.

Em geral, as rochas são classificadas em três grupos: as rochas sedimentares, metamórficas e ígneas (magmáticas). De acordo com a natureza de seu conteúdo mineral, as rochas podem ser agrupadas em quatro categorias diferentes, monominerálica, vidro natural, matéria orgânica e poliminerálica.

- As rochas monominerálicas consistem de um só mineral que se apresenta em grande volume, tanto que é considerada uma parte integrante da estrutura da Terra; são exemplos o calcário, o mármore e o dunito. O calcário é uma rocha sedimentar, o mármore é de natureza metamórfica e o dunito é de origem ígnea.
- O vidro natural, que embora com frequência, seja quase homogêneo, não tem uma composição que possa ser expressa por uma fórmula química porque varia de um lugar a outro na mesma massa rochosa. O vidro natural é conhecido como obsidiana ou vidro dos vulcões. Geralmente, visto com o

auxílio de um microscópio, o vidro natural não mostra nenhum elemento cristalino, ou seja, trata-se de material amorfo de origem ígnea.

- A matéria orgânica, que é uma substância de origem animal ou vegetal, também pode formar corpos de rochas. O fosfato de cálcio proveniente do excremento de aves, em geral acumulado em certas ilhas oceânicas, recebe o nome de guano.
- As rochas poliminerálicas são um agregado de dois ou mais minerais, com ou sem massa fundamentada de vidro natural; muitas dessas rochas contêm uma dúzia de minerais diferentes, observáveis principalmente sob lente de grande aumento. Alguns exemplos são: o granito, que é uma rocha ígnea; o gnaisse, que é uma rocha metamórfica; e o arcóseo, que é uma rocha sedimentar (DE OLIVEIRA MENEZES, 2013).

2.1. Rochas Sedimentares

As rochas sedimentares são rochas formadas através da deposição, e consequente cimentação ou consolidação, de fragmentos provenientes de material mineral ou material orgânico (SUGUIO, 2003).

No caso do material mineral, os respectivos fragmentos, denominados de detrito geológico, são provenientes de meteorização e de erosão. Estes fragmentos minerais são transportados pelo gelo, vento, água, movimento de massas geológicas ou glaciares, sendo estes agentes denominados de agentes de denudação. No caso do material orgânico, os respectivos fragmentos, denominados de detrito biológico, são geralmente provenientes de corpos e partes de organismos subaquáticos, essencialmente conchas, assim como das suas massas fecais. As rochas carbonáticas pertencem a este grupo de rochas, as quais são do interesse deste trabalho, fazendo importante conhecer o comportamento em quanto a compostos e a formações.

- Rochas sedimentares clásticas (mecânicas): são compostas por fragmentos de materiais derivados de outras rochas. São compostas basicamente por sílica (ex: quartzo), com outros minerais comuns,

como feldspato, anfibólios, argilominerais e, raramente, alguns minerais ígneos mais exóticos. A granulometria (tanto o tamanho médio, como a gama de tamanhos de partículas), a composição das partículas, do cimento e da matriz (o nome dado às pequenas partículas presentes nos espaços entre os grãos maiores) são características importantes. Em relação à granulometria, pode dizer-se que, por exemplo, a argila pertence ao grupo com partículas mais finas, os arenitos com partículas de tamanho intermédio, e os conglomerados formados por partículas maiores.

- Rochas sedimentares biogênicas: são formadas por materiais gerados por organismos vivos, como corais, moluscos e foraminíferos, que cobrem o fundo do oceano com camadas de calcita, que podem mais tarde formar calcários. Outros exemplos incluem os estromatólitos, e o sílex encontrado em nódulos em giz (que é em si uma rocha sedimentar biogênica, uma forma de calcário).
- Rochas sedimentares quimiogênicas: podem se formar quando em soluções minerais, tais como a água do mar que se evapora. Os exemplos incluem o calcário, a halita e o gesso.

2.2. Rochas Metamórficas

Rochas metamórficas são rochas que resultam da transformação da rocha original, o protólito. O protólito dá origem a uma rocha metamórfica porque sofre transformações químicas e físicas quando é submetido a temperaturas e pressões elevadas e à atuação de fluidos que causam erosão (metassomatose) em zonas profundas da crosta terrestre, sem que, contudo, cheguem a fundir (a não ser, talvez, parcialmente). Alguns exemplos de rochas metamórficas são o gnaiss, a ardósia, o mármore, o xisto, e o quartzito.

Na classificação das rochas metamórficas, torna-se importante referir o conceito de fácies metamórfica. Segundo o qual a composição mineralógica de

rochas metamórficas depende apenas da sua composição química, se o metamorfismo que se gerou ocorreu à mesma temperatura e pressão. Assim, consegue-se determinar as condições de temperatura e pressão nas quais se originou uma rocha apenas pela análise dos tipos de associação de minerais que estas apresentam (SUGUIO, 2003).

2.3. Rochas Magmáticas (ígneas)

As rochas ígneas, também chamadas de rochas magmáticas ou rochas eruptivas, são um dos três principais tipos de rocha (sendo que as outras são as rochas sedimentares e as rochas metamórficas). A formação das rochas ígneas vem do resultado da consolidação devida ao arrefecimento do magma derretido ou parcialmente derretido. Elas podem ser formadas com ou sem a cristalização, ou abaixo da superfície como rochas intrusivas (plutônicas) ou próximas à superfície, sendo rochas extrusivas (vulcânicas). O magma pode ser obtido a partir do derretimento parcial de rochas pré-existentes no manto ou na crosta terrestre. Normalmente, o derretimento é provocado por um ou mais dos três processos: o aumento da temperatura, diminuição da pressão ou uma mudança na composição.

O processo de solidificação é complexo e nele podem distinguir-se a fase ortomagmática, a fase pegmatítica-pneumatolítica e a fase hidrotermal. Estas rochas são compostas de feldspato (59,5%), quartzo (12%), piroxênios e anfíbolitos (16,8%), micas (3,8%) e minerais acessórios (7%). As rochas ígneas podem, de maneira geral, ser classificadas sob dois critérios: texturais e mineralógicos (DE OLIVEIRA MENEZES, 2013).

2.4. Propriedades de Identificação

A rocha intacta é constituída por uma assemblagem mais ou menos compacta de grãos cristalinos e, em alguns casos, matéria amorfa. O termo matriz rochosa poderá ser mais apropriado, uma vez que poderá existir já algum grau de alteração e fracturação nesse aglomerado de grãos. A Figura 1 apresenta alguns exemplos de matrizes rochosas com diferentes texturas, características dos tipos

de rochas referidos. As rochas são sólidos policristalinos, descontínuos, que podem exibir certa anisotropia derivada de uma orientação preferencial na sua estrutura.

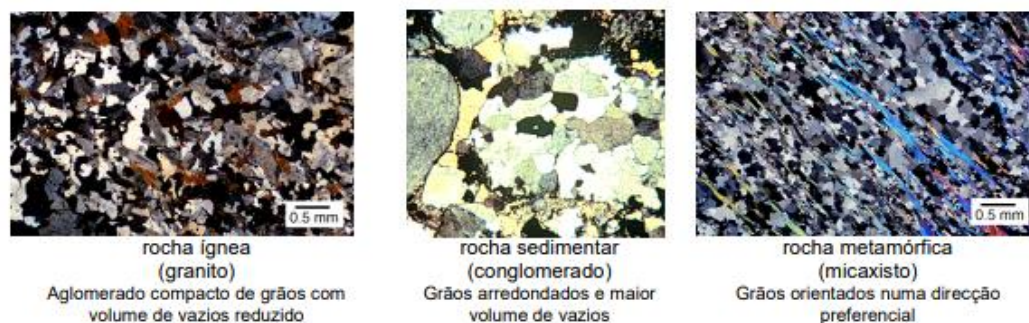


Figura 1 – Exemplos de estruturas de rochas (GONZÁLEZ DE VALLEJO, 2002).

As rochas são então constituídas por grãos minerais sólidos interligados e por descontinuidades ou vazios existentes entre esses grãos. As propriedades da matriz rochosa dependem, assim, das características destes grãos (mineralogia), sendo muito influenciadas pelo tamanho e arranjo espacial dos grãos minerais (estrutura ou textura da rocha) e também pela forma, quantidade e distribuição das descontinuidades ou vazios. A determinação da composição mineralógica das rochas conduz a sua caracterização, juntamente com a sua textura, tamanho dos grãos, cor, e outras propriedades. Referem-se em seguida algumas propriedades físicas mais importantes na identificação das rochas.

2.4.1. Porosidade

As descontinuidades representam os defeitos ou vazios existentes no meio contínuo formado pelos minerais constituintes da matriz rochosa. A presença e o desenvolvimento destes vazios estão estreitamente relacionados com a deformação e a rotura das rochas. A quantidade de vazios é avaliada pela porosidade (n), que é a razão entre o volume de vazios de uma amostra de rocha e o seu volume total.

$$n = \frac{V_v}{V} * (100) \quad (1)$$

A porosidade é normalmente expressa em percentagem, considerando-se para as rochas 10% como um valor médio, 5% um valor baixo e 15% um valor alto. Nos solos, onde os grãos minerais podem se separar mais facilmente (pelo menos por agitação na água), a porosidade assume valores substancialmente maiores (Tabela 1). Os vazios são constituídos pelos poros e fissuras da rocha, e não estão necessariamente todos interligados. A porosidade total (n) resulta assim da porosidade correspondente aos poros (n_p) e da porosidade das fissuras (n_f).

Tabela 1 – Valores da porosidade de solos e rochas (ROCHA, 1981)

Tipos de rocha ou solo	Porosidade máxima (%)
Solo	> 50
Areia e seixo	20 – 47
Argila	> 49
Areia cimentada	5 – 25
Arenito	10 – 15
Calcário e mármore	5
Calcário oolítico	10
Cré	Até 50
Rochas ígneas	< 1,5
Rochas metamórficas	Geralmente muito baixa

Por esta razão, são definidos dois tipos de porosidade para as rochas: a total e a efetiva. Esta última corresponde ao volume de vazios acessível à passagem de fluidos, normalmente a água. Em uma escala maior, para os maciços rochosos, podemos ainda distinguir a porosidade primária, correspondente ao volume dos poros entre os fragmentos das rochas clásticas, e a porosidade secundária, produzida pela fracturação e alterações posteriores da rocha. A porosidade primária é característica de toda a massa rochosa e a porosidade secundária depende da história de alteração da rocha, podendo variar muito no mesmo maciço rochoso.

2.4.2.

Peso Específico

Peso específico (γ) é o peso da unidade de volume da rocha. Atendendo à variabilidade da quantidade de água presente na rocha, considera-se o peso específico seco (γ_d) da rocha como um parâmetro mais representativo.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (2)$$

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (3)$$

W – Peso total da amostra de rocha

W_s – Peso total da amostra de rocha seca na estufa

V – Volume total da amostra de rocha

Pode-se notar na Tabela 2 a maior densidade característica das rochas ígneas e metamórficas em comparação com as das rochas sedimentares.

Tabela 2 – Valores do peso específico seco de algumas rochas (ROCHA, 1981)

Rochas	γ_d (KN/m³)
Granito	26,0
Diorito	27,9
Basalto	27,1
Sal-gema	20,6
Gesso	22,5
Calcário denso	20,9
Argilito	22,1
Xisto argiloso	25,7
Mármore	27,0
Micaxisto	27,6

A quantidade de água na rocha pode ser quantificada pelo teor em água (w), que é a razão entre o peso da água presente numa determinada amostra e o seu peso seco. O peso específico da rocha é, por esse motivo, muito variável.

$$w = \frac{W_w}{W_s} * (100) \quad (4)$$

2.4.3. Permeabilidade

A facilidade de escoamento da água através de um meio contínuo é avaliada através do coeficiente de permeabilidade (k). A permeabilidade das rochas, em comparação com a dos solos, é geralmente muito baixa (Tabela 3). O seu valor cresce sensivelmente com a fissuração e o grau de alteração. O nível de anisotropia da permeabilidade depende da orientação preferencial das fissuras.

Tabela 3 – Permeabilidade de solos e rochas (ROCHA, 1981)

Rocha	n	k (m / seg.)
Areia uniforme	29 - 50	$5,0 \times 10^{-5} - 2,0 \times 10^{-3}$
Areia e seixo	20 - 47	$1,0 \times 10^{-5} - 1,0 \times 10^{-3}$
Areia siltosa	23 - 47	$1,0 \times 10^{-5} - 5,0 \times 10^{-5}$
Argilas	> 49	$1,0 \times 10^{-10} - 1,0 \times 10^{-7}$
Granodiorito	0,004-0,005	$9,8 \times 10^{-11}$
Granito	0,008	$1,96 \times 10^{-10}$
Basalto	0,007	$2,94 \times 10^{-10}$
Calcário 1	0,004	$9,8 \times 10^{-11}$
Calcário 2	0,03	$9,8 \times 10^{-10}$
Calcário 3	0,39	$7,65 \times 10^{-6}$

O estado de tensão na rocha influencia consideravelmente a sua permeabilidade. O aumento das tensões de compressão provoca o fechamento das fissuras e a diminuição da permeabilidade. No entanto, a partir de certo limite, o aumento das tensões pode iniciar o aparecimento de novas fraturas, provocando o aumento da permeabilidade. A permeabilidade da rocha pode também variar com a pressão da água que circula nos seus vazios e descontinuidades: o aumento da pressão da água tende a abrir as fissuras, aumentando a permeabilidade.

A caracterização da permeabilidade da rocha (e dos maciços rochosos) voltará a ser abordada no contexto das classificações de maciços rochosos.

2.4.4. Durabilidade

A durabilidade é a resistência da rocha aos processos de alteração e fragmentação, sendo também conhecida por alterabilidade. O contato da rocha com a água e o ar, muitas vezes através de obras de engenharia civil como

escavações e terraplenos, pode ocasionar a degradação das suas características mecânicas.

O ensaio *slake durability test* (Teste de Durabilidade de Slake) consiste em submeter material rochoso previamente fragmentado a ciclos normalizados de secagem, umidificação e ação mecânica. Os fragmentos são colocados dentro de redes metálicas cilíndricas com determinada abertura, parcialmente imersas na água, que rodam em torno de um eixo horizontal. O choque dos fragmentos de rocha entre si e o contato com a água favorecem a sua desagregação e alteração. A secagem dos fragmentos é realizada em estufas, após a qual podem ser aplicadas outra umidificação e ação mecânica.

O índice de durabilidade (I_D) (eq. (5)) corresponde à percentagem de rocha seca que fica retida nos tambores de rede metálica após 1 ou 2 ciclos completos (I_{D1} ou I_{D2}) (GONZÁLEZ DE VALLEJO, 2002).

$$I_D(\%) = \frac{\text{Peso seco depois de um ou dois ciclos}}{\text{Peso inicial da amostra}} \quad (5)$$

2.5. Propriedades Físicas das Rochas para a Perfuração

A eficácia de qualquer método para perfuração de poços profundos é determinada em grande parte pelas propriedades físico-mecânicas da rocha e principalmente pelas propriedades de resistência, elasticidade e viscoelástica. Além dos valores absolutos das propriedades da rocha, sua dependência da temperatura, pressão dos poros, tensões *in situ* e ciclos de descarregamento-recarregamento desempenham um papel importante.

Quando um poço é perfurado, a rocha que circunda o buraco deve suportar a carga que foi anteriormente retirada pela rocha removida. Como resultado, as tensões *in situ* são significativamente modificadas perto da parede do furo. Um aumento significativo no estresse resulta em torno da parede do furo, ou seja, uma

concentração de estresse. O problema básico é conhecer e ser capaz de prever a reação da rocha à carga mecânica alterada. Esse é um problema clássico, embora não muito fácil, da mecânica das rochas.

A estabilidade do poço, uma grande preocupação em perfurar poços profundos até 10 km de profundidade, é amplamente dominada pelo sistema de tensão *in situ* em comparação com as propriedades de resistência da rocha na profundidade considerada, bem como a temperatura correspondente. A distribuição de tensão local em torno de um poço é controlada por efeitos mecânicos (tensões no local), químicos, térmicos e hidráulicos.

Se as tensões redistribuídas ao redor do furo excederem a resistência da rocha, em tensão ou compressão, poderá ocorrer instabilidade no furo. As falhas do furo induzido por tensão podem ser agrupadas nas seguintes classes:

- Colapso ou ampliação do furo devido a falha de rocha quebradiça na parede.
- Redução do tamanho do furo devido a falha dúctil da rocha apresentada pelo fluxo plástico independente da rocha no furo.
- Divisão de tração da rocha devido a pressões excessivas no poço.

Existe uma grande variedade de modelos analíticos e numéricos para prever tensões no poço e modos de instabilidade para quase todas as condições de carregamento possíveis, geometrias do poço, propriedades da rocha e fluidos do poço.

Para avaliar o potencial de estabilidade do poço, um modelo constitutivo realista deve ser usado para calcular as tensões e/ou deformações ao redor do poço. As tensões e deformações calculadas devem então ser comparadas com um determinado critério de falha. Inúmeros critérios de falha de cisalhamento, como Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, von Mises, critérios Lade modificados e outros, são propostos na literatura. O modelo de falha de cisalhamento Mohr-Coulomb é um dos modelos mais amplamente utilizados para avaliar o colapso do furo.

Sob temperaturas mais altas e pressões *in situ*, a eficiência de muitos métodos de perfuração não é conhecida. Muito provavelmente, eles se tornarão menos eficientes devido ao comportamento das rochas dúcteis a temperaturas elevadas em profundidades maiores.

Por esse motivo, o estudo das propriedades elásticas das rochas sob altas temperaturas é de grande importância prática e teórica.

2.6.

Alterações Físicas e Químicas nas Rochas devido a Incidência do Laser

As alterações físicas e químicas nas rochas dependem de parâmetros como composição da rocha, estrutura cristalina, porosidade, saturação da água, dureza, resistência, elasticidade, densidade de potência do laser, comprimento de onda, banda de absorção de radiação e largura do pulso do laser.

Podem ocorrer de três a quatro zonas de influência do laser nas rochas (BARENBLATT, KRASILOVA, *et al.*, 1970). A primeira é uma zona central de intensa destruição térmica e vaporização, que parece um buraco. A segunda zona é caracterizada por intensa fusão e cristalização com nova formação de vidro. Esta zona é seguida por uma terceira zona de modificações térmicas, fissuras e fragmentos. A última zona é uma zona periférica de deformações não elásticas. Vaporização, fusão e tensão térmica (LARKINA, 1976) (SOBOL, 1995) (SOBOL e UGLOV, 1983) ocorrem na formação, mas também existem outros efeitos, como sublimação, decomposição química, reconstrução da estrutura cristalina, formação de ondas de choque e alteração das propriedades magnéticas. Todos esses processos dependem da densidade de potência do laser, e da superfície e tipo da rocha.

2.6.1.

Alterações Físicas

Lasers de alta potência resultam em alta energia, que pode causar fragmentos, fusão e vaporização da rocha (DULEY, 1983). Os lasers de alta potência também podem causar a formação de uma espuma (efluente gasoso) e a

formação de plasma (efluente gasoso que se condensa em um sólido na superfície da rocha). A superfície e o plasma refletem, dispersam e absorvem energia, e reduzem a transferência de energia para a amostra de rocha. O processo de fissuração e fragmentação de rochas térmicas (LARKINA, 1976) (KUZNETSOV, 1981) (KUZNEZOV e PROTASOV, 1979) (KUZNETSOV e SHAFRANOV, 1975) consome a menor quantidade de energia.

A fusão de rochas, também conhecida como destruição térmica de rochas, depende das propriedades refratárias e da temperatura de fusão. O grau de destruição é proporcional à temperatura de fusão. Os materiais fundidos consistem em componentes refratárias que refletem o raio laser muito melhor do que as rochas não fundidas. Este fenômeno reduz a transferência da radiação laser para as rochas (BATARSEH, 2001). Por exemplo, se a rocha contivesse minerais como biotita e hornblenda, uma substância semelhante ao vidro fundido formado estaria ao redor do furo. Neste caso específico, novos minerais piroxênios serão formados, tais como ligas minerais ou vidros.

(ERNEST, 1972) estudou em detalhes o comportamento de fases e transformações minerais. Os estudos foram baseados em trabalhos teóricos e gráficos de correlação foram construídos para estimar a temperatura de fusão. Nesta pesquisa, a temperatura de fusão foi obtida a partir de ambos os métodos; teórico e experimental. Houve diferenças entre os dados obtidos a partir da correlação de fases (teórica) e os métodos experimentais. A diferença nos dados obtidos a partir dos métodos teórico e experimental é que o laser gera uma temperatura muito alta que não está na faixa dos gráficos extrapolados.

A tensão induzida termicamente é outra mudança física. (LARKINA, 1976), (SOBOL e UGLOV, 1983), e (SOBOL, 1995) investigaram a expansão térmica devido à heterogeneidade de rochas, o que causa não homogeneidade na distribuição de temperatura e, portanto, produz alteração volumétrica nas transformações de fase. As tensões térmicas podem ser divididas em tensões termoelásticas durante o aquecimento do laser e tensões residuais que ocorrem devido a não homogeneidade das deformações plásticas na rocha. As tensões

térmicas podem causar destruição de rochas de duas formas: primeiro fissuras e fragmentos na superfície da rocha e segundo, fragilização da rocha.

A fragilização das rochas térmicas (SCHENNIKOV, 1971) ocorre após a irradiação de rochas com um laser de CO₂ de baixa potência ($P = 500 \text{ W}$). O calor faz com que a nova zona do furo reduza sua resistência mecânica de 30 a 50 vezes (deformação não elástica), dependendo do tipo de rocha.

O grau de fragilização depende da composição mineral e das ligações estruturais. Por exemplo, em rochas que contêm quartzo, como granito e arenito (SCHENNIKOV, 1971), a diminuição da dureza e das propriedades mecânicas é menor em comparação a rochas de baixo teor de quartzo, como no caso do xisto. Em outras palavras, a dureza diminui com o aumento na porcentagem de quartzo.

Por outro lado, (BARENBLATT, KRASILOVA, *et al.*, 1970) demonstraram que ocorre o contrário, onde a dureza diminuiu significativamente nas rochas que continham uma baixa porcentagem de quartzo.

2.6.2. Alterações Químicas

As alterações químicas das rochas devido às interações com o laser são a decomposição, vaporização e sublimação das rochas.

A decomposição, dissociação e transformação química de rochas térmicas são fenômenos que ocorrem através do uso de lasers. Alguns minerais têm suas propriedades químicas alteradas (produtos gasosos gerados através de reações químicas) sob a influência da radiação laser. Por exemplo, o mármore é afetado pela radiação laser quando ocorre a dissociação térmica e é produzido dióxido de carbono (CO₂) (SOBOL, 1995).



As temperaturas de decomposição e dissociação para alguns minerais estão na Tabela 4. Quando se trata da decomposição de rochas, devem ser levadas em consideração questões de segurança porque alguns subprodutos que resultam da destruição do granito, arenito e basalto são tóxicos (como óxidos de Si, Al, Pb, Fe e Mg, flúor volátil e cloro).

Tabela 4 – Temperaturas de Decomposição e Dissociação para Alguns Minerais (SOBOL, 1995)

Mineral	Temperatura °C
Calcita	885
Mármore	850
Pirita	690
Dolomita	500
Magnesita	373
Siderita	282

A vaporização e sublimação de rochas (SOBOL e UGLOV, 1983) (SAMOKHIN e USPENSKII, 1981) (LYUBOV e SOBOL, 1976) consomem mais energia do que a fusão. É necessária uma energia específica de 20 kJ/cm^3 – 40 kJ/cm^3 para a vaporização e sublimação de rochas, enquanto que é necessária a energia específica de 3 kJ/cm^3 – 6 kJ/cm^3 para a fusão. Foi realizado um experimento para estudar os fenômenos por radiação do laser de CO_2 com densidade de potência (intensidade) de $\sim 10 \text{ kW/cm}^2$ (FLINN e TROJAN, 1981).

2.7. Técnicas de Análise e Caracterização de Materiais

A caracterização dos materiais faz referência à identificação de um material a partir do estudo de suas propriedades físicas, químicas, estruturais, entre outras. Para isto, existem diferentes tipos de técnicas de caracterização, levando em consideração o interesse de cada material. Uma vez conhecidas as características, pode-se estabelecer a natureza do mesmo, assim como suas possíveis aplicações.

A análise térmica é definida como uma série de técnicas que medem as propriedades físicas dos materiais em função da temperatura, quando estes são submetidos a um ciclo térmico. A Figura 2 apresenta um resumo das técnicas mais usadas. As propriedades físicas dos materiais incluem massa, temperatura, entalpia, dimensão, características dinâmicas e outras. Dependendo das propriedades a serem medidas, as principais técnicas de análise térmica podem ser classificadas como mostra a Tabela 5.

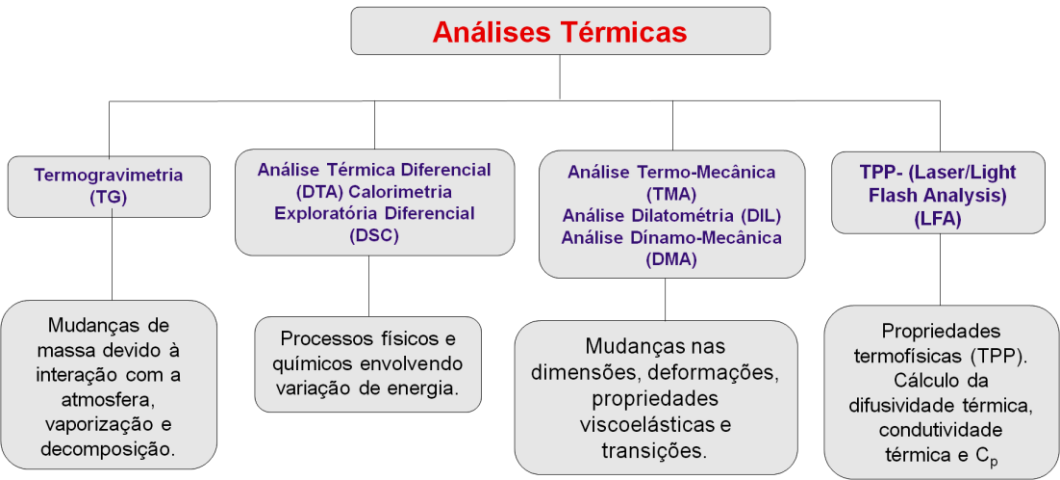


Figura 2 – Resumo das técnicas (FÖLDVÁRI, 2011)

Tabela 5 – Técnicas de análise térmica

Parâmetro Medido	Definição da Técnica
Massa	Termogravimetria (TG)
Variação de massa (dm/dt)	Termogravimetria Diferencial (DTG)
Temperatura ($T_0 - T_f$)	Análise Térmica Diferencial (DTA)
Entalpia (dH/dt)	Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)
Deformação (Volume ou comprimento)	Análise termo-mecânica (dilatometria)
Condutividade térmica	Detecção de gases envolvidos (EGD)
Espectrometria ou Cromatografia	Análise de gases envolvidos (EGA)

Todas as técnicas de análise térmica na Tabela 5 são amplamente utilizadas em diferentes campos de pesquisa e aplicação industrial, como polímeros, produtos farmacêuticos, argilas, minerais, catalisadores, metais e ligas, etc.

Alguns deles são bastante específicos para um tipo de material, outros são de aplicação mais geral. Especificamente, a análise Termogravimetria (TG), a - Análise Térmica Diferencial (DTA) serão estudadas em detalhes neste capítulo. Também é possível realizar análise térmica de materiais combinada com outros tipos de técnicas não térmicas, como espectroscopia no infravermelho, espectrometria de massa, etc., dando origem a outro grupo de técnicas que podem ser incluídas na definição geral.

2.7.1. Análise Termogravimetria (TG)

A Análise Termogravimetria (TG, *Thermogravimetric Analysis* em inglês) é a técnica utilizada para medir as variações de massa (perda ou ganho de massa em função da temperatura) de uma amostra durante o aquecimento (ou resfriamento) ou quando mantida a uma temperatura específica. Os principais itens medidos nesta técnica são: evaporação, sublimação, decomposição, oxidação, redução, e adsorção e dessorção de gás. Este tipo de técnica é aplicável quando se deseja acompanhar variações de massa envolvidas em um experimento, sendo seus resultados de ordem quantitativa.

A medida destas variações é realizada por uma termobalança. Normalmente, estas termobalanças são classificadas em três categorias, segundo a forma de acondicionamento da amostra, conforme é mostrado na Figura 3.

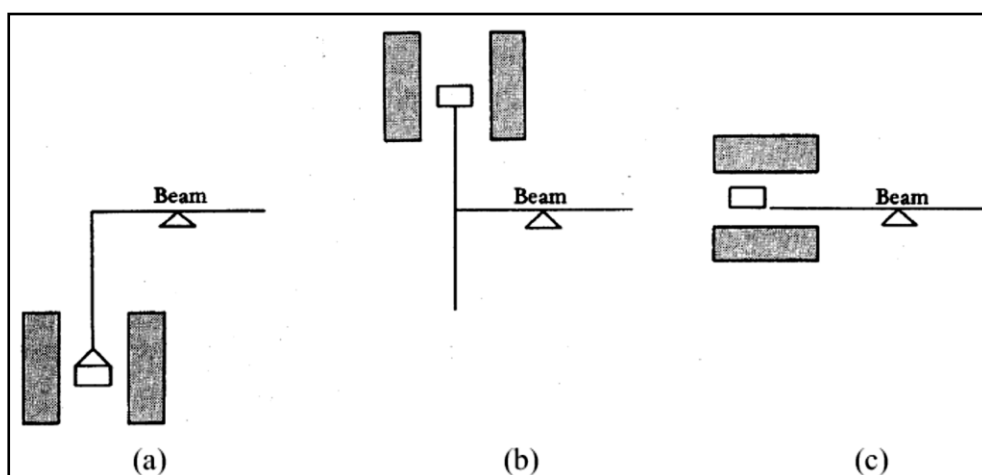


Figura 3 – Classificação dos tipos de termobalanças, (a) suspensa; (b) Balança de topo; e (c) Horizontal. (FÖLDVÁRI, 2011)

Basicamente, podem ser definidos três tipos de análise Termogravimetria, como se mostra na Figura 4:

1. Análise Termogravimetria isotérmica, na qual as alterações de massa são registradas a uma temperatura constante (Figura 4 a).
2. Análise Termogravimetria quase isotérmica, na qual a amostra a ser analisada é aquecida quando a massa é constante e a temperatura estabiliza, enquanto as mudanças de massa estão ocorrendo (Figura 4 b).
3. Análise Termogravimetria dinâmica, na qual a amostra é aquecida, em uma determinada atmosfera, com uma rampa de temperatura controlada (Figura 4 c).

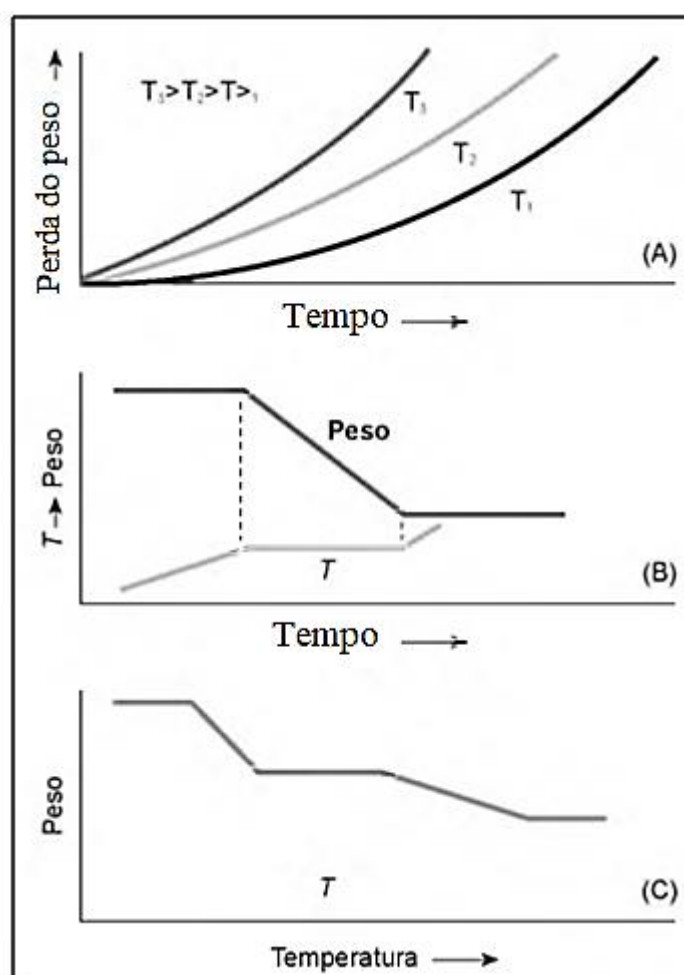


Figura 4 – Tipos de análise Termogravimetria (FÖLDVÁRI, 2011)

A curva que representa a variação da massa em função da temperatura fornece informações sobre a estabilidade térmica e a composição da amostra original, a estabilidade térmica e a composição dos intermediários que podem ser formados durante a análise, e a composição do resíduo que permanece.

A Figura 5 representa esquematicamente uma curva de análise Termogravimetria de um processo simples em que o sólido A se decompõe no sólido B e no gás C, que é emitido. A perda de massa do sólido A é ΔM . A temperatura inicial (T_i) é definida como a temperatura na qual a perda de peso começa a ser registrada, enquanto a temperatura final (T_f) é definida como o ponto em que a perda máxima de peso é atingida, ou a temperatura na qual o processo termina. A faixa de temperatura do processo (ΔT) é conhecida como faixa de $T_f - T_i$, que é quando a taxa de aquecimento é linear e o processo endotérmico é sempre > 0 .

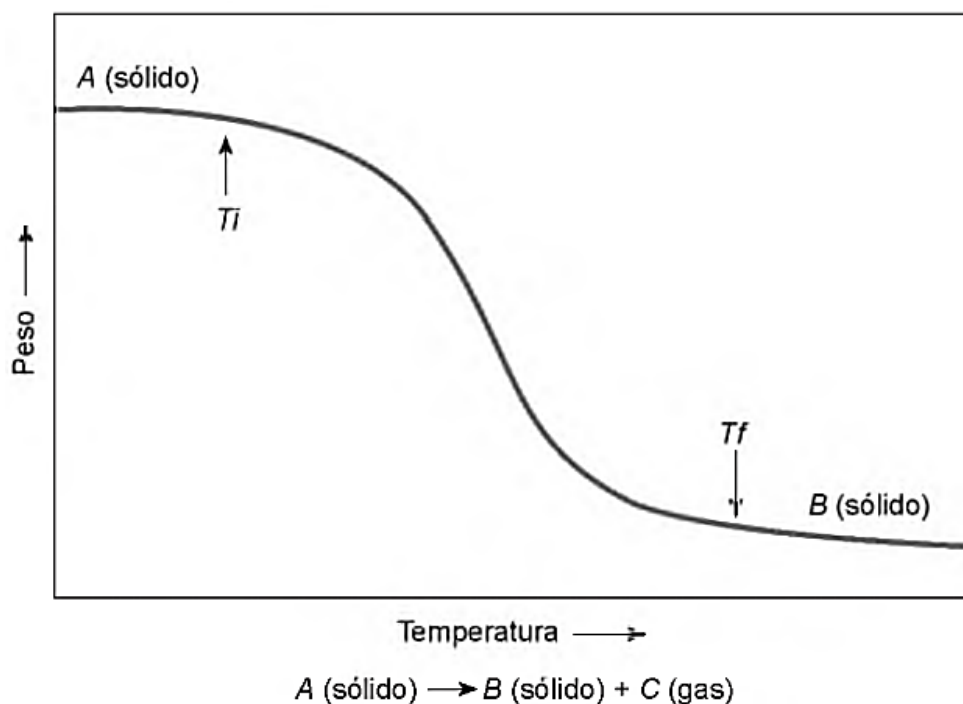


Figura 5 – Análise Termogravimetria de uma reação simples (FÖLDVÁRI, 2011)

Em geral, a estabilidade térmica é definida como a propriedade de uma substância ou material para manter suas propriedades inalteradas durante um processo de aquecimento. A análise Termogravimetria é uma ferramenta

extremamente útil para estudar a estabilidade térmica de materiais sob diferentes condições experimentais.

Como em qualquer técnica analítica, existem vários fatores que afetam a natureza, exatidão e otimização das medições. No caso da análise Termogravimetria, devido à natureza dinâmica das alterações produzidas na amostra em função da temperatura, há um grande número de fatores que podem influenciar a medição. Alguns dos mais importantes estão detalhados abaixo.

- Fatores instrumentais (dependentes da termobalança)
- Amostra de taxa de aquecimento.
- Atmosfera em que a análise é realizada.
- Geometria da fornalha e do suporte de amostras.
- Sensibilidade do equipamento.
- Composição do suporte da amostra.

A curva obtida ao fazer a derivada da análise Termogravimetria pode fornecer, em certos casos, informações adicionais àquelas obtidas diretamente do termograma. A derivada pode ser representada indistintamente em relação ao tempo ou à temperatura, junto à curva de peso eq. (7).

$$\frac{dm}{d(T \text{ o } t)} = f(T \text{ o } t) \quad (7)$$

Nesse caso, a curva apresenta uma série de picos em vez da curva escalonada típica obtida no termograma (Figura 6), com os máximos da curva da Termogravimetria Diferencial (DTG, *Differential Thermogravimetric Analysis* em inglês) correspondendo aos pontos de inflexão das curvas TG.

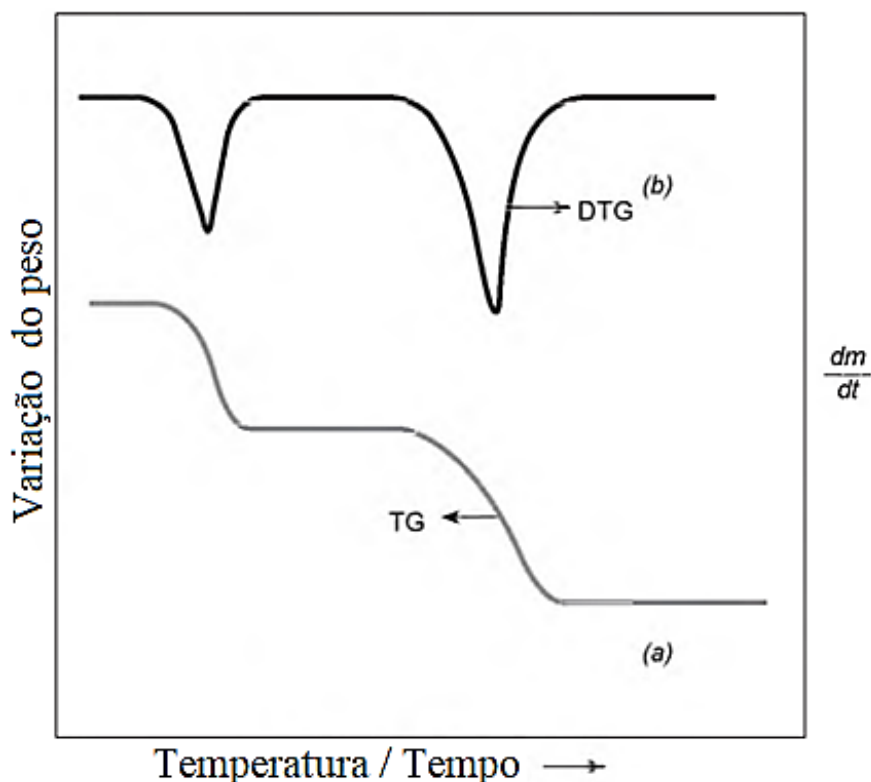


Figura 6 – (a) Análise Termogravimetria (TG) (b) e derivada do mesmo (DTG) (FÖLDVÁRI, 2011).

As informações que a Termogravimetria Diferencial – DTG pode fornecer são as seguintes:

- Permite a determinação rápida da temperatura na qual a velocidade de perda de massa é máxima (T_{max}).
- A área do pico do DTG é proporcional à perda de massa.
- Permite, em certas ocasiões, a separação de picos sobrepostos e até a análise numérica do registro (deconvolução), que permite a caracterização e quantificação de efeitos altamente sobrepostos.
- A comparação dos picos de DTG com os que podem ser obtidos nas análises térmicas diferenciais permite saber quais picos de DTG correspondem à perda de massa e quais não.
- A altura do pico do DTG em uma determinada temperatura fornece a velocidade da perda de massa nessa temperatura. Esses valores podem ser usados para obter informações sobre a cinética do processo a partir da eq. (8):

$$-\frac{dm}{dt} = Ae^{(-E/RT)}f(m) \quad (8)$$

A Termogravimetria é um método de análise quantitativa muito confiável e reproduzível e, como tal, tem sido amplamente utilizado em uma ampla variedade de aplicações em campos tão variados como metalurgia, pintura, cerâmica, mineralogia, alimentos, química inorgânica e orgânica, polímeros, bioquímica, catálise e muitos outros.

Algumas das aplicações em que esse tipo de análise térmica é usado são:

- Decomposição térmica de materiais inorgânicos, orgânicos ou poliméricos.
- Corrosão de metais em diferentes atmosferas a altas temperaturas.
- Reações em estado sólido.
- Calcinação e torrefação de minerais.
- Destilação e evaporação de líquidos.
- Pirólise de carvão, óleo e madeira.
- Determinação da pureza e composição dos medicamentos.
- Estabilidade térmica de polímeros.
- Teor de aditivos em plásticos.
- Composição de misturas de polímeros e copolímeros.
- Determinação de umidade, teor de voláteis ou quantidade de cinzas.
- Velocidades de evaporação e sublimação.

2.7.2.

Análise Térmica Diferencial (DTA)

Entre as diferentes técnicas que permitem medir uma propriedade de uma substância em função da temperatura, vale destacar os métodos de análise térmica. A Análise Térmica Diferencial (DTA, *Differential Thermal Analysis* em inglês) baseia-se no registro da temperatura de uma amostra em comparação com a de um material termicamente inerte quando a amostra é aquecida ou resfriada a uma taxa constante em uma atmosfera controlada. As mudanças de temperatura na amostra em relação à referência são devidas aos processos exotérmicos ou endotérmicos

que ocorrem nela, como os produzidos por fusão, ebulição, sublimação, vaporização, mudanças de fase, inversões da estrutura cristalina, processos de adsorção, reações químicas de desidratação, dissociação, decomposição, oxidação, redução, etc. Fenômenos como desidratação, redução ou alterações de fase dão origem a efeitos endotérmicos, enquanto processos de oxidação, decomposição ou adsorção produzirão efeitos exotérmicos. Como consequência desses processos, é obtido um termograma diferencial no qual a diferença de temperatura entre a amostra e a referência ($\Delta T = T_m - T_r$) é registrada em relação à temperatura do sistema, que está sendo modificada.

Processos exotérmicos, nos quais o calor é liberado da amostra, causam um aumento de temperatura em relação à referência e dão origem aos máximos no termograma. Por outro lado, processos endotérmicos causam mínimos na curva como consequência da absorção de calor pelo analito ou material em estudo. Assim, picos são obtidos em termogramas diferenciais cujas áreas dependem da massa da amostra, da entalpia do processo, da condutividade térmica da amostra e de certos fatores geométricos que serão discutidos posteriormente. O perfil do termograma obtido permite, em certos casos, a identificação das substâncias em estudo. Pode também fornecer informações qualitativas sobre os aquecimentos que entram em jogo em cada processo ou, se as entalpias de transformação são conhecidas, pode ser útil em determinar a quantidade de substância que dá origem à referida mudança.

A Figura 7 apresenta uma curva DTA típica para um composto hipotético que ilustra quatro tipos diferentes de transições. A primeira mudança na curva do termograma (I) corresponde a uma transição de segunda ordem, característica dos materiais poliméricos amorfos vitrificados, na qual há uma alteração na capacidade de calor do material quando aquecido, embora não haja alteração na entalpia que envolve absorção ou liberação de calor. Apenas uma diminuição ocorre na linha de base e nenhum pico é observado, uma vez que a variação de entalpia é nula. A transição II é típica de um processo endotérmico, como a fusão de um composto. Picos mais amplos com o perfil da transição III são mais típicos de reações químicas de dissociação ou decomposição. Processos exotérmicos,

como os causados por alterações na fase cristalina, resultariam em picos como o da transição IV.

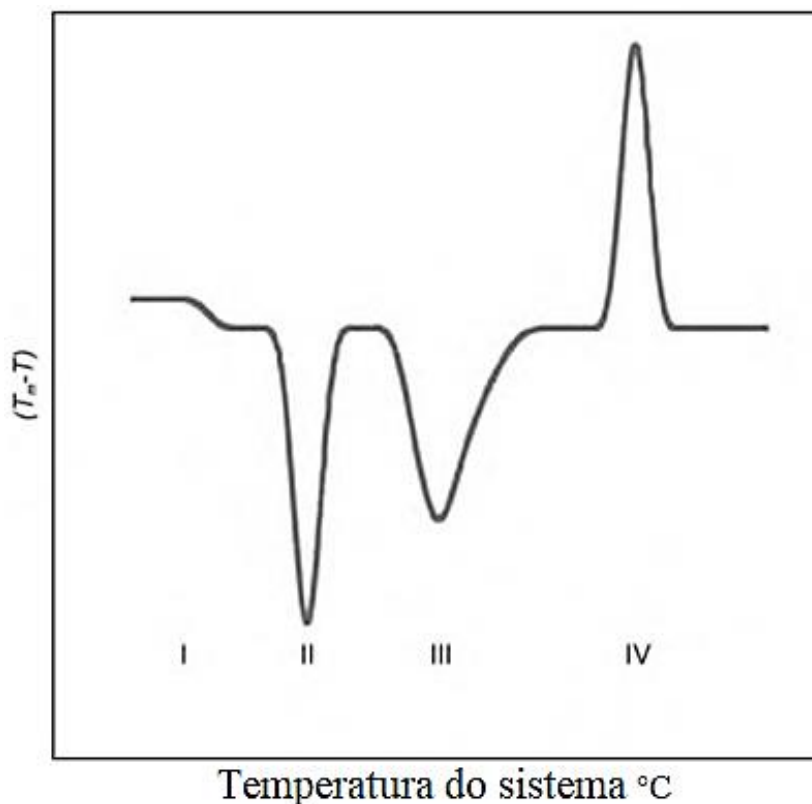


Figura 7 – Curva DTA típica para um composto hipotético (FÖLDVÁRI, 2011).

2.7.3. Fluorescência de Raios X

A fluorescência de raios X (XRF, do inglês *X-ray fluorescence*) é uma técnica de espectrometria atômica baseada na detecção da radiação X emitida por átomos excitados. Os fótons fluorescentes são característicos de cada elemento em questão e sua intensidade determina a concentração desse elemento. Esta técnica é utilizada para fins qualitativos e quantitativos, tanto em amostras sólidas ou líquidas. Ela é amplamente aplicada no controle ambiental, análise de resíduos, polímeros, minerais ligas e compostos orgânicos (AMARO, ACOSTA PEREZ, *et al.*, 2012).

Uma característica é a alta necessidade de energia específica de ionização, e a radiação de raios X é energética o suficiente. No entanto, para alcançar a reação de fluorescência, a absorção fotoelétrica pelo elemento tem que ocorrer,

principalmente por um fóton de alta energia de uma radiação de raios X, interagindo com a matéria. Uma vez absorvida a energia, um elétron perto do núcleo é expulso do átomo.

A quantificação ou análise quantitativa de diferentes elementos ou compostos pode ser realizada utilizando métodos de absorção espectroscópica e de emissão. Os métodos de absorção atômica são baseados na quantidade de energia absorvida pelo analito ao passar de um estado de baixa energia a um estado de alta energia. Nos casos de espectroscopia de emissão, onde a espectrometria de fluorescência de raios X está incluída, a energia libertada sob a forma de fluorescência é quantificada quando o elétron passa de uma órbita de maior energia para uma órbita de menor energia. Neste caso específico, a radiação de raios X é necessária para produzir fluorescência em certos materiais; isto é utilizado para fins de identificação e quantificação.

Embora a XRF tenha limitações para uma caracterização química abrangente (cerca de 80 elementos podem ser registrados), esta técnica pode revelar a existência de certos elementos que permitem diferenciar a composição de certos elementos. Com esta técnica, é possível determinar a concentração de elementos que estão entre o Sódio ($Z = 11$) e o Urânio ($Z = 92$). No entanto, esta técnica não pode ser utilizada para determinar elementos leves tais como hidrogênio, oxigênio, carbono, nitrogênio devido à baixa energia dos seus raios X característicos e ao seu baixo desempenho de fluorescência. Ela pode ser aplicada a sólidos ou líquidos, orgânicos ou inorgânicos, tais como lítico, cerâmica, pastas, pigmentos, vegetais, ossos, metais, etc. A análise pode ser não destrutiva e imediata.

Esta técnica foi de suma importância no desenvolvimento da pesquisa desenvolvida neste trabalho, uma vez que ela ajudou a determinar a composição química dos materiais estudados. Estas análises foram feitas em amostras originais e do material fragilizado pela ação dos lasers, o qual permitiu conhecer os compostos envolvidos em cada uma das amostras.

3. Revisão das Tecnologias de Perfuração de Poços de Petróleo

A perfuração de um poço de petróleo é desenvolvida basicamente com a mesma tecnologia desde o século 19. As rochas são perfuradas pela atuação rotativa de uma broca localizada na extremidade de uma coluna de perfuração. Os fragmentos de rocha são removidos por um fluído de perfuração ou lama injetado por bombeamento nesta coluna. Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada e uma coluna de revestimento em aço de diâmetro inferior ao da broca e colocada no poço. A cimentação é então executada entre os tubos de revestimento e a rocha de formação, garantindo a segurança do poço. Em seguida, a coluna de perfuração é novamente descida no poço com uma nova broca de diâmetro menor que a anterior, e assim sucessivamente, até o final da perfuração (THOMAS, 2004).

A perfuração rotativa tem sido o método de perfuração mais utilizado na indústria de petróleo e gás desde 1900, quando sua implementação substituiu a perfuração de sonda (AKPEDEYE, 2010). Este método utiliza uma broca rotativa que é forçada sobre a rocha, consequentemente esmagando-a, e é usado para a perfuração de poços de água, petróleo, gás e geotérmica. Apesar da eficiência da perfuração rotativa ter aumentado desde a sua primeira introdução no mercado, ainda existem certos desafios que aumentam os custos e diminuem a velocidade de perfuração.

As condições geológicas da região onde o poço está localizado têm um grande impacto no custo da perfuração rotativa. Um estudo (LUKAWSKI, ANDERSON, *et al.*, 2014) mostrou uma relação exponencial entre o custo de perfuração e a profundidade do poço. Esta relação foi atribuída às rochas duras cristalinas, que são predominantes na perfuração de poços profundos. Em um

cenário alternativo, onde diferentes tipos de rochas estão arranjadas em camadas, durante o processo de perfuração é necessário fazer várias paradas para mudar a broca, de forma que está se adeque à cada rocha específica (HATCHER, 2003). Isto reduz a velocidade geral de perfuração e, portanto, aumenta o custo.

O desgaste da broca também contribui para ineficiências no processo de perfuração. Além da usinagem de rochas duras, as altas temperaturas envolvidas na perfuração subterrânea profunda também afetam a broca (TESTER, HERZOG, *et al.*, 2007). Pesquisas postulam que o aumento na vida útil da broca reduziria o custo total do poço em 5% (VOLLMAR, WITTIG e BRACKE, 2003).

Apesar de avanços técnicos na ferramenta de perfuração e nos acessórios terem provocado uma ligeira redução no custo de perfuração dos poços, os desafios mencionados acima motivaram pesquisa e desenvolvimento focados em novos métodos de perfuração que sejam mais eficientes, que poderão reduzir os custos e aumentar a taxa de penetração na rocha.

Assim, alguns métodos de perfuração alternativos utilizam energia térmica. Estes métodos empregam principalmente o uso de energia térmica para exercer tensão sobre a rocha. A remoção da rocha pode ser conseguida através de fusão e vaporização ou através da fragmentação. Estes métodos têm a vantagem da ausência de contato entre a ferramenta e a superfície da rocha. Como a ferramenta não está sujeita ao desgaste sofrido por uma broca convencional, espera-se que o uso desses métodos reduza o tempo de paradas para manutenção e reparo de brocas, reduzindo assim o tempo total de perfuração (AUGUSTINE, 2009).

3.1. Perfuração Convencional

Hoje em dia, existem diferentes técnicas de perfuração. As técnicas convencionais utilizam brocas como ferramenta de corte, que podem ser brocas com partes móveis ou brocas sem partes móveis.

3.1.1.

Brocas com partes móveis

As brocas de partes móveis permitiram que a perfuração rotativa competisse com o método de percussão em formações mais duras. Ultimamente, a perfuração para percussão vem sendo praticada na perfuração de poços de água, de superfície e, raramente, em aplicações especiais em poços de petróleo. Praticamente todas as brocas com partes móveis têm o mesmo mecanismo de corte. Elas são formadas por cones que realizam movimentos circulares. É importante notar que essas brocas possuem uma sincronia que permite com que todos os cones girem sem que os seus dentes se interceptem em nenhum ponto. As principais vantagens desses movimentos circulares são a penetração direta na rocha e a trituração desta em pedaços que posteriormente são levados para a parte superior da coluna, até que sejam expulsos (PASCOAL DE MORAIS, 2014).

3.1.2.

Brocas sem partes móveis

As brocas sem partes móveis são aquelas que têm elementos cortantes fixos aos corpos. Estas têm como características operacionais a utilização da potência hidráulica da sonda de perfuração para obter altas velocidades de escoamento do fluido através da face da broca para resfriar os cortadores e remover os cascalhos do fundo do poço. Esse resfriamento constante evita o desgaste prematuro dos cortadores, possibilitando que a broca esteja sempre em contato com a superfície da rocha durante o processo de perfuração. As brocas sem partes móveis podem ser classificadas da seguinte forma: brocas de lâminas de aço; brocas de diamantes naturais; e brocas de diamantes artificiais (PDC) (PASCOAL DE MORAIS, 2014).

3.2.

Perfuração Térmica

O mecanismo de fragmentação térmica é utilizado desde o início do século XIX (PRESTON, 1926) (PRESTON e WHITE, 1934). A fragmentação térmica envolve a aplicação de tensão térmica para fraturar a superfície da rocha. A aplicação de energia térmica na rocha leva ao derretimento da rocha. Um

aquecimento maior leva à vaporização. Existem diferentes métodos de perfuração que utilizam o derretimento como um modo de remoção de rocha. O método é principalmente dependente de falhas (micro-fissuras) inerentes à formação rochosa. Na aplicação de calor, as tensões térmicas são geradas devido ao acentuado gradiente de temperatura entre a superfície da rocha e as camadas subjacentes, causando a extensão de microfissuras. A energia térmica pode ser fornecida usando uma chama, jato de água sobreaquecido, micro-ondas ou feixe de laser. A fragmentação térmica tem encontrado ampla aplicação na perfuração de pequenos orifícios para instalação de explosivos e outras aplicações na mineração.

Deve ser considerado, porém, o fato de que a perfuração por fragmentação depende da capacidade das rochas de girar. Experimentos por (WILLIAMS, POTTER e MISKA, 1996) indicaram que certas rochas dúcteis (calcário, arenito macio, xisto) não se fragmentavam sob aplicação de calor contínuo. Entretanto, (XU, REED, *et al.*, 2004) determinaram que a fragmentação de rochas macias e dúcteis ocorreu sob regime de aquecimento e arrefecimento alternados da rocha.

A fragmentação depende em grande parte da energia aplicada à rocha. A zona de fragmentação da rocha ocorre logo abaixo de sua temperatura de fusão. A aplicação inicial de calor cria tensões térmicas no material, devido à baixa taxa de difusão na rocha. A aplicação contínua de calor aumentaria a temperatura da rocha até ao ponto de fusão, sem fragmentar (GAHAN, BATARSEH e SIEGFRIED, 2006). Portanto, o delicado equilíbrio entre o fornecimento de fluxo de calor e a temperatura superficial da rocha deve ser mantido dentro da região de transição plástico-frágil.

Outro aspecto da fragmentação térmica que deve ser considerado é a limitação da área de aplicação do fluxo de calor. Estudos de (RAUENZAHN, 1989) indicaram que a aplicação do fluxo de calor deve ser limitado a 10% da superfície rochosa, para garantir que as tensões térmicas induzidas não sejam aliviadas, o que impediria a fragmentação.

Estima-se que a perfuração por fragmentação térmica poderia resultar em tempos de parada mais curtos e aumento geral da velocidade de perfuração.

Os métodos mais populares de perfuração por fragmentação térmica são perfuração por jatos quentes, fragmentação hidrotérmica, perfuração por eletropulsão, e perfuração a laser.

3.2.1.

Perfuração por Jatos Quentes

O método mais popular de fragmentação térmica é a perfuração com jatos quentes, que deve a sua popularidade às altas taxas de penetração que são alcançáveis em tipos de rochas duras (AUGUSTINE, 2009) (TESTER, ROBERT, *et al.*, 1995). A perfuração por jatos quentes utiliza o fluxo de gás do queimador para a remoção de fragmentos do local da perfuração.

A Browning Engineering Company, em meados dos anos 70, alcançou uma taxa média de penetração de 52 ft/h (15,8 m/h) ao perfurar granito utilizando a tecnologia de jatos quentes (BROWNING, 1981). A comparação entre a perfuração por jatos quentes e a perfuração por métodos convencionais, que atingem uma taxa média de penetração de 16,2 ft/h (4,9 m/h), indica uma melhoria. Outra vantagem deste método é a sua capacidade de perfurar furos muito estreitos e furos de até 20 vezes o diâmetro da saída do bocal (SILVA, NETTO, *et al.*, 2006). Isto significa que a perfuração por jatos quentes pode ser usada tanto para perfuração de poços como para a sua conclusão.

Nos últimos 20 anos, as aplicações de perfuração por jatos quentes têm sido limitadas à perfuração de furos rasos (menos de 0,5 km) a pressões ambientes (RAUENZAHN, 1989) (RAUENZAHN e TESTER, 1989). Existem várias razões para isto. Primeiro, a perfuração através deste método só pode ser realizada em um ambiente cheio de ar, devido à necessidade de manter a chama acesa, bem como para a remoção dos fragmentos no local da perfuração (Figura 8). Devido às altas pressões na perfuração profunda, o furo cheio de ar nestas condições é amplamente instável, agravado pela intrusão de água, o que pode dificultar a remoção de fragmentos com gás (POTTER, POTTER e WIDEMAN, 2010).

Outra limitação na perfuração de grandes diâmetros de furo é a redução da velocidade devido à elevação dos gases de escape. A eficiência da remoção de fragmentos é, portanto, impedida (WILLIAM, 1985). Além disso, a perfuração profunda requer um fluido de perfuração de alta densidade, comumente conhecido como lama de perfuração, que além de transportar partículas, serve para equilibrar a pressão no poço. No entanto, utilizar a lama de perfuração prejudicaria a ignição e manutenção da chama em um ambiente cheio de líquido.

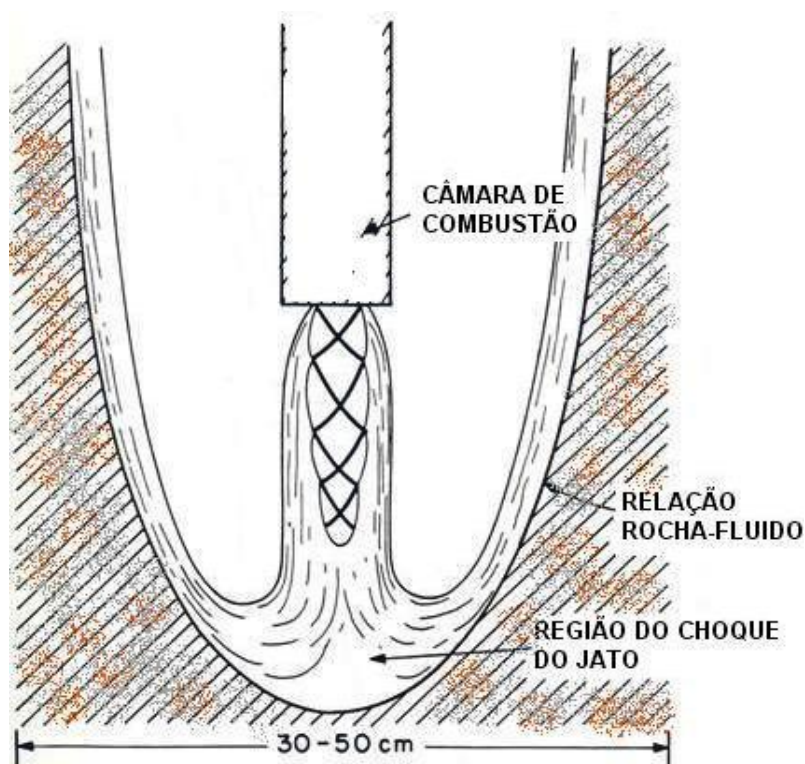


Figura 8 – Perfuração de rochas por fogo quente (RAUENZAHN e TESTER, 1989)

As atuais pesquisas estão concentradas no estudo da viabilidade do uso da fragmentação por jatos quentes em poços geotérmicos profundos. (AUGUSTINE, POTTER, *et al.*, 2007) desenvolveram uma chama capaz de operar em um ambiente de alta pressão e densidade. A chama hidrotérmica utiliza o princípio da combustão hidrotérmica, onde o processo de oxidação ocorre em condições supercríticas quando o ambiente é aquoso denso (AUGUSTINE e TESTER, 2009). Os resultados demonstraram um fluxo de calor gerado de $0,5 \text{ MW/m}^2$ em comparação com 1 MW/m^2 para a fragmentação em ambiente de baixa densidade à pressão ambiente. Apesar desta variação, o fluxo de calor gerado ainda estava dentro do intervalo capaz de induzir a fragmentação.

Uma vantagem adicional da chama hidrotérmica é o potencial para uso em condições supercríticas. (ROTHENFLUH, 2013), estimou que a pressão hidrostática do poço excedesse a pressão crítica da água a uma profundidade de 2200 m, que é a condição adequada para a ignição e combustão da chama hidrotérmica.

Outra limitação da fragmentação por jatos quentes é a ameaça de segurança que representa a possibilidade de combustão em poços de petróleo e gás (Technical and Economic Evaluation of Thermal Spallation Drilling Technology, 1984). No entanto, este problema não ocorre na perfuração geotérmica, onde este método é utilizado. A aplicação da fragmentação por jatos quentes na extração de minerais próximos à superfície tem sido bem-sucedida, onde os fragmentos gerados são processados para minerais preciosos.

3.2.2.

Perfuração por Fragmentação Hidrotérmica

A perfuração por fragmentação hidrotérmica é o meio de perfuração que utiliza um jato de fluido a alta temperatura para fornecer calor ao processo. Este método foi projetado como uma das soluções para o desafio do uso de jatos quentes no ambiente do fundo do poço. O método utiliza chamas hidrotermais dentro de uma câmara de combustão para aquecer um fluxo de água, que é ejetada do bocal a altas temperaturas capazes de causar fragmentação (VON ROHR, ROTHENFLUH e SCHULER, 2015).

Uma comparação entre perfuração mecânica e perfuração por fragmentação hidrotérmica do granito indica uma taxa de penetração de 15 ft/h (4,6 m/h) e 40 ft/h (12 m/h), respectivamente (WIDEMAN, SAZDANOFF, *et al.*, 2011). Além disso, o processo foi considerado eficaz nas pressões supercríticas prevalentes em perfurações profundas. Portanto, isso significa uma redução geral nos custos de perfuração profunda, onde há rochas cristalinas duras. Este método também tem a vantagem de oferecer um melhor controle de trajetória porque não há contato com a superfície da rocha (POTTER, POTTER e WIDEMAN, 2010). O

maior obstáculo à eficiência do método de perfuração por fragmentação hidrotérmica é à entrada do fluido de perfuração para a região do jato de água quente. Isso causa perda de calor no jato antes que a energia possa ser transferida para a rocha.

3.2.3. Perfuração por Eletropulsão

A pesquisa inicial sobre a perfuração por eletropulsão começou nos anos 70, com a noção de tensão elétrica pulsante para geração de uma onda de choque (ALLGOOD, 1974). Em 2009, Bergen-Noruega encomendou uma pesquisa sobre a perfuração por eletropulsão para perfuração de poços geotérmicos (SCHIEGG, RODLAND, *et al.*, 2015). O método emprega a transmissão de pulsos elétricos entre 100 kV – 1000 kV através de eletrodos submersos em fluido em contato com a superfície da rocha. Ao passar o pulso pela rocha, um volume de rocha se afasta da superfície. A aplicação subsequente do pulso causa mais fissuras nas rochas subjacentes.

Está previsto que esse método seja capaz de perfurar orifícios super profundos de grande diâmetro em formações duras com baixo custo. Foi alcançada uma taxa de penetração de até 35 m/h para um poço de 50 cm de diâmetro durante a perfuração de granito, que é comparável aos métodos mencionados acima (SCHIEGG, RODLAND, *et al.*, 2015).

Este método pode ser aplicado na perfuração de poços de grande diâmetro, que são maiores que o tamanho da broca *Electro-pulse-boring* (EPB). A eletroperfuração é uma boa opção para a perfuração rotativa. Este método leva a broca no fundo do poço através do uso da coluna de perfuração convencional, com a substituição da broca por uma ferramenta de perfuração. Este método, no entanto, foi restringido pelo fato de que o tempo de disparo para substituir a broca subtrairia a alta taxa de benefícios de penetração. Além disso, embora exista altos custos nas taxas na fragmentação de rochas, existindo assim um consumo significativo de energia no uso do fluxo de fluido anular para o transporte do material quando o diâmetro do poço é grande. No entanto, isso pode ser reduzido

significativamente usando uma mangueira para essa finalidade (RODLAND, 2012).

Devido às grandes diferenças na tecnologia EPB e as atualmente em uso na perfuração rotativa, a adoção dessa tecnologia exigiria a troca de todos os equipamentos. Outros riscos associados a esse método é o manuseio contínuo de alta tensão, o que também pode exigir adesão a procedimentos rigorosos durante a operação de perfuração.

Portanto, pesquisas focadas são necessárias para o desenvolvimento de uma sonda de perfuração adequada, com entrega adequada da ferramenta ao ambiente de fundo de poço. Além disso, é de suma importância analisar a operação de EPB no ambiente de fundo de poço com aumento da temperatura e regime de pressão supercrítica. Finalmente, também seria necessário determinar o efeito na sonda.

3.2.4.

Perfuração a Laser

As primeiras pesquisas sobre o uso de lasers para perfuração foram realizadas no final dos anos 60 e 70. No entanto, a ineficiência dos lasers naquela época fez com que o método fosse rejeitado. Posteriormente, o desenvolvimento de lasers de alta potência (GRAVES e O'BRIEN, 1999) e o uso da tecnologia de laser a fibra óptica (FAIRCLOTH, ZEDIKER, *et al.*, 2013) possibilitou a entrega do feixe do laser no fundo de poço, além de sua capacidade de perfurar rochas.

Uma vantagem notável do processo é a evidente falta de contato entre a ferramenta e a superfície da rocha, o que reduz o tempo de disparo devido à redução de desgaste. Essa redução de custos prevista tem sido uma força motriz para pesquisas e desenvolvimento que possibilitem a sua adoção no setor. Um poço de gás de 3048 m de profundidade custaria \$35.000 dólares quando se usa o laser, em comparação com métodos convencionais, que necessitariam investimentos de \$350.000 dólares (OLALEYE, 2010). Além disso, devido à sua taxa de penetração mais rápida na rocha, estima-se que os poços perfurados a laser levem 90% menos tempo que os métodos convencionais (ADENIJI, 2014). Além

da vantagem financeira, um tempo de perfuração mais rápido significa redução de danos ao ecossistema. Também está previsto que o impacto ambiental da perfuração a laser seja menor do que os meios convencionais. Em relação à potência necessária, um laser de fibra de 20 kW é alimentado por 1,5 kW em comparação com uma perfuração convencional, que requer 1,5 MW de potência para gerar 2000 hP (HECHT, 2012).

O mecanismo de perfuração de rochas utilizando lasers ocorre através de fragmentação térmica, fusão ou vaporização. A aplicação de calor na superfície da rocha causa um aumento instantâneo de temperatura, o que causa a fragmentação. No entanto, a aplicação contínua do fluxo de calor localizado resulta na dissipação de energia através de vários mecanismos. O derretimento da rocha ocorre devido ao fluxo absorvido. Outros minerais, como a argila presente nos poros da rocha, são desidratados, formando uma fase vítrea que também reflete o laser. Finalmente, essa desidratação dos minerais causa a formação de pluma, o que diminui a energia transferida para a rocha. Essa energia dissipada causa ineficiência no laser, impedindo-o de alcançar a rocha exposta (SALEHI, GAHAN e BATARSEH, 2007).

Os valores mais baixos de energia específica são atingidos durante a fragmentação térmica, enquanto os valores mais altos ocorrem quando acontece a fusão e a vaporização da amostra. A fragmentação é, portanto, um ato de malabarismo para garantir que a entrada de energia não aumente a temperatura da rocha até o derretimento. O uso de lasers pulsados tem sido eficaz nessa questão (BATARSEH, GAHAN, *et al.*, 2004). Pesquisas indicam um aumento na remoção de rochas quando um laser pulsado com uma alta taxa de repetição é usado na fragmentação. Isso foi atribuído à onda de choque acionada pelo laser, que é gerada pelo aumento da frequência de ciclos térmicos (SALEHI, GAHAN e BATARSEH, 2007). (KOBAYASH, KUBO, *et al.*, 2009) observaram que a fragmentação de superfícies rochosas adjacentes ocorreu sem que a irradiação do laser fosse aplicada em toda a superfície. A fragmentação, portanto, não limita o tamanho do furo obtido ao tamanho do feixe do laser. A otimização do tempo de irradiação é necessária para alcançar valores ótimos de energia específica.

Os fragmentos são removidos do poço usando gás de purga. O nitrogênio é o gás mais comumente usado para esta aplicação que melhora a perfuração (BATARSEH, GAHAN, *et al.*, 2004). No entanto, o uso do laser com um raspador mecânico tem sido utilizado em determinadas situações para remoção de fragmentos (RINZLER, ZEDIKER, *et al.*, 2014).

A fragmentação em ambiente cheio de água foi investigada. Foi determinado que a rocha derreteu em vez de se fragmentar. Isso ocorreu em certos comprimentos de onda do laser, dependendo do coeficiente de absorção de água. Além disso, os lasers de menor comprimento de onda foram capazes de funcionar com um jato de água fornecido na área de perfuração. Apesar desses resultados positivos, a energia do laser foi dissipada através dos seguintes fatores: absorção e reflexão do laser pelo bloqueio da água, pelo vapor de água, e pela água turva e respingos de água (REED, XU, *et al.*, 2003). Isso leva à diminuição da taxa de penetração. No caso de amostras saturadas com água, observou-se que a energia específica necessária era alta devido ao alto ponto de vaporização da água e menor taxa de absorção da energia do laser pela água (AHMADI, ERFAN, *et al.*, 2011).

Outra aplicação amplamente aceita de lasers é a perfuração e completação de poços. Pesquisas sobre a perfuração a laser foram feitas a alta pressão por (GAHAN e BATARSEH, 2006). Foi determinado que a tensão de confinamento melhorou a difusividade térmica da rocha devido ao contato próximo dos grãos, e isto levou a uma melhoria geral do processo de perfuração.

Além das limitações já mencionadas, outros desafios requerem uma abordagem antes que o método possa ser levado ao mercado. Futuras pesquisas devem ser focadas no desenho de equipamentos para obter desempenho eficiente na perfuração profunda e perfuração de poços. Entrega do laser ao fundo do poço deve estar na frente. A coluna de perfuração convencional pode ser adaptada para levar o laser. Como o laser não tem peso na broca (WoB, do inglês *Weight on bit*), estudos sugerem o uso de um metal composto para segurar o laser na broca, em vez do aço, pois não há necessidade de alta resistência à tração e à compressão da coluna de perfuração (SALEHI, GAHAN e BATARSEH, 2007).

Também é imperativo entender o mecanismo de dissipação de energia do laser, bem como os parâmetros de perfuração que requerem controle. A modelagem destes processos irá contribuir para explicar a interação da rocha e do laser. Também é importante analisar a interação laser-rocha quando exposta às pressões supercríticas elevadas prevalentes na perfuração de poços.

4.

O Processo de fragmentação Térmica de Rochas

Conforme foi mencionado no capítulo 3, a técnica de perfuração por fragmentação térmica foi cogitada durante os fins dos anos 80 e início dos anos 90 como uma forma de perfurar rochas duras como granitos, quartzos etc.

Diferentes análises realizadas do processo de fragmentação térmica em rochas abordam diferentes aspectos que são necessários ao desenvolvimento desta técnica usada na perfuração, englobando, em particular, o mecanismo de fratura da rocha e do processo na transferência de calor.

Este processo consiste em apontar um feixe de luz emitida por um laser de alta potência para a superfície de uma rocha, a fim de criar tensões térmicas que proporcionam a fratura da mesma em pequenos estilhaços, retirando a camada superficial da rocha continuamente e produzindo uma perfuração. Dependendo das características físicas dos materiais de certas rochas e com o acúmulo de tensões térmicas geradas pelo laser, pequenas falhas no interior da rocha podem se propagar em trincas, desencadeando no processo de fragmentação da rocha em pequenos estilhaços. Este método de perfuração tem grande eficiência em rochas mais duras como granito ou quartzo, onde as taxas de penetração são mais altas se comparadas com as taxas obtidas por métodos convencionais. No primeiro caso, o acúmulo dos estilhaços ocasionados na fragmentação da rocha tende a obstruir a superfície desta, prejudicando a continuidade do processo. Já no segundo, os jatos de gases quentes, gerado pela combustão, são mais eficientes por gerar altos fluxos de calor e também retirar os estilhaços da perfuração para fora do local (este fenômeno é auxiliado pela movimentação do jato, resultado pelas altas velocidades ocorridas no processo) (VIEGA, 2004).

Esta técnica pode ser usada para perfurar eficientemente furos de grande diâmetro, como poços de petróleo. Cada feixe de laser pode fazer um furo raso tão

grande quanto o tamanho a largura do feixe do laser, geralmente de 1,27 cm de diâmetro. Para cobrir uma área de grande diâmetro (o diâmetro do poço de petróleo pode ser 20 cm ou maior), como o tamanho do feixe é muito pequeno deve ser aplicados vários vezes e sobrepostos para criar um furo de maior diâmetro (REED, XU, *et al.*, 2003). A Figura 9 mostra esquematicamente o método de sobreposição de feixes múltiplos para perfuração de grandes diâmetros e furos profundos. Uma vez que é necessário algum tempo de relaxamento para evitar o derretimento da rocha, as vigas sobrepostas dispararão sobre a rocha sequencialmente ou em grupos para criar uma camada de face de trabalho quase circular de um diâmetro desejado. Os fragmentos de rocha desta camada serão removidos instantaneamente com a ajuda do sistema de purga e lavagem. Em seguida, feixes de laser dispararão novamente para espalhar a segunda camada de rocha. Camada por camada, um buraco profundo será perfurado até que a profundidade projetada atinja (PRADA PARRA, 2016).

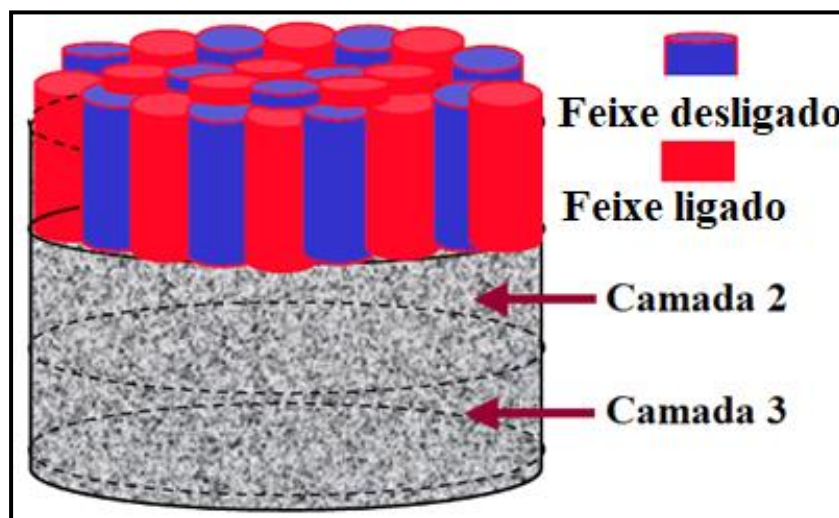


Figura 9 – Método de sobreposição de feixes múltiplos para perfuração de grandes diâmetros e furos profundos (FARRA, NELSON e MOAVENZADEH, 1969).

As vantagens da técnica de fragmentação a laser são três:

- A rocha é removida por fragmentação, por isso é mais eficiente,
- A potência média necessária do laser é baixa, por isso é fácil requerer a entrega do feixe pela fibra óptica,

- Pequenos fragmentos de rocha ou detritos são facilmente eliminados pelo método padrão de lavagem.

Um modelo padrão da transição entre zona de descamação e zona de fusão para xistos pode ser observado na Figura 10. Nesta representação, a potência do laser foi incrementada de 0,2 kW para 1,2 kW e várias determinações da energia específica foram realizadas. É possível identificar dois mecanismos, a zona da esquerda é a zona de descamação e a zona à direita do gráfico é a zona da fusão. A zona de transição foi identificada entre as potências médias de 0,534 kW e 0,62 kW, onde o processo predominante passa de descamação para o de fusão (GAHAN, PARKER e BATARSEH S., 2001).

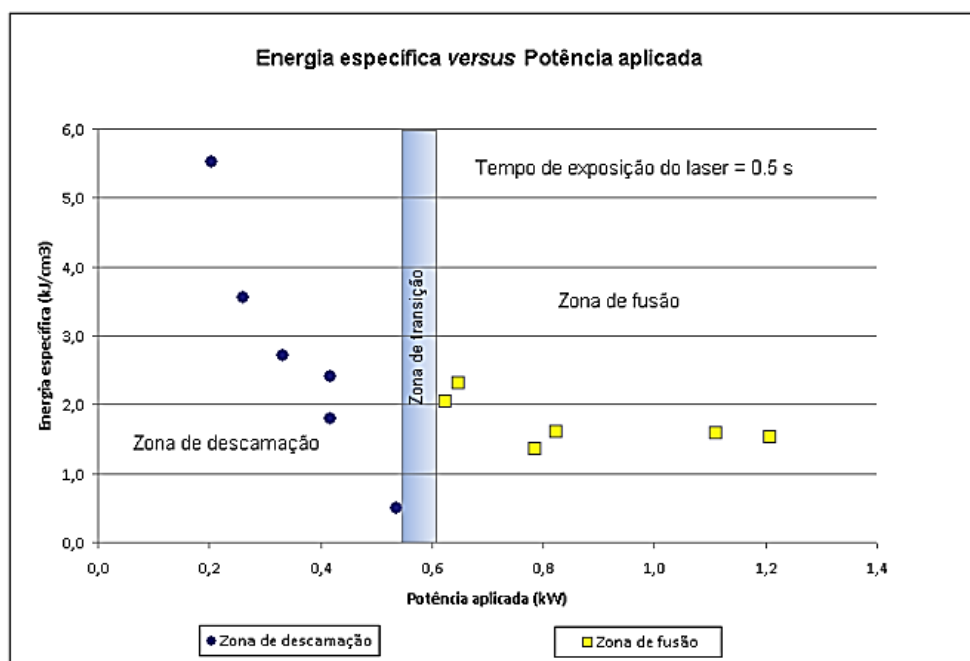


Figura 10 – Mudanças no método de remoção do material da descamação por fusão (GAHAN, PARKER e BATARSEH S., 2001).

Sendo possível ressaltar que na Figura 10, que as menores energias específicas são obtidas na região de descamação, justamente antes da zona de transição para a região na qual predomina o processo de fusão. As variações de energia específica podem ser explicadas, uma vez que, nas potências mais baixas do laser, no início do processo de incidência do feixe, uma considerável parte da energia incidente será consumida para a expansão térmica, fratura da rocha e decomposição dos minerais, restando pouca energia para efetivamente remover o

material. Na medida em que a potência média vai aumentando e reações de descamação adicionais vão ocorrendo, a remoção do material passa a ocorrer com mais eficiência. Quando a potência média aumenta ainda mais, acima do ponto de fusão do material, valores maiores de energia específica são percebidos. Uma vez iniciado o processo de fusão, os efeitos secundários começam a consumir energia adicional e valores de energia específica maiores são observados.

4.1.

Mecânica da Fragmentação de Rocha Induzida a Laser

Quando a energia do laser é aplicada na rocha, é criado um campo de temperatura na rocha. A distribuição de temperatura durante o período inicial de exposição do laser pode ser obtida utilizando o modelo simplificado de condução de calor de Carslaw e Jaeger (PARKER, XU, *et al.*, 2003), que assume que a rocha sob o feixe do laser constante forma parte de um sólido semi-infinito, homogêneo e elástico. A distribuição da temperatura é dada pela eq. (9):

$$T(z, t) = \frac{2q(Kt)^{\frac{1}{2}}}{k} \operatorname{ierf} \left(c \left(\frac{z}{2(Kt)^{\frac{1}{2}}} \right) \right) \quad (9)$$

Onde

T = Temperatura no local z do sólido (°C)

z = distância normal para dentro da rocha a partir da sua superfície (m)

q = fluxo constante de energia do laser (watts/cm²)

K = difusividade térmica da rocha = k/ρc (m²/s)

k = condutividade térmica da rocha (W/m°C)

c = calor específico da rocha (J/kg°C)

t = tempo desde o início da exposição do laser (s)

ierf = integral do complemento da função de erro.

As tensões (σ) induzidas pelo laser na rocha causadas pela distribuição da temperatura na eq. (10) são dadas por:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{E\alpha T}{(1 - \nu)} \quad (10)$$

onde

E = módulo de Young (MN/m²)

α = coeficiente de expansão térmica linear (°C⁻¹)

T = temperatura tal como indicada na eq. (10)

ν = Razão de Poisson

A tensão é proporcional à temperatura, e o valor da tensão para uma dada temperatura aumenta com valores crescentes do módulo de Young, do coeficiente de expansão e da razão de Poisson. Esta tensão é bastante significativa nas rochas que têm baixa condutividade térmica e alta expansão térmica.

A fragmentação térmica pode ser amplamente definida como a fragmentação de um sólido em pequenos flocos em forma de disco, aquecendo rapidamente uma fração relativamente pequena do sólido. As tensões térmicas causadas pela expansão do sólido com o aumento da temperatura causam a falha do sólido (WILKINSON, 1989). Os flocos típicos são de 0,1 mm a 2 mm de espessura e têm diâmetros 10 – 20 vezes a sua espessura (DEY e KRANZ, 1985). Não existe nenhuma propriedade da rocha que possa predizer ou determinar a fragmentação. (BROWNING e HORTON, 1965) encontraram uma correlação aproximada entre a resistência ao esmagamento, a dureza, a capacidade de perfuração convencional, e a capacidade de fragmentação de rochas suscetíveis à fragmentação. Geralmente, as rochas com maior resistência e dureza ao esmagamento são mais difíceis de perfurar de forma convencional (BROWNING e HORTON, 1965).

Ao longo dos anos, inúmeros mecanismos qualitativos e quantitativos têm sido propostos para descrever a fragmentação térmica. O primeiro deles, proposto por Norton (NORTON, 1952), atribuiu a fragmentação térmica ao cisalhamento entre isoterma paralelas à superfície. Norton determinou isso através do estudo de esferas e tijolos de argila que eram aquecidos e depois rapidamente resfriados.

No entanto, ele não conseguiu perceber que, na verdadeira fragmentação, o cisalhamento entre camadas não é possível devido ao confinamento da rocha e que, portanto, o cisalhamento não pode ser o mecanismo que causa a fragmentação. O que ele observou foi à falha de tração normal do núcleo sólido de amostra devido à tensão exercida pela camada externa aquecida em expansão.

(PRESTON, 1934) foi o primeiro a desenvolver uma descrição qualitativa correta da fragmentação. Ele percebeu que o confinamento da face da rocha era fundamental, e desenvolveu dois critérios de fragmentação para uma amostra não definida:

- A área aquecida deve ser pequena em comparação com o tamanho da amostra, de modo que não existam deslocamentos de campo distantes na superfície e a área aquecida seja confinada,
- A taxa de aquecimento da superfície deve ser rápida o suficiente para forçar as temperaturas da superfície a atingir um valor alto antes que uma fração apreciável do volume da amostra seja afetada pelo aquecimento; caso contrário, a expansão térmica causará alívio de tensão na direção da menor resistência.

Com os critérios de Preston cumpridos, foi proposto o seguinte mecanismo qualitativo para a fragmentação, ilustrado na Figura 11. O aquecimento da superfície confinada leva a um acúmulo de tensões de compressão. Essas tensões de compressão atuam sobre uma falha pré-existente perto da superfície, fazendo com que ela se propague na direção da tensão aplicada, paralela à superfície. A alta relação entre o diâmetro e a espessura da placa resultante sob tensão leva a um encurvamento e a uma rápida liberação da energia elástica do spall comprimido, explicando porque os flocos são frequentemente ejetados violentamente da superfície.

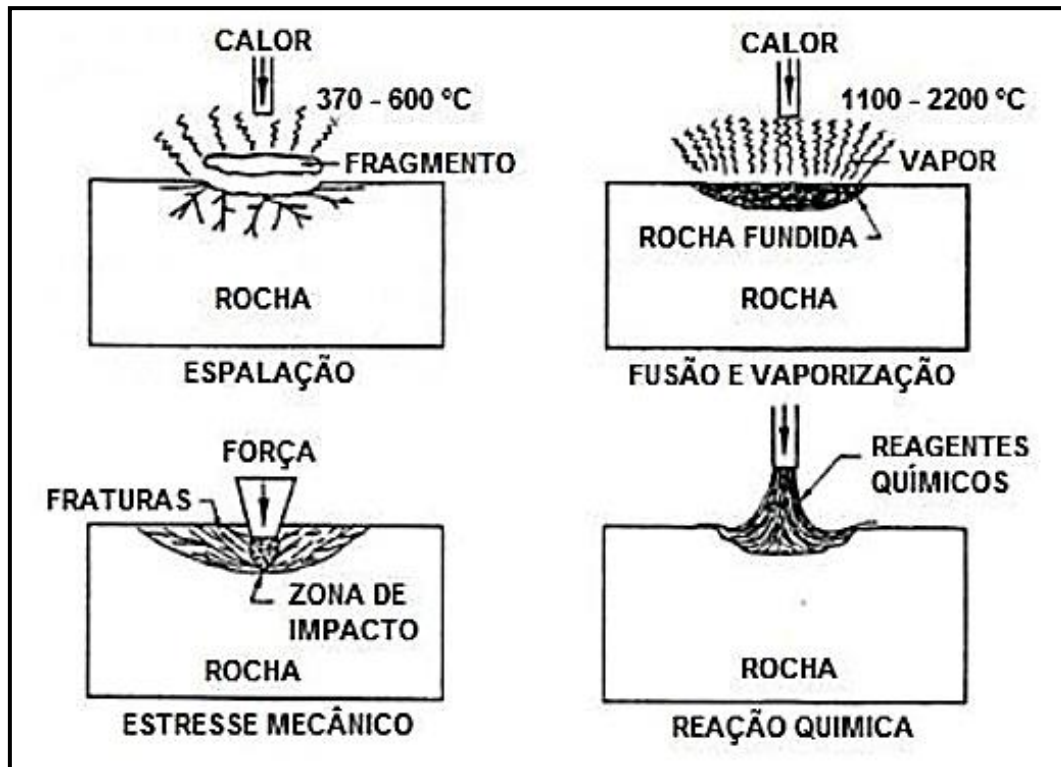


Figura 11 – Modelo simples da cadeia de eventos que leva à fragmentação (PRESTON, 1934).

Usando o modelo qualitativo de Preston como ponto de partida, (RAUENZAHN e TESTER, 1989) descreveram a metodologia para chegar a uma teoria plausível da fragmentação térmica. A teoria afirma que se a rocha aquecida é considerada um sólido semi-infinito com perfil de temperatura 1-D, então as tensões de compressão (σ_{xx} e σ_{yy}) paralelas à superfície são proporcionais ao aumento da temperatura nessa profundidade (CARLSLAW e JAEGER, 1959). Isto resulta na seguinte relação eq. (11):

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\beta_r E \Delta T}{1 - \nu} \quad (11)$$

onde β_r é o coeficiente de expansão linear da rocha, E é o módulo Young da rocha, ΔT é o aumento da temperatura a partir do ponto de tensão zero na rocha, e ν é a razão de Poisson. A determinação das tensões das rochas não indica em que ponto a falha da rocha ocorrerá; uma teoria adequada ainda é necessária para descrever a fratura da rocha. (GRIFFITH, 1920) foi um dos primeiros a reconhecer que a pré-existência de falhas nas rochas era extremamente importante

na formulação e avaliação de critérios de falha. Ele mostrou que uma única fissura alinhada num ângulo arbitrário ao campo de tensões se estenderá devido à tensão na ponta da fissura e se alinhará com o campo de tensões existente. Griffith passou a desenvolver um modelo simples de falha global, no qual a falha de rocha ocorreu em uma única tensão crítica, σ_c .

A teoria estatística de Weibull tenta explicar a dependência da resistência à falha em relação ao tamanho da amostra. Devido a falhas pré-existentes, um material nunca pode alcançar a sua verdadeira força potencial. A probabilidade de falha depende da distribuição de falhas, da tensão aplicada à região e do tamanho da região que está sendo estressada. Uma falha maior só pode passar com certo nível de tensão antes da falha, mas as chances de encontrar tal falha são menores em uma região menor do que em uma região maior. Assim, a teoria de Weibull reduz-se a uma distribuição das forças materiais dependentes do volume de stress (RAUENZAHN e TESTER, 1989). A distribuição de Weibull das forças dependentes do tamanho é dada pela seguinte distribuição cumulativa de probabilidade de falha eq. (12) (WEIBULL, 1939):

$$G(\sigma) = 1.0 - \exp \left[- \int_0^V \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dV \right] \quad (12)$$

onde σ é a tensão de compressão sobre a rocha, σ_0 é a força de compressão da rocha, V é o volume de amostra sob tensão, e m é conhecido como o fator de homogeneidade. Os parâmetros σ_0 e m dependem da amostra de rocha e devem ser determinados experimentalmente. (DEY e KRANZ, 1985), em colaboração com Rauenzahn e Tester, ampliou a teoria de Weibull e o trabalho de vários outros autores para desenvolver uma descrição quantitativa da distribuição da temperatura e do fluxo de calor obtidos na fragmentação térmica. Eles basearam o seu desenvolvimento em quatro hipóteses-chave:

1. As espirais são formadas por tensões de compressão através do mesmo mecanismo que provoca a divisão uniaxial em amostras de teste convencionais em compressão.

2. O calor difunde-se na rocha apenas a uma curta distância, pelo que o estado de tensão térmica não é influenciado pela forma do furo.
3. A teoria convencional da flexão por feixe e placa pode ser usada para descrever as condições nas quais a fenda se separa da rocha.
4. As distribuições Weibull descrevem variações heterogêneas da resistência da rocha em pequenas escalas (~ 1 mm de espessura) típicas dos flocos (DEY e KRANZ, 1985).

A avaliação da integral na eq. (12) requer o conhecimento da distribuição de tensões e do volume sobre o qual a integral é realizada. Para determinar a distribuição de tensão da eq. (11), o perfil de temperatura na face da rocha deve ser especificado. O campo de temperatura é determinado pelo tratamento da rocha como um sólido sublimante, assumindo que a superfície da rocha desapareça à velocidade de perfuração durante o processo de fragmentação. O balanço térmico resultante é eq. (13)

$$k_r \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -u_r \frac{\partial T}{\partial x} (\rho C_p)_r \quad (13)$$

onde k_r é a condutividade térmica da rocha, u_r é a velocidade de perfuração, e $(\rho C_p)_r$ é a capacidade volumétrica de calor da rocha. Assumindo uma temperatura superficial de T_s durante a fragmentação, a solução para a eq. (13) é a eq. (14),

$$T = (T_s - T_{r0}) \exp\left(\frac{-u_r x}{\alpha_r}\right) + T_{r0} \quad (14)$$

onde T_{r0} é a temperatura da rocha em $x = \infty$ e $\alpha_r = k_r/(\rho C_p)_r$ = difusividade térmica da rocha.

Como o volume da superfície rochosa que será removido toma a forma de um cilindro, a região sobre a qual a integral deve ser realizada pode ser pensada como um cone, com seu ápice no ponto P na superfície e um raio de $C_{Lx}/2$, onde CL é a relação de aspecto (diâmetro/espessura) do floco e x é a distância normal à

superfície da rocha. Assim o volume diferencial é transformado em uma profundidade diferencial, onde $dV = 3\pi(C_L x/2)^2 dx$. A distribuição de tensões é dada pela eq. (11), com ΔT descrito pela eq. (14). Em condições medianas de fragmentos, G , a probabilidade acumulada de falha, é assumida como 0,5. A eq. (15) torna-se então:

$$0.693 = \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0} \right)^m \frac{\pi C_L^2}{4} \int_0^\infty x^2 \exp\left(-\frac{mu_r}{\alpha_r}\right) dx \quad (15)$$

com σ_s dada pela eq. (11), onde $\Delta T = \Delta T_s$.

O fluxo de calor para a superfície da rocha, Q_r , pode ser determinado a partir da eq. (16):

$$Q_r = -k_r \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=0} = (\rho C_p)_r u_r (T_s - T_{r0}) \quad (16)$$

Quando combinado com a eq. (13), isto produz a seguinte expressão para o fluxo de calor aplicado eq. (17):

$$Q_r = (\rho C_p)_r \left(\frac{1-\nu}{\beta_r E} \right) \sigma_0 \left(\frac{2(0.693)}{\pi C_L^2} \right)^{1/m} \left(\frac{mu_r}{\alpha_r} \right)^{3/m} u_r \quad (17)$$

Da mesma forma, as eq. (16) e eq. (17) podem ser combinadas para dar a temperatura da superfície da rocha durante a fragmentação:

$$T_s = T_{r0} + \left[\left(\frac{Q}{\rho C_p} \right)_r \left(\frac{(1-\nu)\sigma_0}{\beta_r E} \right)^m \left(\frac{2(0.693)}{\pi C_L^2} \right) \left(\frac{m}{\alpha_r} \right)^3 \right]^{1/m+3} \quad (18)$$

Das eq. (7) e eq. (18), pode-se ver que o fluxo de calor para a superfície da rocha, a velocidade de perfuração ou a temperatura da superfície de fragmentação podem ser derivados uma vez que as propriedades da rocha são conhecidas e pelo

menos uma destas três variáveis é especificada (RAUENZAHN e TESTER, 1989). Uma razão de aspecto (C_L) deve ser assumida para fazer a análise. Para a maioria dos flocos, a C_L tem um valor entre 8 e 15. A teoria da encurvadura também pode ser usada para determinar um valor provável de C_L , e resulta em um valor próximo de 10. Rauenzahn e Tester estimaram que, para propriedades rochosas médias, a eq. (18) prevê uma temperatura de spallation entre 400 °C - 550 °C.

4.2.

Fases da Perfuração a Laser

Quando a radiação do laser incide com superfície de rocha, ocorre logo após os seguintes estágios, a rocha pode ser furada por fragmentação fusão e evaporação (BATARSEH, XU, *et al.*, 2003). Quando a radiação do laser incide na superfície da rocha, uma parte é refletida, uma parte é espalhada, e uma parte é absorvida como resultado dos experimentos. Os testes indicam que os feixes refletidos e espalhados têm baixo efeito sobre a rocha, e que o mecanismo que resulta em fragmentação e finalmente na perfuração de rocha é a absorção da radiação do laser (PARKER, XU, *et al.*, 2003). O uso de laser em rochas com alto coeficiente de transferência de calor resulta na evaporação da água cristalina acumulada com solução de materiais minerais na rocha, expandindo a rocha e finalmente causa fraturas na estrutura da rocha. Em diferentes análises foi empregado o laser usando gás de nitrogênio para limpar as camadas de material fragmentado. A razão do uso de gás de nitrogênio é que este elimina os gases que são produzidos durante a perfuração de rocha em forma de vapor. Na perfuração rotativa, o nitrogênio é usado para transferir fluidos do fundo do poço para a superfície do poço, enquanto na perfuração a laser é investigado o uso de nitrogênio para detectar o comportamento na presença de um fluido de perfuração (GRAVES e BAILO, 2004).

4.3.

Interação Laser-rocha

As propriedades das rochas, como a absorção e reflexão, são fundamentais na interação entre lasers e rochas. A reflexão tem o impacto de reduzir a

quantidade de energia que é transferida para a rocha. A energia absorvida, por outro lado, determina o nível de destruição da rocha. Alta absorção de energia pela rocha está relacionada com o nível de fragmentação e fusão da rocha. A dispersão da energia do laser é outra fonte de perda de energia. A dispersão está relacionada ao comprimento de onda (λ) e à superfície do sólido a ser fragmentado. Pequenas proporções de λ/d resultam em grandes frações de radiação espalhada, onde d é a dimensão da superfície refletora. As propriedades das rochas tais como a baixa refletividade, alta absorção e baixa condutividade térmica (em relação aos metais) são favoráveis para a destruição das rochas pela ação do laser (BATARSEH, 2001).

A energia do laser que é transferida para a rocha será principalmente refletida, dispersa e absorvida. A razão de que a energia que é refletida para a superfície da rocha deve-se à composição química, enquanto a dispersão da radiação é devida ao comprimento de onda (GRAVES e O'BRIEN, 1999). Quando uma superfície de rocha é exposta a um laser de alta potência, a temperatura local aumenta instantaneamente e pode ocorrer fragmentação, derretimento ou vaporização. A fragmentação térmica é o mecanismo de remoção de rochas com maior eficiência energética (XU, YAMASHITA e REED, 2005). O derretimento dos minerais da rocha acontece quando a dispersão de calor na interação laser/rocha vai além da energia absorvida pela rocha. Ao aumentar a temperatura local até os pontos de fusão dos minerais, formar-se-á uma fase vítrea, que é função da mineralogia das rochas e do espaço de grão da matriz das rochas (GAHAN e BATARSEH, 2006). A formação desta fase vítrea dispersa o calor e reflete uma porção da radiação laser que leva à redução da energia transmitida para a rocha. Nesta tendência, pela decomposição e vaporização de alguns minerais, será produzida a fase gasosa que de alguma forma diminui a energia transferida para a rocha. Portanto, a remoção efetiva da rocha ocorre antes da fusão da rocha.

Os experimentos relatados para comprovar o antes dito foram realizados com vários tipos de rochas, tais como: arenitos, xistos e rochas carbonáticas, que representam a grande maioria das rochas, nos cenários de perfuração da indústria de exploração de petróleo e gás. Deste modo a interação laser-arenito é de tal

forma que há uma transformação de fase a 600 °C para o quartzo da fase “ α ” para “ β ”, acompanhada de uma expansão do volume de 0,8% que leva a melhorar a taxa de fragmentação enquanto a vaporização de outros minerais e a formação da fase gasosa também aumentara a pressão no meio da fragmentação (XU, REED, *et al.*, 2004). Nesse processo, várias mudanças de fase ocorreram, como fusão e vaporização, que absorvem e redirecionam a energia do laser e aumentam a energia necessária para remover as rochas. Portanto, o ponto principal que deve ser levado em consideração na remoção do arenito é o controle do acúmulo térmico no alvo (GAHAN e BATARSEH, 2006). Por outro lado, o furo durante a perfuração a laser em calcário é criado pela calcinação, que é a dissociação térmica de CaCO_3 em CaO e CO_2 a cerca de 825 °C, que resulta no aumento da permeabilidade sem qualquer tipo de destruição (GAHAN, 2004).

A transformação da fase induzida pelo laser na rocha também contribui para a spallation. A temperatura superior a 650 °C foi registrada na rocha testada, que foi exposta a raios laser de nível quilowatt. Há uma transformação de fase a 600 °C para quartzo de α - a β -fase que é acompanhada por uma expansão repentina da ordem de 0,8% em volume. Esta súbita expansão de volume na rocha durante a exposição ao feixe do laser é capaz de forçar os grãos adjacentes na rocha a se separarem ao longo dos seus limites e melhora ainda mais a fragmentação da rocha. A vaporização rápida de impurezas, tais como umidade ou minerais na rocha que são mais facilmente vaporizáveis do que o quartzo, causa grandes pressões internas (devido ao confinamento de volume). Estas pressões ajudam a fragmentação da rocha.

O espalhamento está relacionado com o comprimento de onda e as características da superfície refletora. Dessa forma, propriedades da rocha como: baixa refletividade, alta absorção e baixa condutividade térmica, se comparado com metais, são pontos favoráveis para a destruição da rocha pela ação do laser (SOBOL e UGLOV, 1983).

4.3.1. Refletividade

A refletividade das rochas depende da onda de radiação, composição da rocha, cor da rocha, temperatura da rocha e do ângulo de incidência da radiação. Além disso, a refletividade depende das condições da superfície da rocha, tais como umidade, condições de limpeza desta superfície, rugosidade, tamanho dos grãos da rocha, etc. A perda de energia afeta a transferência de energia para a rocha pela radiação incidente. Portanto, como já mencionado anteriormente, uma maior reflexão causa menos transferência de energia para a rocha e, portanto, menos destruição da rocha. A Tabela 6 mostra a refletividade (ρ_r) de alguns minerais quando expostos a luz incidente do laser no espectro visível (λ entre 6,38 - 0,77 μm) (BATARSEH, 2001). Permanecendo os demais parâmetros constantes, a radiação incidente do laser penetraria mais profundamente na hematita do que uma rocha calcária de cor branca, basicamente, em razão da refletividade do material.

Tabela 6 – Refletividade (ρ_r) de alguns minerais para radiação no espectro visível no mesmo comprimento de onda (BATARSEH, 2001)

Mineral	Refletividade ρ_r (%)
Arsenopirita	57
Galenita	43
Cinnabar	27
Calcopirita	47
Hematita	25
Magnetita	20
Cromita	14
Gesso	85-90
Calcário branco	80-95
Grafite	26.5
Ouro	84

A refletividade é maior em materiais de cor clara, como as rochas calcárias, e apresentam valores menores em materiais de cor escura, como os folhelhos.

Além disso, a refletividade em rochas com presença de fluidos nos poros é, aproximadamente de 1,5 a 3 vezes menor do que nas rochas secas. A poeira, também afeta a refletividade das amostras de rocha, sendo que, a refletividade é semelhante àquela da poeira que recobre a amostra. Por exemplo, quando uma rocha calcária com $\rho_r = 80\%$ é recoberto por uma poeira de calcopirita $\rho_r = 47\%$, a amostra de rocha calcária passa ter uma refletividade de 47%. A refletividade é também uma função do comprimento de onda da radiação incidente, A Tabela 7 mostra a refletividade (ρ_r) de alguns minerais em função de diferentes comprimentos de onda (BATARSEH, 2001).

Tabela 7 – Refletividade de minerais em função de diferentes comprimentos de onda (λ) no visível (BATARSEH, 2001).

Tipo de Rocha	Comprimento de onda (λ , μm)		
	0.478	0.541	0.633
	Refletividade ρ_r (%)		
Pedra de magnetita – hematita	18	19	20
Pedra de magnetita – martita	23	24	26
Granito	33	33	33
Mármore cinza	30	30	30
Mármore branco	77	77	77

4.3.2. Absorção

A destruição das rochas é uma função da energia absorvida. A absorção tem o efeito oposto da reflexão sobre a penetração do laser na amostra. A absorção provoca o aquecimento das rochas, alteram suas propriedades químicas e físicas, fratura e, finalmente, destrói. O coeficiente de absorção das rochas varia de 10 cm^{-1} a 1000 cm^{-1} . Este coeficiente depende da composição das rochas e do comprimento de onda do laser. Esta comparação foi feita entre o infravermelho e a luz visível (LARKINA, 1976) (SOBOL e UGLOV, 1983). Foi notado que a radiação infravermelha possui a capacidade de penetração maior do que a radiação do espectro visível. Esta absorção do espectro da luz infravermelha é muito mais

forte do que o espectro da luz visível em função do comprimento de onda maior do infravermelho.

4.3.3. Radiação do Corpo Negro

Quando a temperatura da rocha aumenta, a própria rocha se transforma em uma fonte intensa de radiação. Essa fonte de energia é chamada de radiação do corpo negro. A radiação do corpo negro representa a perda de energia no processo de destruição das rochas pelo laser, e pode afetar a destruição térmica das rochas. Isso faz com que a energia seja emitida de volta à superfície. Esta é uma desvantagem deste processo. O fluxo de energia da radiação do corpo negro ($E_{\text{corponegro}}$) pode ser calculado usando a lei de Stefan – Boltzmann modificada para sólidos eq. (19) (BATARSEH, 2001):

$$E_{\text{Corpo negro}} = \varepsilon * \delta * T^4 \quad (19)$$

Onde

ε = é o coeficiente de corpo negro

δ = é a constante de Stefan – Boltzmann

T = é a temperatura em graus Kelvin

Os valores do $E_{\text{Corponegro}}$ são função da temperatura. Os valores dos coeficientes do corpo negro para alguns tipos de rochas para diferentes temperaturas são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Coeficiente de corpo negro (ε) em função da temperatura (BATARSEH, 2001).

Mineral ou Metal	Temperatura (°K)	Coeficiente do corpo negro – ε
Mármore branco	313	0.95
Calcário	293	0.8 — 0.9
Argila	343	0.8

Carvão	373 — 873	0.79 - 0.81
Quartzo, derretido, rugoso	293	0.93
Ferro oxidado	373	0.74
Chumbo, cinza, oxidado	298	0.28

Alguns tipos de rochas são bons emissores de radiação de corpos negros. Por exemplo, o quartzo (Tabela 8) chega a emitir de volta 93% da energia incidente do laser, na forma de energia do corpo negro, na temperatura de 293 °K, parte da energia emitida de volta não ajuda para o processo de destruição de rochas. Quanto maior o valor do coeficiente do corpo negro, maior a energia perdida durante a interação com a radiação do laser (BATARSEH, 2001). Outro fator importante no processo de fragmentação é a possibilidade de desidratação de argilas e carbonatos como ocorre nos materiais empregados de este trabalho que foi comprovado pela análise de Termogravimetria (TG). Esta ocorrência levará a um aumento do volume de espaços vazios no interior da rocha.

4.3.4. Condutividade Térmica

Condutividade térmica (K_f) é a quantidade de calor transmitida através de um volume unitário em uma unidade de tempo. Uma condutividade térmica mais elevada levará a uma faixa mais ampla de distribuição de temperatura e, portanto, mais microfraturas serão produzidas. Existe também a possibilidade de desidratação de argilas e carbonatos. Este processo levará a um aumento do espaço vazio das rochas. A condutividade térmica pode ser calculada a partir da eq. (20):

$$Q_x = -K_f \frac{\partial T}{\partial x} \quad (20)$$

onde

Q_x é o fluxo de calor na direção da coordenada x,

K_f é a condutividade térmica e

T é a temperatura.

A condutividade térmica depende de muitos fatores, como; contato de grãos, densidade, saturação, cimentação, porosidade e permeabilidade da amostra de rocha (BATARSEH, 2001). A condutividade térmica está relacionada à densidade pela seguinte relação eq. (21):

$$K_f = \frac{\rho_b^4}{9,56 \times 10^{-3}} \quad (21)$$

Onde

K_f é condutividade térmica (W/m_K)

ρ_b é a densidade aparente (g/cc)

A densidade está relacionada à porosidade pela seguinte eq. (22):

$$\rho_b = 2,65 \times 10^{-3} (1 - \phi) \quad (22)$$

Portanto, a condutividade térmica pode estar relacionada à porosidade eq. (23):

$$K = 5,16 (1 - \phi)^4 \quad (23)$$

As eq. (22) e eq. (23) são baseadas em amostras de rocha seca e os experimentos foram conduzidos a 20 °C e 100 °C. Os contatos entre os grãos apresentam uma ponte ou meio para que o calor seja transferido; quanto maior for à área da superfície de contato, maior será a transferência de calor.

4.3.5.

Capacidade Calorífica

Capacidade calorífica (C_p) é definida como a energia necessária para elevar a temperatura de um grau Kelvin molar do sólido (FLINN e TROJAN, 1981).

(SOMERTON, 1992) mostrou que a capacidade calorífica de arenito e calcário (devido que estas rochas serão estudadas no decorrer do trabalho) pode ser calculada da seguinte forma:

a. Arenito

$$C_{p_rocha} = 0,1812 + 1,452 \times 10^{-4} T - \frac{1,495 \times 10^3}{T^2} \quad (24)$$

b. Calcário

$$C_{p_rocha} = 0,1968 + 1,189 \times 10^{-4} T - \frac{3,076 \times 10^3}{T^2} \quad (25)$$

onde

T é a temperatura em °K

C_p é capacidade calorífica (Kcal/kg_°K)

Para rochas saturadas, a C_p para o fluido que preenche os poros pode ser calculada da seguinte forma:

$$\rho_{fluido} C_{p_fluido} = (1 - \phi) \rho_{rocha} C_{p_rocha} + \phi \rho_{fluido} C_{p_fluido} \quad (26)$$

onde

ρ_{fluido} é a densidade do fluido

C_{p_fluido} é capacidade calorífica do fluido

ϕ é a porosidade

ρ_{rocha} é a densidade da rocha

C_{p_rocha} é capacidade calorífica do fluido

4.3.6. Difusividade

Difusividade (α) é definida como a capacidade de um material de conduzir energia térmica em comparação com sua capacidade de armazenar energia (FLINN e TROJAN, 1981). Matematicamente e fisicamente, a condutividade térmica, a capacidade calorífica, a difusividade e a densidade aparente podem ser relacionadas pela eq. (27):

$$K_f = \rho_b \alpha C_p \quad (27)$$

Como visto nas relações acima, as propriedades térmicas estão relacionadas à densidade aparente da rocha. Isso indica que um aumento na densidade aparente gera um aumento na condutividade térmica, portanto, um aumento na transferência de calor na amostra de rocha causando uma maior destruição da mesma. Além disso, a presença de fluidos resulta em mais consumo de calor, aumento da energia específica e redução da destruição.

5. Tipos de Lasers

5.1. Lasers de Alta Potência

A palavra LASER vem do acrônimo em inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa "amplificação da luz por emissão estimulada de radiação".

O desenvolvimento da tecnologia dos lasers foi possível através das pesquisas realizadas na área da física quântica, na qual foram delineados os princípios que tornaram possíveis a ideia de utilizar moléculas e a radiação estimulada. Introduzido por Einstein em 1905 usando a teoria de Planck (1900), este conceito demonstrou que a energia de um feixe de luz era concentrada em pequenos conjuntos de energia, denominados fótons, explicando assim o fenômeno da emissão fotoelétrica (GOLDBERG, WELLER e TAYLOR , 1982).

A luz ou radiação eletromagnética de um laser se caracteriza por ser um fluxo luminoso altamente colimado (feixes de luz paralelos) e de alta intensidade de energia. Os lasers são nomeados de acordo com o meio ativo onde ocorre a emissão estimulada da radiação. Atualmente, diferentes meios ativos são utilizados, sendo sólidos, líquidos ou gasosos. Cada meio emite radiação em diferentes comprimentos de onda. A Figura 11 mostra o espectro eletromagnético, onde os lasers geralmente emitem radiação nas faixas de Ultra Violeta (UV), visível e Infra Vermelho (IV). Os lasers apresentam diferentes comprimentos de onda que possuem características próprias que podem sofrer quatro diferentes fenômenos quando interagem com um meio: absorção, penetração, transmissão e difusão.

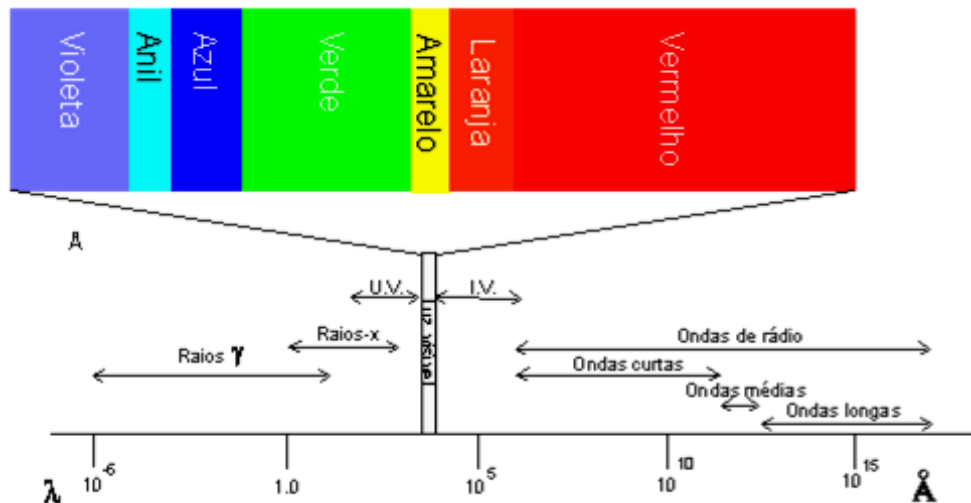


Figura 12 – Espectro eletromagnético (em nanômetros) (HECHT, 1992).

No funcionamento dos lasers, certa quantidade de energia é fornecida a um átomo de maneira que os seus elétrons, que estão no estado fundamental, passem para estados excitados até ocorrer uma inversão de população (mais elétrons no estado excitado do que no fundamental). A tendência é que esses elétrons voltem naturalmente ao estado fundamental. Dessa forma, eles devolvem a energia fornecida anteriormente na forma de fóton, que pode ser refletido por meio de uma cavidade óptica. Isso faz com que o mesmo sirva para excitar outro elétron e, assim, sucessivamente (GOLDBERG, WELLER e TAYLOR, 1982). O comprimento de onda do laser (λ) é definido pela diferença de energia, já que as espécies excitadas são estimuladas para um nível de energia muito, mas baixo eq. (28).

$$E = \frac{h * c}{\lambda} \quad (28)$$

Onde,

E = Energia

h = Constante de Planck = $6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$

c = velocidade da luz 3×10^8

Há diferentes tipos de lasers que podem ser empregados no desenvolvimento de técnicas de perfuração, sendo que alguns deles têm diversas

aplicações na indústria do Petróleo. Suas aplicações dependem da potência, do comprimento de onda, e de alguns outros parâmetros que podem ser variáveis. Na maioria dos casos, a escolha do laser depende do material que se quer perfurar. Alguns dos lasers mais empregados são discutidos a seguir (GAHAN, 2002).

5.2.

Lasers HF, DF, e MIRACL.

Lasers de fluoreto de hidrogênio (HF) e fluoreto de deutério (DF) operam em comprimentos de onda entre 2,6 μm e 4,2 μm . O Laser Químico Avançado de Infravermelho Médio do Exército dos EUA (MIRACL, do inglês *Mid-Infrared Advanced Chemical Laser*) foi o primeiro laser químico de onda contínua de classe megawatt-classe desenvolvida fora da ex-União Soviética (ALBERTINE, 1993).

5.3.

Laser COIL

O Laser de Iodo de Oxigênio Químico (COIL, do inglês *Chemical Oxygen Iodine Laser*) do Laboratório de Pesquisa da Força Aérea dos EUA opera com um comprimento de onda de 1,315 μm . Desenvolvido inicialmente em 1977, este laser de onda contínua de alta potência evoluiu para um nível sofisticado para aplicações militares e agora industriais (BATARSEH, 2001).

5.4.

Laser de CO₂

O laser de dióxido de carbono opera em um comprimento de onda de 10,6 μm no modo contínuo (CW) ou pulsado (RP). A sua potência média pode atingir até um megawatt (1 MW). O comprimento de onda emitido pode variar entre 1 μs e 30 μs (NANRI e FUJIOKA, 1996). No modo pulsado, o intervalo de pulso pode variar de 1 a 30 segundos. As vantagens mais significativas do laser de CO₂ é a sua durabilidade e confiabilidade. Porém, devido ao seu alto comprimento de onda, há uma grande atenuação ao ser transmitido em fibras óticas ou através da água. Este tipo de laser é de grande interesse para o desenvolvimento deste trabalho porque já está no laboratório. Embora seja de potência média (200W), é

bom para se comparar com outros lasers porque possui características diferentes em quanto a seu comprimento de onda (λ) que não pode ser transmitido na fibra óptica, além disso é possível comparar sua ação em diferentes tipos de rocha.

5.5.

Laser de CO

O laser de monóxido de carbono opera em um comprimento de onda entre 5 μm e 6 μm . Assim como o laser de CO_2 , ele pode operar em modo contínuo ou pulsado. A sua potência média atingível é de 200 kW e a duração dos pulso pode variar entre 1 μs e 1000 μs (HILTON e JONES, 1996). O primeiro laser de CO, operou nos modos contínuo ou pulsado (CW ou RP) em um comprimento de onda entre 2,5 μm e 4 μm . A capacidade de alcançar comprimentos de onda mais baixos é importante porque o efeito do rastreo de superfície pelo plasma laser é reduzido, já que o comprimento de onda da radiação laser se torna mais curto.

5.6.

Laser FEL

O Laser de Elétrons Livres (FEL, do inglês *Free Electron Laser*) funciona com um feixe de elétrons de alta energia, e não com o conceito de níveis discretos de energia dos outros lasers e, portanto, podem ser sintonizados em praticamente qualquer comprimento de onda em modo de onda contínua. Alguns cientistas consideram que é o laser de alta potência do futuro (ADARNSKI, DOWELL, *et al.*, 1997). A capacidade de ajustar o comprimento de onda da radiação laser permitiria a otimização de efeitos como reflexão, dispersão, absorção, radiação de corpo negro e triagem de plasma.

5.7.

Laser Nd:YAG

O laser de granada de alumínio ítrio dopada com neodímio (Nd:YAG) opera em um comprimento de onda de 1,064 μm . As tendências de pesquisa e desenvolvimento indicam a viabilidade de potências médias de saída de 10 kW ou mais (KONOV, DAUSINGER, *et al.*, 151 -160).

5.8.**Laser KrF (excimer)**

O nome deste laser deriva dos termos excitado e dímeros, pois usam gases reagentes, tais como, o cloro e o flúor misturados com gases nobres, como o argônio, criptônio ou xenônio. Quando estimulados eletricamente, uma pseudo molécula (dímero) é produzida. Quando usado como material gerador, o dímero produz luz na faixa ultravioleta (HECHT, 1992).

5.9.**Laser de Diodo**

Foi o laser selecionado para o desenvolvimento desta pesquisa, é um laser compacto que possui um colimador de 8 mm acoplado na fibra óptica, com uma potência de saída de 200 W, opera em um comprimento de onda de 980 nm, no modo contínuo (CW) ou modulado (IPG Photonics Corporation, 2006). É um laser que pode ser usado no processamento de materiais, como corte, perfuração, etc.

5.10.**Laser a Fibra**

Os lasers a fibra são conhecidos por sua alta eficiência, por sua grande capacidade de potência, por sua fácil mobilidade, por sua baixa manutenção e por conseguirem levar o feixe do laser até o local da perfuração, onde a luz é guiada e refletida internamente em uma fibra ótica mono modo (AMARO, 2013).

6. Metodologia

Neste capítulo é apresentada a metodologia que foi selecionada para a execução da pesquisa, sendo esta uma metodologia experimental para a obtenção dos resultados, onde se tiveram em conta certos parâmetros que ajudassem na análise prévia dos mesmos (GUEDES VALENTE, ACOSTA PÉREZ, *et al.*, 2013).

A seguir, é apresentada a montagem opto-mecânica que foi utilizada no desenvolvimento deste trabalho, e dos lasers utilizados. Foram desenhadas peças que ajudassem no alinhamento e no correto funcionamento dos lasers, além disso, foi feita uma estrutura metálica para colocá-los em operação. Também foi realizada uma série de testes para escolher os melhores parâmetros no qual os lasers operam adequadamente, dependendo do material irradiado em cada perfuração. Estes materiais foram escolhidos pela similitude enquanto a sua composição química com aqueles encontrados nas formações do Pré-sal, e foram analisados por testes de raio-X, fluorescência, e, análises térmicas. Os resultados obtidos ajudaram na determinação da composição química e das variações de massa com a temperatura. Esta informação foi importante para dar continuidade no desenvolvimento do trabalho. Para isto, foram utilizados materiais do laboratório de lasers, assim como os materiais estudados e forma de reagir em função do laser e da potência usada, mostrando está variação na quantidade de volume removido.

6.1. Montagem Opto – Mecânica da Bancada de Testes

A montagem na Figura 13 foi desenvolvida para permitir uma boa estabilidade mecânica de dois lasers do LSFO. Na parte superior da estrutura metálica está o laser de diodo com o cabo de fibra óptica e seu colimador. Na parte inferior da estrutura vê-se parte do laser de CO₂ com a saída para o sistema

óptico que direciona o feixe 90° em direção à amostra. Esta montagem permitiu a realização de ensaios de perfuração com ambos os lasers sem haver necessidade de remoção da amostra, utilizando a mesma base de fixação. Com esses lasers foi possível avaliar a influência na eficiência de perfuração de parâmetros como comprimento de onda, regime de pulso e densidade superficial de energia óptica.

Além disso, a montagem mostrada na Figura 13 possibilitou de forma simples direcionar a saída dos dois lasers à amostra em avaliação. Ambos os lasers podem ser controlados diretamente através de seus painéis frontais ou através de programas de computador que foram desenvolvidos no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio (LSFO). Neste segundo caso, o programa permite definir a taxa de modulação, o intervalo de exposição e o tempo desligado, além do número total de ciclos ligado/desligado.

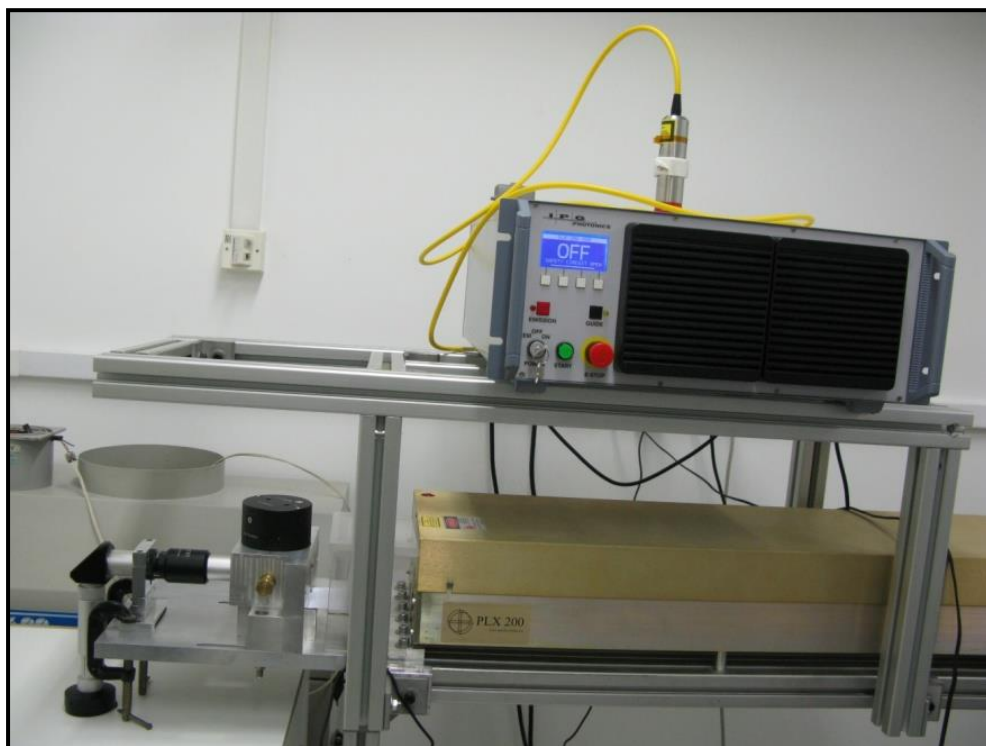


Figura 13 – Montagem de suporte do laser de CO₂ e do laser de diodo

Os dois lasers utilizados nesta primeira fase operam em regime contínuo (CW) com potências variáveis até os limites indicados na Tabela 9. Os valores apresentados na Tabela foram obtidos por medição direta com o medidor de potência óptica adquirido neste projeto (modelo e fabricante). O laser de CO₂

pode ser modulado até 100 Hz, enquanto que o laser de diodo permite modulação até 50 kHz. Este último é acoplado a uma fibra óptica que termina em um colimador, resultando em um feixe paralelo com diâmetro semelhante ao obtido com o laser de CO₂, ambos aproximadamente 8 mm.

Os trabalhos experimentais tiveram início com um laser de CO₂ que o laboratório já dispunha e, a partir da chegada do laser de diodo acoplado a fibra óptica, passou-se a utilizar ambos, fazendo assim uma análise comparativa para os dois comprimentos de onda, respectivamente 10,6 μm e 0,98 μm . Esses dois lasers, cujas características mais importantes estão resumidas na Tabela 9, foram adquiridos com recursos de outros projetos. A partir dos resultados positivos alcançados com o laser de diodo, foi especificado e comprado um laser a fibra operando num comprimento de onda de 1,06 μm , com potência de 1,5 kW.

Tabela 9 – Especificações dos lasers utilizados

ESPECIFICAÇÕES DOS LASERS			
Laser	Comprimento de onda	Potência máxima	Fibra Acoplada
CO ₂	10.6 μm	140 W	Não
DIODO	0.98 μm	215 W	Sim

6.1.1.

Verificação da Potência do Laser de CO₂

As medições de potência média foram realizadas com um medidor de potência óptica Newport 818P-020-12. Foram realizadas medidas com o laser operando no modo contínuo e chaveado. Em ambos os casos, um software desenvolvido em Labview controla a potência do laser e, se for caso, a frequência de chaveamento e o “duty cycle”. A Tabela 10 mostra os resultados onde o número de voltas representa a posição do o botão do medidor de potência que pode variar de 0 a 10.

Tabela 10 – Resultados com o sensor de alta potência do laser de CO₂

No de Voltas de medidor de potência	Potência com montagem óptica (W)	Potência sem montagem óptica (W)
1	20	26
2	43	55
3	62	77
4	79	94
5	92	112
5,5	100	121
6	106	127
6,5	109	133
7	114	138
7,5	121	142
8	124	149
8,5	128	155
9	130	159
9,5	135	163
10	138	165

A potência máxima nominal do laser é de 200 W, que é muito superior ao limite de potência do medidor utilizado (20 W contínuo e 30 W para curta duração). Desta forma, foram feitas algumas verificações complementares. Primeiro, em modo contínuo, mediu-se a potência na posição de 1 volta do laser de CO₂, obtendo 20 W, como esperado. Depois foram realizadas medidas com 50% de tempo ligado, obtendo-se uma boa proporcionalidade do que é esperado até 3 voltas do medidor de potência. Por fim, foram realizadas medidas com “duty cycle” de 10% e frequência de 5Hz. Neste caso os valores parecem indicar uma saturação em relação ao esperado para altas potências, chegando em média a 140 W, quando eram esperados 200 W. Estas medidas estão apresentadas graficamente na Figura 14. O motivo desta discrepância pode tanto ser uma potência real do laser menor que a especificada quando chaveado em maior velocidade, como um erro de medição do medidor de potência óptica operando próximo do seu limite.

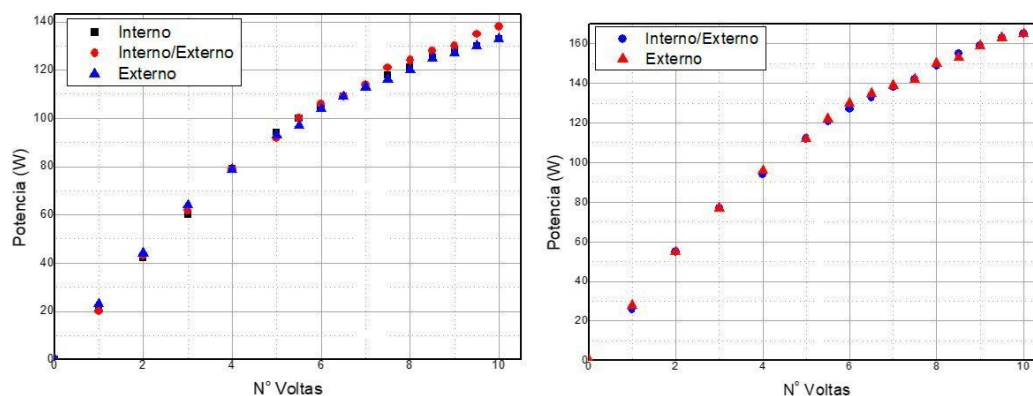


Figura 14 – Curva da potência do laser de CO₂ no modo pulsado (5 Hz, 10%).

6.1.2.

Verificação da Potência do Laser de Diodo

Do mesmo modo, foi medida a potência real do laser de diodo para ser comparada com a potência nominal deste. A Tabela 11 mostra os resultados, onde o Setpoint é a porcentagem de potência nominal fornecida pelo laser, que varia entre 10 a 100.

Tabela 11 – Resultados com o sensor de alta potência do laser de diodo

SetPoint (%)	P _N (W)	P _R (W)
10	14	16
15	27	29
20	40	41
25	53	54
30	66	67
35	78	79
40	90	91
45	103	103
50	115	115
55	127	127
60	139	139
65	150	149
70	161	160
75	172	170
80	183	181
85	193	190
90	203	199

95	212	208
100	221	215

A potência máxima real medida do laser é de 215 W, que está mais acima do que o fabricante fornece (200 W), estes dados são apresentados na Figura 15.

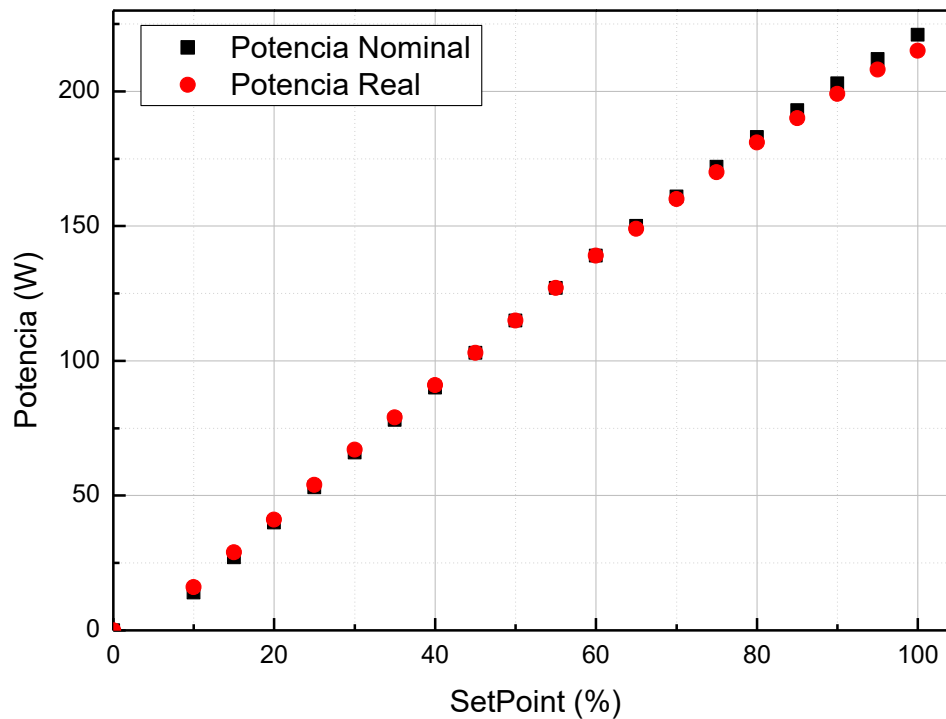


Figura 15 – Potência real e nominal do laser de diodo

6.1.3. Montagem da Linha do Gás

Foram projetadas duas linhas para injetar o gás, cada uma com ângulo de inclinação de 60° com a horizontal. As linhas de gás são de alumínio, com uma redução de diâmetro no final da linha. O gás de nitrogênio é usado para a remoção do material fragilizado pela radiação dos lasers.

Os testes feitos onde foram usados jatos de gás para remover o material mostraram bons resultados. Por este motivo, se quis fazer um sistema de perfuração mais estável, que poderia ser controlado por um software. Foi montada

e testada uma linha de gás a alta pressão usando válvulas solenoides para controlar o tempo entre jatos e a duração de cada um deles.

Para a retirada do material fragilizado pela radiação do laser, foi montado um bico a 60 graus com a horizontal, com saída de gás de nitrogênio com pressão de 50 bar dirigida diretamente à região de incidência do laser e controlado por válvula solenoide. O programa de computador também controla a abertura desta válvula através de uma eletrônica também desenvolvida no laboratório. A Figura 16 mostra esta montagem.



Figura 16 – Montagem da linha de remoção do material fragilizado

Este tipo de montagem faz com que o sistema de perfuração fique mais estável e real para aperfeiçoar as condições de trabalho, o qual ajuda na automação de todo o processo.

6.2. Rochas Usadas nesta Investigação

Foram analisados vários tipos de materiais semelhantes àqueles encontrados em uma perfuração real. Para isto, foi investigado que tipo de rochas é encontrado

no solo perfurado. O CENPES/Petrobras apresentou um tipo de material do Pré-sal com composição calcária parecida à composição do travertino.

Para os experimentos descritos nesta tese, decidiu-se buscar rochas disponíveis comercialmente, que apresentassem composições químicas distintas e que fossem encontradas com facilidade no Brasil. As amostras utilizadas nesta primeira fase são encontradas com nomes comerciais de Travertino, Granito Branco e Granito Cinza. Além disso, também foram realizadas medidas comparativas em blocos de cimento.

6.2.1.

Granito Branco e Cinza

Descrição macroscópica: a rocha tem cor cinza claro que resulta da ocorrência de quartzo e feldspato. A textura da rocha é de grão fino a grão médio, fanerítica - granoblástica, sem orientação preferencial de partículas minerais. Os minerais na rocha são macroscopicamente visíveis, com um tamanho médio superior a 0,5 mm, localmente 6 mm - 7 mm. A rocha não tem indícios de intempérie ou alteração.

Descrição microscópica: a rocha tem estrutura granular holocristalina, hipidiomórfica e idiomórfica, mas principalmente cristais hipidiomórficos de biotite e plagioclases, e quartzo xenomórfico e feldspatos K.

Propriedades mecânicas do granito.

Tamanho de grão: Fino

Porosidade (%): 1,7

Densidade (Kg/m³): 2580

Resistência ao atrito (mm) 18,5

Resistência à compressão (MPa): 144

Resistência à flexão sob carga concentrada (MPa): 9,5

Micro dureza knoop (MPa): 2131b

Resistência ao choque (cm): 54

Absorção de água por capilaridade (g/m²*s^{0,5}): 1,185

6.2.1.1. Método de fusão de granito

As amostras de granito utilizadas nessas experiências tinham 100 mm de largura x 100 mm de comprimento x 30 mm de espessura. A Figura 17 ilustra uma amostra sendo irradiada com laser. A amostra de granito foi irradiada com laser em duas situações. A Figura 17(b) é uma porção ampliada da Figura 17(a). A Figura 17(b) mostra o granito com um furo de 2 cm de diâmetro criado pela irradiação com laser. Irradiando o granito em vários tempos de exposição à radiação do laser, foi obtida uma primeira camada perfurada com um furo de 2 cm de diâmetro com profundidade de 11 mm. Com a montagem óptica é possível obter o mesmo tamanho de ponto da primeira superfície perfurada no início da irradiação a laser, o mesmo procedimento foi repetido. Esses procedimentos criaram um furo de 2 cm de diâmetro com profundidade de 11 mm. A Figura 17(a) pode-se ver uma amostra de granito branco no momento em que está sendo irradiada. A alta temperatura alcançada pode ser observada pela incandescência do material.

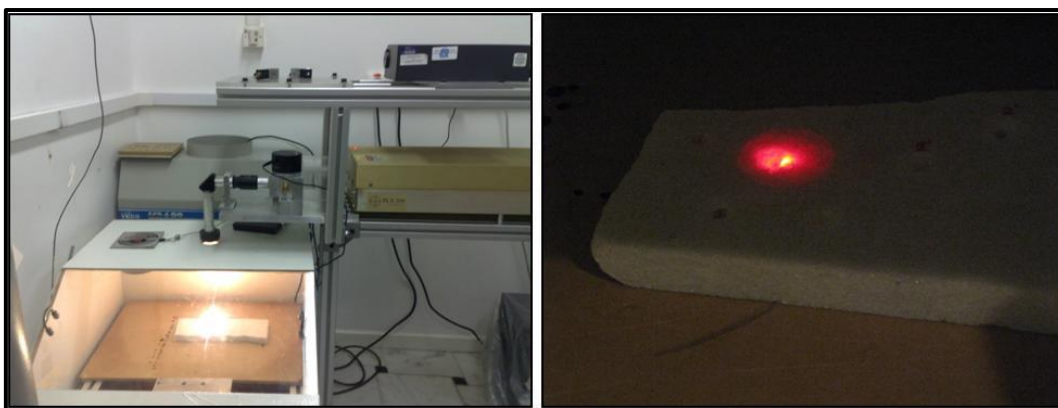


Figura 17 – (a) Interação do laser a superfície da rocha, (b) incidência da luz na amostra de granito branco.

6.2.1.2. Método de Fragmentação do Granito

Foi necessário estudar um método para fragmentar o granito para se obter um método de perfuração mais eficiente no consumo de energia. O método de fragmentação do granito empregou a irradiação a laser de CO₂ e laser de diodo. Quando o granito é aquecido, ocorre intensa expansão de volume na zona

aquecida e a 573°C na região da transição de fase do quartzo α para a forma β . Quando a temperatura pode ser mantida nessa faixa, a fragmentação pode ocorrer continuamente. Comparando com o ponto de fusão do quartzo, 1720°C, a temperatura de fragmentação do granito é de cerca de 570°C. Claramente, a fragmentação requer menos energia do que a fusão do granito para poder perfurar. No entanto, as temperaturas durante a irradiação com laser são muito difíceis de se manter na região da transição de fase do quartzo α para a forma β , onde a fragmentação pode ocorrer continuamente.

6.2.2. Travertino

O travertino é uma rocha calcária, composta de calcita, aragonita e limonita, com bandas compactas, paralelas entre si, nas quais se observam pequenas cavidades, onde predominam os tons que passam pelo branco, verde ou rosa, apresentando, frequentemente, marcas de ramos e folhas. É formado em zonas calcárias, pela precipitação de carbonato de cálcio por ação da água doce, o que provoca espaços ociosos e o depósito de materiais em bandas mais ou menos paralelas. O travertino é uma rocha sedimentar quimiogénica com minerais constituintes: calcite (CaCO_3), aragonite (CaCO_3) e limonite ($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{NH}_2\text{O}$). Na Figura 18 mostra-se a estrutura microscópica do travertino usado nos testes.

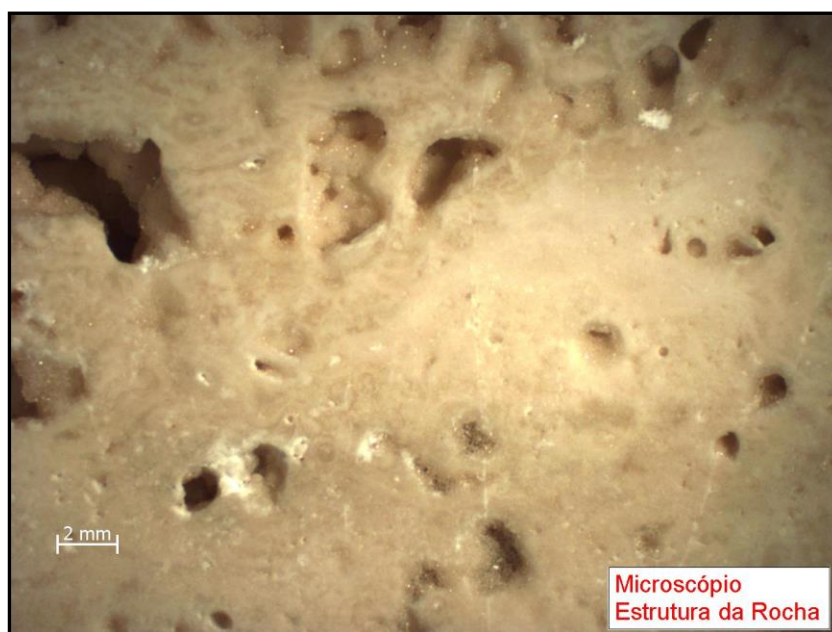


Figura 18 – Microscopia Óptica da estrutura do travertino

6.3. Volume do Material Fratilizado

Segundo análises preliminares, foi escolhida uma técnica experimental para medir a quantidade de volume removido de cada furo feito com o laser. Na Figura 19, é mostrada a placa usada nos testes preliminares com a qual foi selecionado o material para medir o volume removido. Para isto, foram feitos furos de diferentes diâmetros que ajudassem a ter uma medida exata da quantidade de massa retirada de cada furo. Além disso, usou-se vários métodos para calcular o volume, tais como massa de calafetar, resina dental, e preenchimento com água os furos. Esta técnica foi testada anteriormente e a incerteza associada a estas medidas é inferior a 10%, mesmo para volumes muito pequenos, podendo chegar próximo de 1% para a faixa dos volumes maiores obtidos nestes testes.



Figura 19 – Placa usada para selecionar a massa para medir o volume removido.

Selecionou-se a massa empregada para fazer moldes dentais. Deste material, não se tem algumas informações que seriam indispensáveis para calcular o volume. Para isto, foi necessário aplicar o princípio de Arquimedes para calcular o peso específico da massa, que demonstra que todo corpo imerso em um fluido sofre ação de uma força (empuxo) verticalmente para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo (Figura 19).

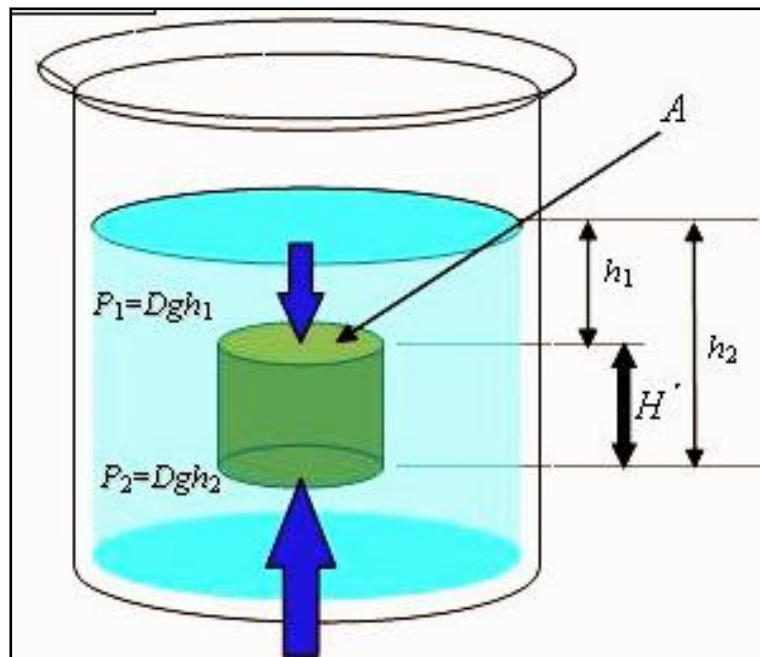


Figura 20 – Princípio de Arquimedes (MOTT, 2006).

Levando em consideração os conceitos do princípio de Arquimedes, foi feita uma bola com a resina dental, deixando esta secar por 24 horas, para depois pesar e conseguir o valor da massa, uma vez que o diâmetro não é uniforme. Foi utilizado um cilindro graduado cheio de água até certo nível para depois submergir a bola e medir o volume deslocado. O peso específico (γ) é definido como o peso por unidade de volume eq. (29).

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{N}{m^3} \quad (29)$$

onde,

W = Peso da amostra (N)

V = Volume da amostra (m^3)

A medição da massa da bola foi,

$$m_{Bola} = 12.705 \text{ g} \quad (30)$$

Pelo princípio de Arquimedes o volume deslocado foi,

$$V = 8.5 \text{ ml}$$

O peso específico e a densidade calculada,

$$\gamma = \frac{12,705_g (0,001 \text{ Kg/g}) (9,81 \text{ m/s}^2)}{8,5 \text{ ml} (1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{ml})} = \frac{0,12463605 \text{ N}}{8,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\gamma = 14,663 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho = \frac{12,705 \times 10^{-3} \text{ Kg}}{8,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\rho = 1.495 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Na Tabela 12 e na Figura 21, mostra-se os resultados para o ensaio da medição do volume no qual foram tiradas várias medidas para cada furo feito na lamina do metal. É possível notar que quando o diâmetro do furo é maior a quantidade de volume calculado pode ser um pouco mais exato.

Tabela 12 – Dados experimentais para o cálculo do volume dos furos

Diâmetro (mm)	Massa (gr)	Vol1 (cm ³)	Massa (gr)	Vol2 (cm ³)	Massa (gr)	Vol3 (cm ³)	Massa (gr)	Vol4 (cm ³)	Massa (gr)	Vol5 (cm ³)	Massa (gr)	Vol6 (cm ³)	Média Vol (cm ³)
1,5													
3,5	0,043	0,029	0,041	0,027	0,040	0,027	0,041	0,027	0,044	0,029	0,045	0,030	0,028
4,0	0,056	0,038	0,056	0,037	0,057	0,038	0,056	0,037	0,062	0,041	0,063	0,042	0,039
4,5	0,062	0,041	0,063	0,042	0,064	0,043	0,066	0,044	0,067	0,045	0,070	0,046	0,044
5,0	0,090	0,060	0,087	0,058	0,094	0,063	0,088	0,059	0,087	0,058	0,097	0,065	0,061
5,5	0,100	0,067	0,099	0,066	0,101	0,068	0,101	0,068	0,101	0,068	0,104	0,069	0,068
6,0	0,136	0,091	0,135	0,091	0,141	0,094	0,138	0,092	0,148	0,099	0,149	0,099	0,094
7,0	0,235	0,157	0,246	0,165	0,246	0,165	0,241	0,161	0,258	0,173	0,247	0,165	0,164
7,5	0,180	0,120	0,171	0,115	0,205	0,137	0,178	0,119	0,200	0,134	0,201	0,134	0,127
8,0	0,269	0,180	0,263	0,176	0,282	0,188	0,265	0,177	0,284	0,190	0,274	0,184	0,183
8,5	0,327	0,219	0,328	0,220	0,352	0,235	0,313	0,210	0,353	0,236	0,360	0,241	0,227
9,0	0,388	0,259	0,382	0,256	0,405	0,271	0,374	0,250	0,427	0,286	0,417	0,279	0,267
10,0	0,411	0,275	0,419	0,281	0,437	0,292	0,394	0,263	0,448	0,299	0,441	0,295	0,284
10,5	0,442	0,295	0,467	0,312	0,480	0,321	0,459	0,307	0,492	0,329	0,492	0,329	0,316
11,0	0,579	0,387	0,606	0,405	0,624	0,418	0,580	0,388	0,614	0,410	0,624	0,418	0,404
12,0	0,625	0,418	0,633	0,424	0,650	0,435	0,616	0,412	0,616	0,412	0,643	0,430	0,422
12,5	0,647	0,433	0,650	0,435	0,677	0,453	0,657	0,439	0,672	0,450	0,670	0,448	0,443
13,8	0,735	0,492	0,780	0,522	0,800	0,535	0,750	0,502	0,814	0,545	0,791	0,529	0,521

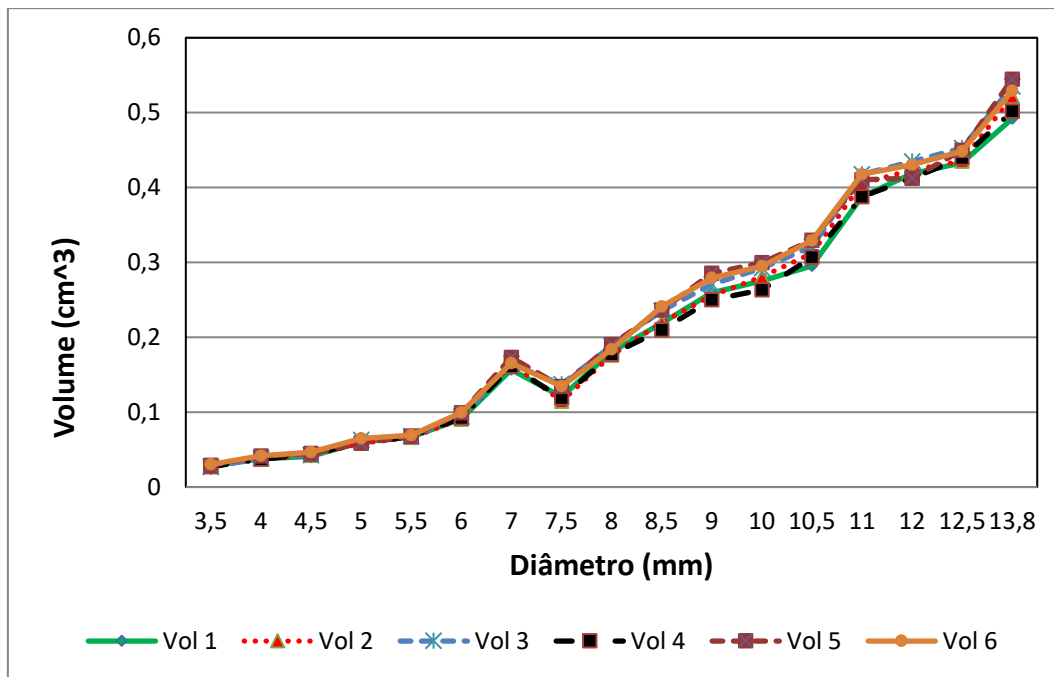


Figura 21 – Gráfico do volume dos furos da lamina de metal.

6.4. Energia Específica

Para quebrar a rocha por tensões induzidas mecanicamente ou termicamente, deve ser aplicada à rocha uma força suficiente de energia, de modo que as tensões induzidas excedam a resistência da rocha. Da mesma forma, ao fundir uma rocha, deve ser aplicado calor suficiente para produzir temperaturas locais que excedam a temperatura de fusão da rocha. Uma vez excedidos esses valores limites de força ou energia, a quantidade de energia necessária para quebrar ou remover um volume unitário de rocha permanece quase constante. Este parâmetro de energia, que é uma medida da eficiência da técnica de destruição de rochas, é definido como energia específica (SE, de *Specific Energy* em inglês) (MAURER, 1980). Em outras palavras, a energia específica é definida como a quantidade de energia necessária para remover uma unidade de volume de rocha e é definida da seguinte forma eq. (31):

$$SE = \frac{\text{Energia de entrada}}{\text{Volume removido}} = \frac{P}{dV/dt} = \frac{KJ}{cm^3} \quad (31)$$

Onde

P = Potência de entrada

dV/dt = Derivada do volume com relação ao tempo (cm³/s)

Este conceito é bastante interessante não só para qualificar o material removido, mas também para considerar a energia utilizada na operação, ou seja, nem sempre adianta alcançar bons resultados da remoção se a energia empregada for extremadamente elevada. Dessa forma, através da maior ou menor energia específica, se pode encontrar os parâmetros previamente configurados, que são responsáveis pelos resultados. A ideia é que o aperfeiçoamento do processo esteja definido nos ajustes, em função da potência do laser, do tempo de exposição do feixe ou do volume removido.

Partindo deste mesmo princípio, é possível encontrar a taxa de penetração (ROP, de Rate of Penetration em inglês). Este valor expressa a velocidade de avanço do agente removedor em direção do objetivo. Considerando a geometria aproximada da perfuração como um cilindro se tem que eq. (32),

$$SE = \frac{E}{V_r} = \frac{P * t}{A * h} \quad (32)$$

onde

E = é a energia aplicada

V_r = é o volume removido

P = Potência do laser

t = tempo de exposição do feixe

h = Profundidade atingida

A velocidade de penetração na direção vertical, também conhecida como a taxa de penetração (ROP),

$$\frac{h}{t} = \frac{P}{A * SE} \quad (33)$$

No final se tem que eq. (34),

$$ROP = \frac{P}{A * SE} \quad (34)$$

Na Figura 21 mostra os parâmetros de perfuração em relação a potência, profundidade e área, onde a profundidade é consequência da densidade de potência aplicada e da taxa de irradiação do laser sobre a superfície do material. Quanto maior a densidade de potência, maior será a profundidade do corte que, por sua vez, diminuirá na medida em que a penetração pode aumentar. Sendo assim, as variáveis devem ser bem ajustadas de maneira a encontrar a menor energia específica utilizada para alcançar fragmentar a mostra (MAURER, 1980).

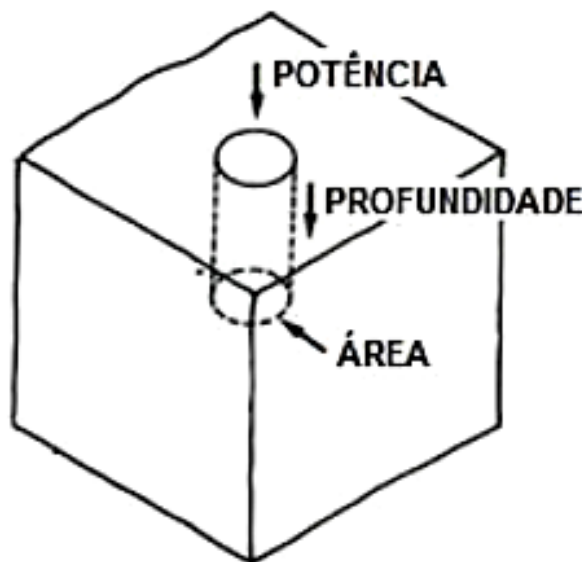


Figura 22 – Representação dos parâmetros de perfuração (MAURER, 1980).

Assim, a taxa de penetração pode ser calculada através da potência aplicada pelo laser e dividida pela área atingida do material ou simplesmente pela área do feixe e pela energia específica.

Há fatores que desviam a transferência de energia para a rocha, conhecidos como efeitos secundários, que incluem a fusão e vaporização de minerais de rocha, gás decomposto no furo lacerado e fraturas induzidas. Ao aplicar lasers de alta potência em rochas, o laser pode derreter lascas ou vaporizar a rocha,

dependendo da aplicação desejada. Quando o laser é exposto por longos incrementos de tempo, o quartzo e outros minerais se fundem e formam um revestimento de vidro no fundo(?) do furo. O mecanismo e a quantidade do derretimento dependem da porcentagem de quartzo e do contato do grão. Quanto mais próximos os grãos estiverem uns dos outros, mais fácil será a transferência de calor entre os grãos, levando ao derretimento dos minerais. Outro mecanismo observado é a dissociação em carbonatos, produzindo uma mudança física na rocha e gases dissolvidos. Os gases e os fragmentos causados pela radiação laser reduzem a transferência de energia para a amostra de rocha. Os fragmentos e os gases absorvem parte da energia do laser, portanto, menos energia é transmitida à rocha (BATARSEH, XU, *et al.*, 2003).

As fraturas também têm impacto sobre a SE, pois representam energia utilizada para outros fins que não a remoção de rochas, e se traduzem diretamente em valores mais elevados de SE. As fraturas são classificadas como macro e microfratura; as macrofraturas são facilmente observadas em amostras de mão, enquanto as microfraturas podem ser vistas sob o microscópio. O comportamento das fraturas é diferente de um tipo de rocha para outro.

O comportamento da fratura nas rochas depende de fatores como mineralogia, propriedades térmicas das rochas, volume de espaço vazio, dimensão da amostra e a quantidade de tensão aplicada. A mineralogia afeta a formação de fraturas. As argilas contêm água que, quando submetidas a altas temperaturas, tentarão escapar sob a forma de vapor. Isto aumenta o volume e a pressão no poro e pode causar fraturas. Os arenitos e xistos possuem alta condutividade térmica e contêm argilas. Os calcários, por outro lado, têm baixa condutividade térmica e possuem baixas quantidades de argila e quartzo; portanto, podem-se esperar mais fraturas em arenito e xisto, e menos em calcário (BATARSEH, XU, *et al.*, 2003). À medida que a condutividade térmica aumenta, a rocha se aquece com mais eficiência e a temperatura se distribui melhor dentro das rochas. Além disso, para rochas com alta condutividade térmica, o resfriamento será gradual ao longo do núcleo da amostra. As fraturas nos arenitos se desenvolvem regularmente não de forma aleatória.

6.5.

Preparação das Amostras para Análise Térmica

Empregaram-se três tipos de rocha, as quais, além dos experimentos de perfuração com laser, foram analisadas por técnicas de fluorescência de raio-X, Termogravimetria, análise térmica diferencial e Microscopia Eletrônica de Varredura. Foi possível identificar os principais processos envolvidos na interação laser rocha e aperfeiçoar o processo de perfuração, alcançando energia específica entre 30 kJ/cm^3 e 100 kJ/cm^3 . Os resultados são apresentados no capítulo 7.

Para cada material testado foram selecionados dois tipos de amostra. Estas foram classificadas em antes e depois do processo de perfuração, com a finalidade de conhecer o que acontece quando uma rocha é exposta a altas temperaturas, sabendo que há mudanças na sua composição química. As amostras antes do processo de perfuração foram preparadas através da pulverização de um pedaço de material. As outras amostras de depois da perfuração foram o pó que sobrou depois da rocha ser submetida à ação da radiação do laser (Figura 23).



Figura 23 – Amostra depois do processo de perfuração

7. Resultados e Discussões

A fragmentação da rocha induzida pelas tensões térmicas pode ser usada para se obter elevadas taxas de perfuração em rochas duras. Nos experimentos relatados nesta tese, foram usados dois tipos de laser para induzir estas tensões térmicas, a fim de caracterizar a importância dos diferentes parâmetros, enfocando a taxa de penetração na rocha e a geometria do furo. Este trabalho visa estabelecer, através de um estudo experimental, a viabilidade de utilizar esta técnica para a perfuração de rochas duras. A seguir são apresentados os resultados obtidos ao longo do trabalho, com os quais se pretende comparar a eficiência desta técnica de perfuração de rochas duras. Além disso, esse trabalho também resultou na otimização de variáveis para aperfeiçoar o processo de irradiação do laser com cada tipo de material testado.

Foi analisado o comportamento de dois tipos de lasers (CO₂, Diodo) em diferentes classes de materiais; para cada material testado foi escolhido tempos ótimos na qual a interação laser-rocha seja suficiente para conseguir um processo de fragmentação térmica do material e levar adiante um processo de perfuração.

Os parâmetros considerados foram: o tempo de exposição do laser em cada material, o tempo do jato de gás de nitrogênio para remover o material fragilizado, a potência do laser, e o modo de operação do laser (contínuo e chaveado).

7.1. Classificação dos Testes

Na primeira fase, os testes foram realizados para selecionar o tempo de interação laser-material. Isto depende do laser e da amostra a ser testada. Foram escolhidos tempos de 3, 5, 10, 15, 30 segundos, que foram testados para cada material e para cada laser. Estes testes ajudaram a selecionar um tempo ótimo de exposição no qual se consegue uma boa interação.

Os testes feitos neste estágio apresentam bons resultados, embora seja necessário fazer modificações de acordo as condições de cada material perfurado. No entanto, é necessário fazer uma análise mais profunda enquanto se refere a uma perfuração em condições normais porque as rochas encontram-se misturadas com outros tipos de materiais, e seus poros podem estar preenchidos por algum fluido (água), o que pode dificultar a sua perfuração. Por tão motivo para a seleção do tempo foi feito testes sem um sistema de remoção do material fragilizado, usando uma montagem de limpeza com gás nitrogênio a alta pressão, além de utilizar algum liquido para submergir a mostra para simular uma perfuração real.

7.1.1.

Teste preliminar sem gás

Com a finalidade de analisar os materiais a serem usados no desenvolvimento deste trabalho, foi executado uma série de testes qualitativos com os quais se pode ressaltar a eficiência dos lasers para cada um dos materiais; é possível notar que, para ter um bom processo de perfuração, é necessário fazer remoção das camadas do material fragilizado, já que a interação do feixe só funde a superfície da rocha, como é observado na Figura 24. Para o laser de CO₂ decidiu-se trabalhar sem lentes obtendo-se assim um feixe paralelo de aproximadamente 8mm de diâmetro, cuja densidade superficial de energia, considerando o valor nominal do laser, pode variar de 0,1kW/cm² a 1kW/cm². Desta forma, o posicionamento da amostra é facilitado, pois não depende da distância amostra/lente, este fator é muito importante também, para se obter um efeito de perfuração homogenia.



Figura 24 – Irradiação do laser de CO₂ sem remoção do material

Para este primeiro teste foi usado um granito branco por ser um tipo de rocha não muito dura, ao ter um coeficiente de expansão linear térmica de $9,8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ o qual é relativamente alto ajuda à remoção do material que é fragilizado pelo laser de CO₂. Esta rocha tem um coeficiente de expansão térmica de 9,8 e uma absorção de água de 0,18%. O laser de CO₂ foi usado sem lentes, à potência máxima, contínuo, variando apenas o tempo de exposição. A amostra estava posicionada a uma distância de 470 mm do espelho, a remoção do material fragilizado foi feita manualmente. A Tabela 13 mostra a relação de dados obtidos no teste.

Tabela 13 – Dados obtidos no primeiro teste

Tempo_Exp (s)	P (Volts)	Diâmetro (mm)	Profundidade (mm)	Volume (cm³)	Energia (KJ)	Massa (gr)
10	10	7,12	1,03	0,04	2	0,07
20	10	7,8	1,01	0,05	4	0,08
40	10	8,92	1,31	0,11	8	0,17
60	10	9,42	2,09	0,13	12	0,19
80	10	9,7	2,77	0,16	16	0,24
100	10	10,04	2,44	0,17	20	0,26
120	10	10,07	2,95	0,19	24	0,28
140	10	10,34	2,7	0,19	28	0,29
160	10	10,76	3,27	0,21	32	0,32

180	10	10,83	3,75	0,24	36	0,35
200	10	11,11	2,84	0,28	40	0,41
220	10	11,52	3,24	0,29	44	0,44
240	10	11,84	4,69	0,34	48	0,51
300	10	11,69	4,6	0,36	60	0,54
360	10	11,93	5,46	0,40	72	0,59
420	10	11,8	4,47	0,35	84	0,52
480	10	11,97	4,35	0,33	96	0,50
540	10	12,26	4,25	0,34	108	0,50
600	10	12,52	4,26	0,35	120	0,52

Como esperado, o volume da região afetada aumenta com o tempo, mas tende a saturar porque o material fragilizado não estava sendo retirado durante a iluminação. A aparência da região afetada, antes e depois de retirado o material, pode ser visto na Figura 25.

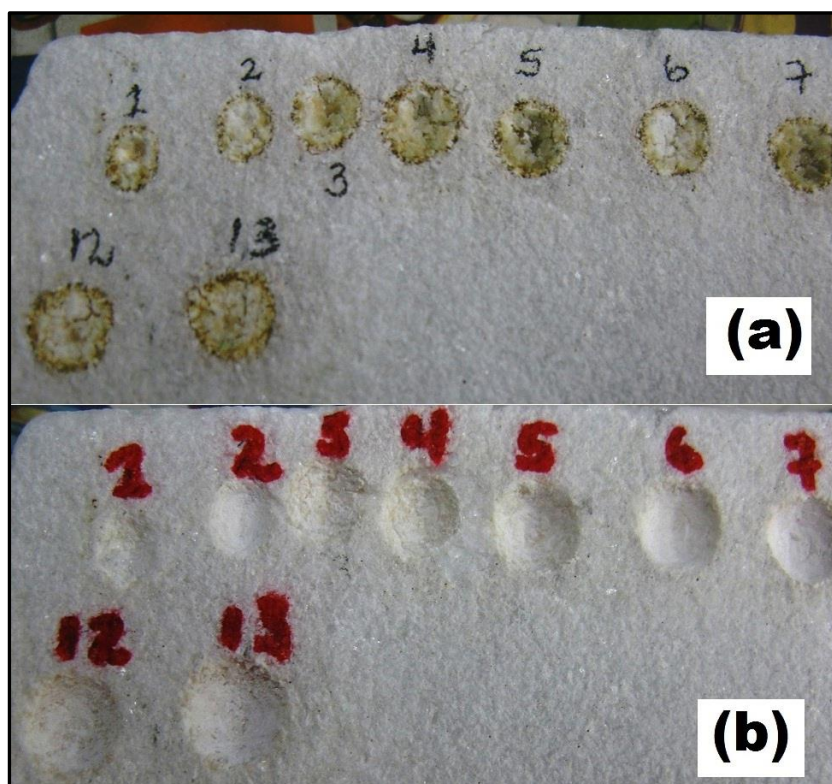


Figura 25 – Amostra de granito branco. (a) Furos a potência máxima e variando o tempo, (b) furos removendo o material fragilizado.

O efeito de saturação fica claro no gráfico da Figura 26, onde aparece o crescimento do diâmetro, profundidade e volume retirados em função da energia

total aplicada, lembrando que a potência e a área eram as mesmas em todos os casos, apenas variando o tempo de exposição. Deve-se notar que o volume não foi obtido por cálculo partindo da geometria, mas sim medido através buraco com resina e posterior pesagem, conforme explicado na metodologia.

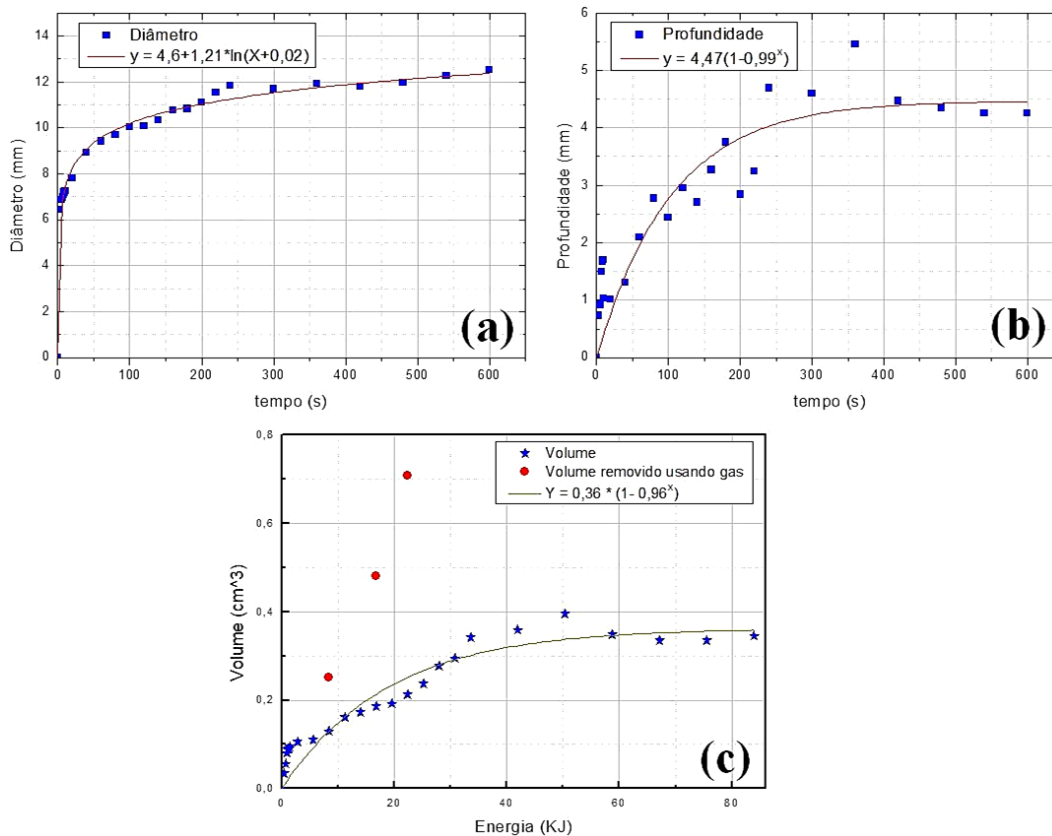


Figura 26 - (a) Variação do diâmetro com o tempo; (b) Variação da profundidade com o tempo; (c) Energia aplicada para remover certa quantidade de material.

A partir dos dados da Figura 26(c), foi obtida a eficiência em volume por kJ em função do tempo de exposição. Este resultado é apresentado na Figura 27. Pode-se ver no gráfico que, para tempos de poucos segundos, a eficiência cai rapidamente, indicando que o material fragilizado necessita ser retirado em intervalos muito curtos, cujo valor ideal ainda será estudado em detalhe.

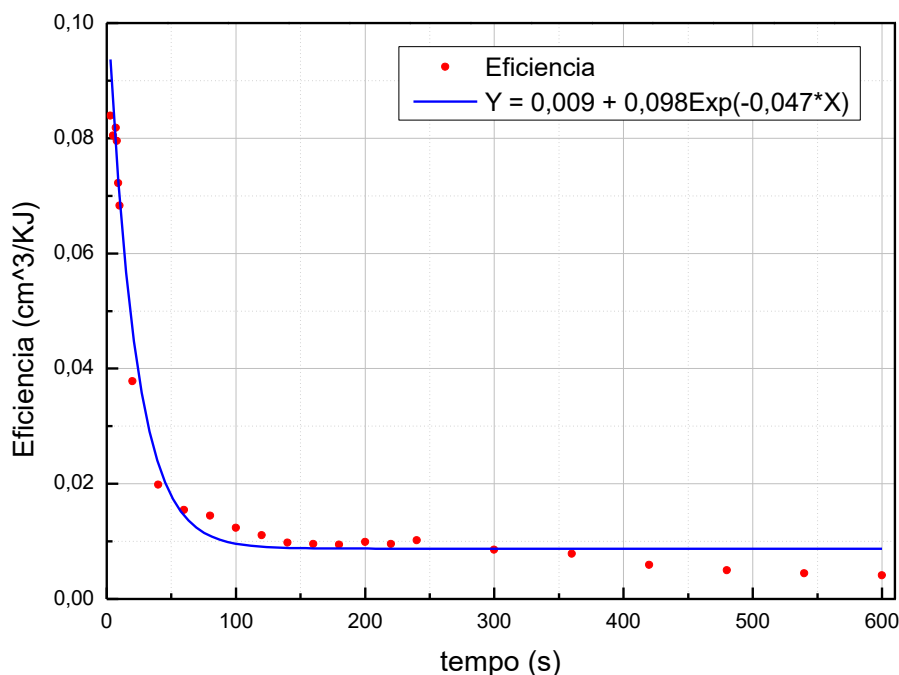


Figura 27 – Eficiência com o tempo

Os resultados até aqui apresentados foram obtidos se retirando o material fragilizado com um pequeno estilete. Durante os experimentos, ficou claro a necessidade da retirada deste material de forma contínua durante o processo de perfuração no campo, onde não será possível retirar o material manualmente.

7.1.2. Teste Usando Gás Nitrogênio

Levando em consideração os testes anteriores, foi necessário incluir um sistema de limpeza de remoção das camadas de material fragilizado pela ação do laser. Por este motivo, foi introduzido um fluxo de nitrogênio contínuo sobre a região sob ação do laser. Em um primeiro momento o gás era ejetado simultaneamente com a interação do laser – rocha. O resultado, que pode ser visto na Figura 28, indica que o gás não deve ser aplicado de forma simultânea ao laser, pois o efeito obtido é o resfriamento da região iluminada e, consequente, uma redução da eficiência do processo.

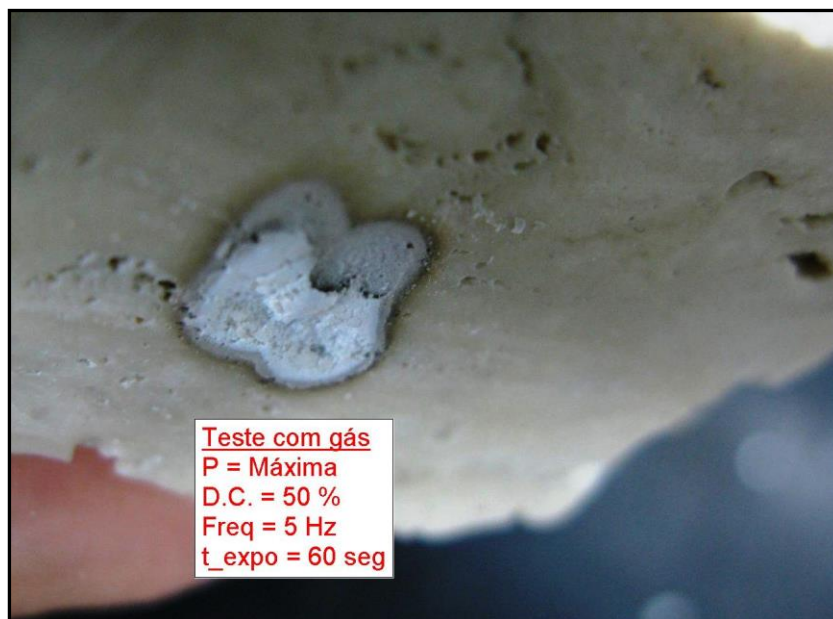


Figura 28 – Perfuração usando fluxo gás contínuo para remover as camadas de material fragilizado

Sabendo que é de suma importância ter um sistema que seja capaz de remover o material que fica fragilizado pelo laser, foram testados vários tempos e potências, por serem fatores determinantes para determinar as melhores condições onde este sistema é mais estável.

7.1.3. Teste com liquido

Levando em consideração a experimentos realizados por Toshio (KOBAYASH, KUBO, *et al.*, 2009) onde submergiam amostras de granito branco em água conseguindo um alto coeficiente de absorção pela amostra irradiada, devido a que a indução de forças mecânicas pelo laser podem ser utilizadas para gerar um furo nas rochas através da irradiação a laser na água. Usando um laser de CO₂ com uma potência de saída de 5 KW e no modo pulsado. Por este motivo, foram realizados dois testes, um tentando reproduzir o experimento do trabalho anterior, e o segundo teste realizado foi deixando um pedaço de amostra vários dias em água para que os poros do mesmo ficassem preenchidos. Depois de passar por esse processo, a amostra foi submetida ao laser de CO₂, mais os resultados obtidos não foram satisfatórios em nenhum dos casos, não havendo efeitos

visíveis na amostra de granito branco, onde a hipótese principal é potência do laser testado, embora este foi usado no modo contínuo e pulsado.

7.2. Eficiência do Processo de Perfuração

Para melhorar a eficiência, foi observado que é necessário fazer remoção das camadas de material fragilizado pela irradiação do laser, para que o processo de perfuração seja contínuo. O primeiro método usado foi fazendo uma remoção manual deste material.

A primeira amostra testada foi a ANP (mostra de rocha das formações do Pré-sal). Os testes feitos foram com laser de CO₂. Além de ser só uma análise qualitativa, este teste permitiu analisar o desempenho do laser de CO₂ nesta amostra. Porque estes testes foram preliminares, se quis testar este laser de formas diferentes. Numa primeira análise, usou-se o feixe limpo do laser de CO₂ (sem o sistema de lentes) no modo contínuo e pulsado. Logo depois, foi removido o material fragilizado da região afetada, obtendo-se um buraco cujas dimensões dependem do tempo de exposição, regime de pulsos e potência total do laser. Na Figura 29, podem ser vistas fotografias do resultado de diferentes exposições da amostra ANP à radiação do laser de CO₂. De maneira geral obtém-se uma fragilização do material na região irradiada com o laser, havendo uma alteração de cor e convertendo-se a rocha em pó muito fino.

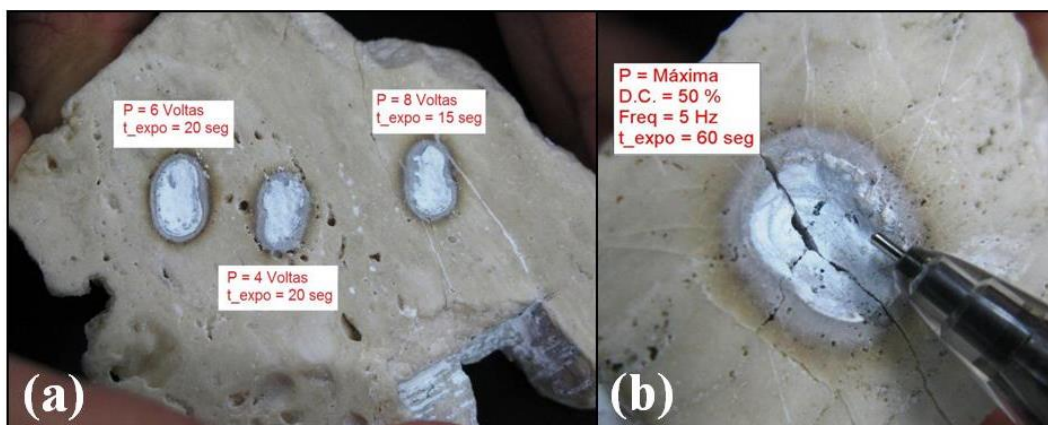


Figura 29 - (a) Perfurações feitas com o laser de CO₂ no modo contínuo. (b) Perfuração com o laser de CO₂ no modo pulsado, o diâmetro maior deste furo é de 11,37 mm e profundidade de 2,21 mm.

Utilizando um sistema de lentes, foram posicionadas amostras com diferentes áreas de iluminação e observado que, para a potência disponível, efeitos de fragilização só eram obtidos para área de iluminação da ordem de 10 mm de diâmetro. A Figura 30 mostra os resultados desses testes, sendo que nesta fotografia pode-se observar o efeito típico obtido acima do limiar.

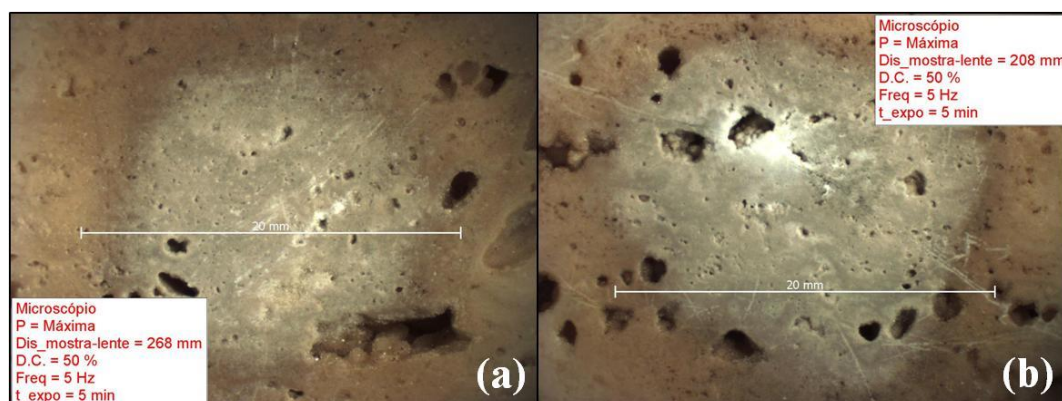


Figura 30 – (a) Rocha exposta a laser de CO₂ a uma distância de 208 mm do bocal. (b) Rocha exposta a laser de CO₂ a uma distância de 208 mm do bocal.

Levando em consideração os testes anteriores e o análise feito em cada um deles, decidiu-se analisar a eficiência do nitrogênio como mecanismo de remoção do material fragilizado no processo de perfuração. Foram realizados experimentos onde a amostra foi exposta à radiação do laser durante tempos de 3 e 10 segundos, e foi aplicado entre as irradiações um jato de gás a alta pressão (100 bar). Também foi realizada um teste reduzindo a potência do laser a 75%. Na Figura 31, observa-se que o processo é mais eficiente quando os intervalos de tempo de exposição do laser com a amostra irradiada são mais curtos (3 segundos). Também se pode ver no gráfico que, para o mesmo tempo de exposição, as potências de 100% e 75% produzem quase os mesmos efeitos. Isto indica que é possível usar potências menores no laser para obter os mesmos resultados alcançados aqui. É importante ressaltar que para ter melhores resultados a pressão do gás de nitrogênio (100 bar) deve ser mantida constante.

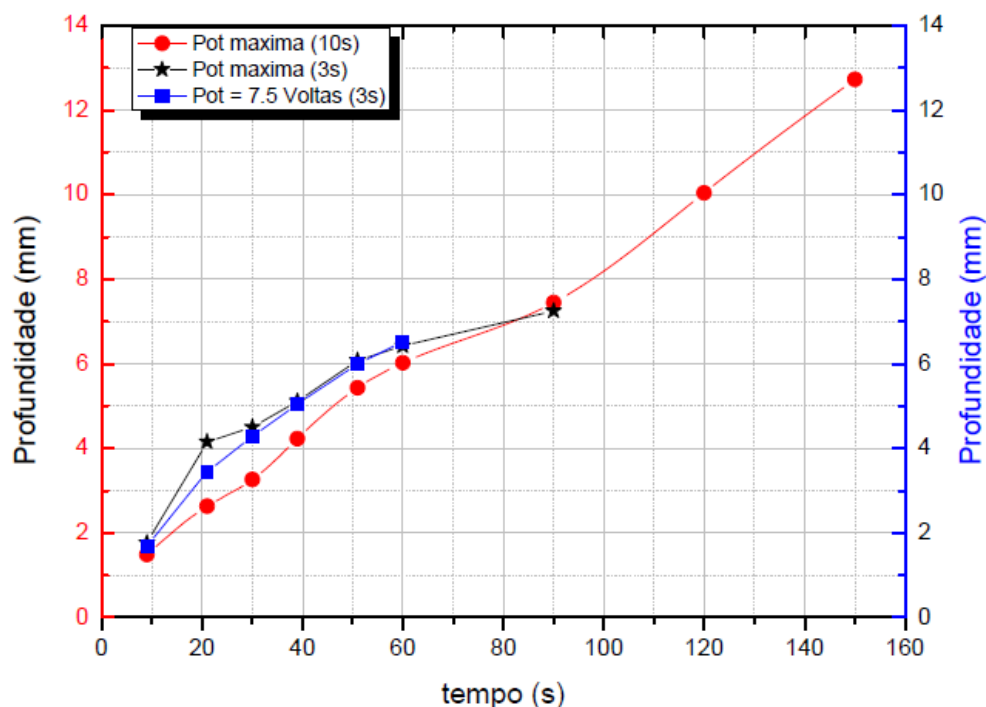


Figura 31 – Profundidade obtida para diferentes tempos de exposição da amostra ao laser e com diferentes potências.

O processo de perfuração com laser pode ocorrer através de diversos efeitos, físicos e químicos, que por si só retira o material ou permite sua retirada com pouca energia mecânica adicional. Entre estes efeitos, podem ser citados evaporação, ablação, espalhamento, dissociação química e fusão. O efeito predominante depende das características físicas e químicas do material e do comprimento de onda da radiação utilizada.

Nos casos analisados, há sempre a necessidade de retirar mecanicamente o material alterado pelo laser. Para tanto, se utilizaram jatos de nitrogênio direcionados à região sendo perfurada para efetuar esta remoção. Esta técnica não é necessariamente a mais eficiente, mas foi possível sua instalação no local dos testes.

7.3. Análise da caracterização dos Materiais

Foram empregadas diferentes técnicas que ajudassem a entender o comportamento dos materiais testados antes e depois do processo de perfuração ou de irradiação dos lasers. Além disso, pode-se conhecer a composição química

dos mesmos, e, deste modo analisar se a perfuração teve como consequência a mudança de algum elemento presente ou a criação de um novo composto.

Foi feita a análise por espectroscopia de fluorescência de Raio-X, que é uma instrumental não-destrutiva que permite determinar a concentração de elementos na amostra analisada, utilizando as intensidades dos raios-x característicos emitidos. Esta técnica tem adquirido um papel importante na análise química, devido à possibilidade de detecção simultânea de elementos numa ampla faixa de número atômico e de concentração. Para os experimentos relatados a seguir, foi utilizado um o espectrômetro XRF dispersivo de energia (EDXRF) da marca Bruker (modelo S2 RANGER). Este equipamento realiza análise elemental desde o Sódio (Na) até o Urânio (U), desde 100% a nível ppm de amostras líquidas, sólidas e de pó, com pouca ou mais preparação da amostra.

Para estes testes foram usados dois tipos de amostras (sólidas e em pó). A amostra sólida foi usada para analisar o material antes do processo de perfuração (tamanho padrão usado 38 mm de diâmetro), e as amostras em pó foram aquelas recolhidas durante o processo de perfuração, visando analisar o que acontece com o material depois que ele é exposto ao laser. A análise por fluorescência de raios-X forneceu a composição química das três rochas (Tabela 14), ficando claro que o granito cinza possui, como esperado, alta concentração de sílica, enquanto o travertino é um carbonato típico, com muito pouca sílica. No entanto, a rocha comercialmente denominada granito branco mostrou uma importante concentração de carbonato que, como será visto mais adiante, é fundamental no processo de interação do laser com essa rocha.

Tabela 14 – Resultados semi-qualitativos obtidos nesta análise

Granito Branco		Travertino		Granito Cinza Escuro	
Fórmula	Concentração	Fórmula	Concentração	Fórmula	Concentração
O	46,9	O	46,1	O	46,3
Ca	27,3	Ca	31	Si	30,8
Mg	9,41	Mg	12,8	K	7,33
C	8,18	C	9,28	Al	7,26

Si	5,03	Na	0,315	Ca	3,39
Al	1,93	Si	0,282	Fe	3,28
Fe	0,431	K	0,139	Cl	0,807

As imagens obtidas com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) permitem apreciar numa escala da ordem de 1µm a morfologia da superfície das rochas. Na Figura 32(b), nota-se claramente que o granito cinza, ao contrário das outras duas rochas, apresenta cristalização em grãos grandes com várias dezenas de micra.

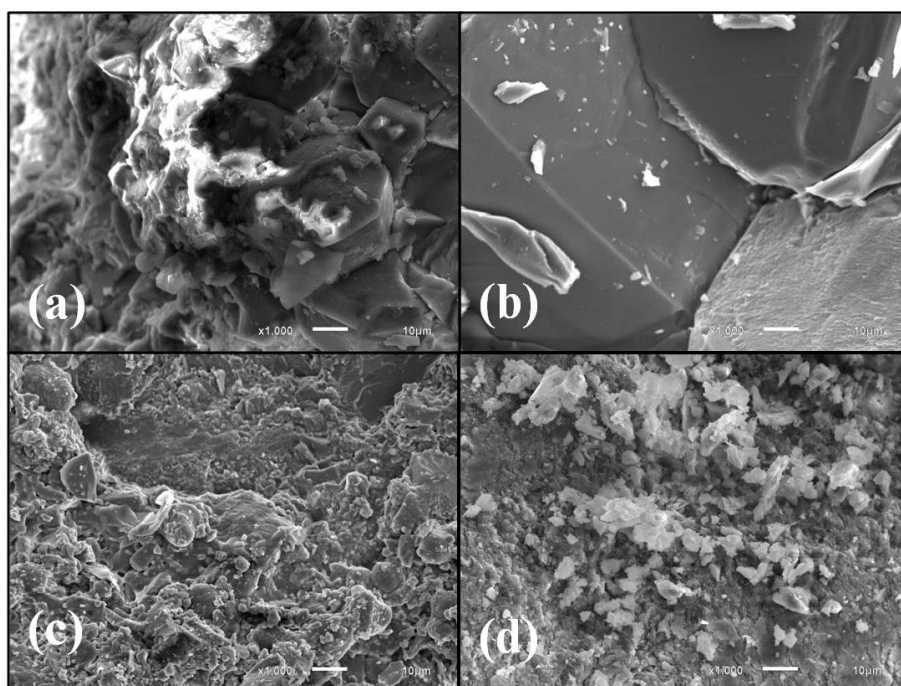


Figura 32 – Morfologia dos materiais empregados, utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). (a) Amostra ANP. (b) amostra de granito cinza. (c) amostra de Travertino. (d) amostra de granito branco

Na Figura 33, pode-se observar a composição química usando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura para cada uns dos materiais, para o granito cinza é notório que o silício é o elemento com maior concentração Figura 33(b), e no caso do travertino o elemento sobressaliente é o cálcio evidenciando ser uma rocha carbonática Figura 33(c).

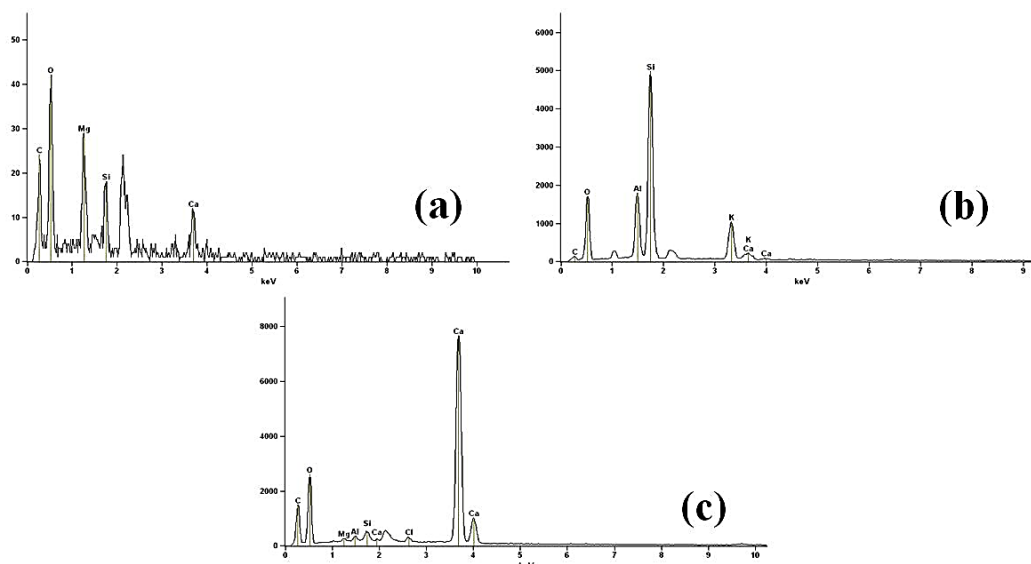


Figura 33 – Composição química usando a Microscopia Eletrônica de Varredura dos materiais empregados (a) granito branco, (b) granito cinza, e (c) travertino.

As análises Termogravimetrias (TG) indicaram que o granito branco e o travertino apresentam forte perda de massa próxima a 800 °C, visto na Figura 34(a) e na Figura 34(b). O processo responsável por essa perda de massa foi identificado como sendo a calcinação do carbonato de cálcio (CaCO_3) gerando gás carbônico (CO_2) que é perdido restando óxido de cálcio (CaO). Este processo é à base da perfuração desses dois materiais. Para confirmar que se trata de um fenômeno puramente térmico, amostras desses materiais foram tratadas termicamente em um forno a 800 °C por alguns minutos. O resultado obtido foi semelhante ao efeito da incidência do laser, confirmando assim a hipótese (Anexo A).

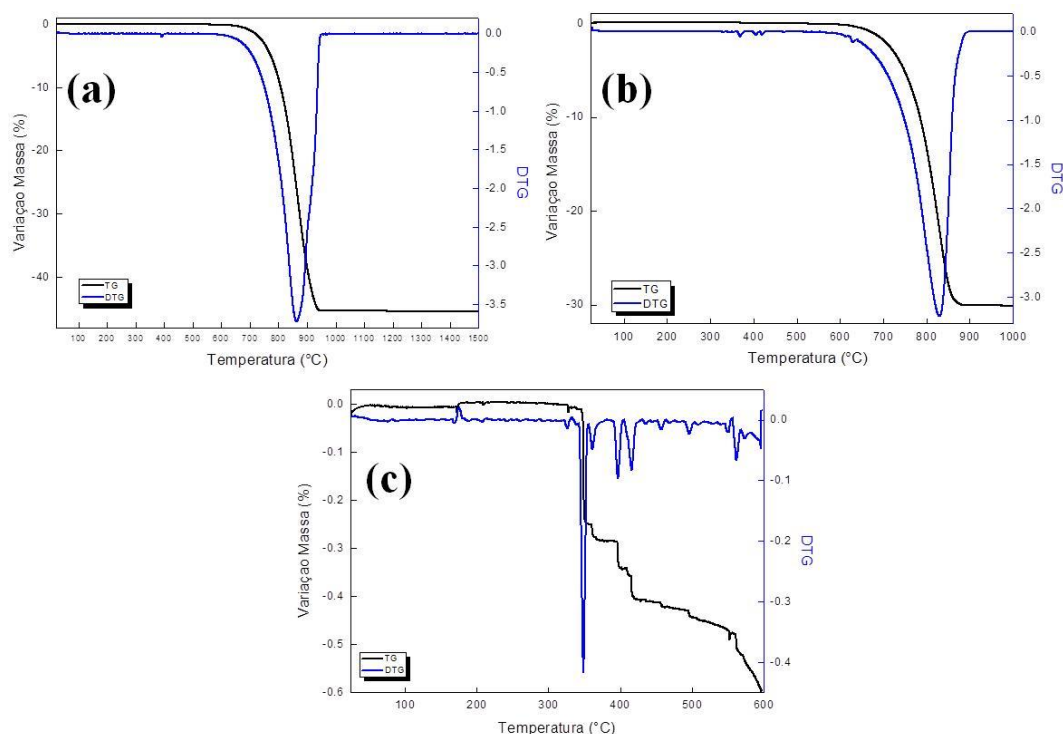


Figura 34 - Variação da massa do granito branco. (a) T = 1500 °C. (b) T = 1000 °C. (c) T = 600 °C.

O resultado da TG para o granito cinza não apresenta perda significativa de massa, menos de 1%. Na Figura 35 observa-se que a temperatura de fusão é de 800 °C e segundo os testes mostram vitrificação na zona irradiada pelo laser quando ele é usado de modo contínuo, ou seja, que a temperatura de interação é muito maior.

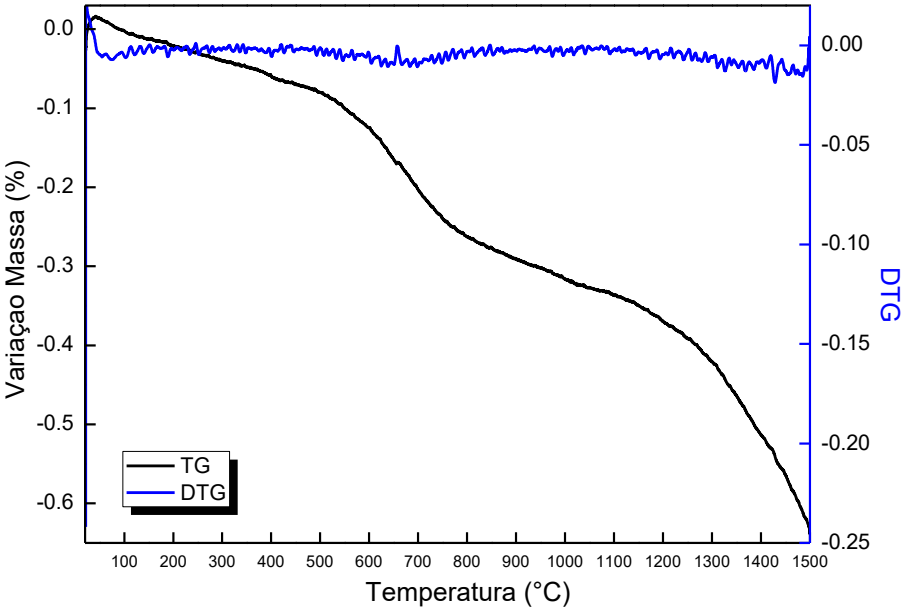


Figura 35 – Variação da massa do granito cinza (T = 1500 °C).

As análises Termogravimetrias (TG) para o travertino apresentam forte perda de massa próxima a 800 °C Figura 36(a), além disso, e possível notar que depois de calcinada a amostra segue perdendo massa como é observado na Figura 36(c).

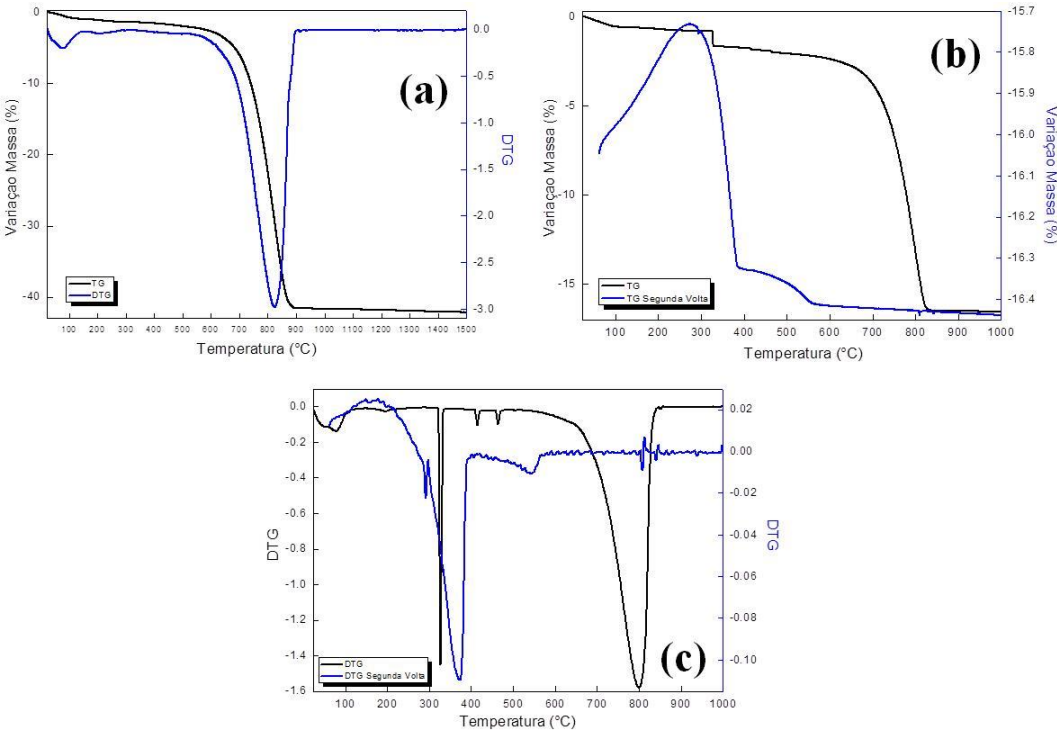


Figura 36 – Variação de massa do travertino (a) T = 1500°C. (b) segunda volta T = 1000°C. (c) Comparação das duas voltas

O princípio da técnica do DTA é baseado nas características dos materiais para demonstrar aumentos de calor endotérmico ou exotérmico durante o processo de aquecimento e resfriamento. Esta técnica permite avaliar a presença de transformações químicas e físicas que envolvem absorção ou liberação de energia. Os resultados indicaram transformações não reversíveis para o granito branco e para o travertino, enquanto que o granito cinza apresenta uma transformação reversível que está associada à fusão e posterior solidificação do material. Esses resultados podem ser vistos na Figura 37.

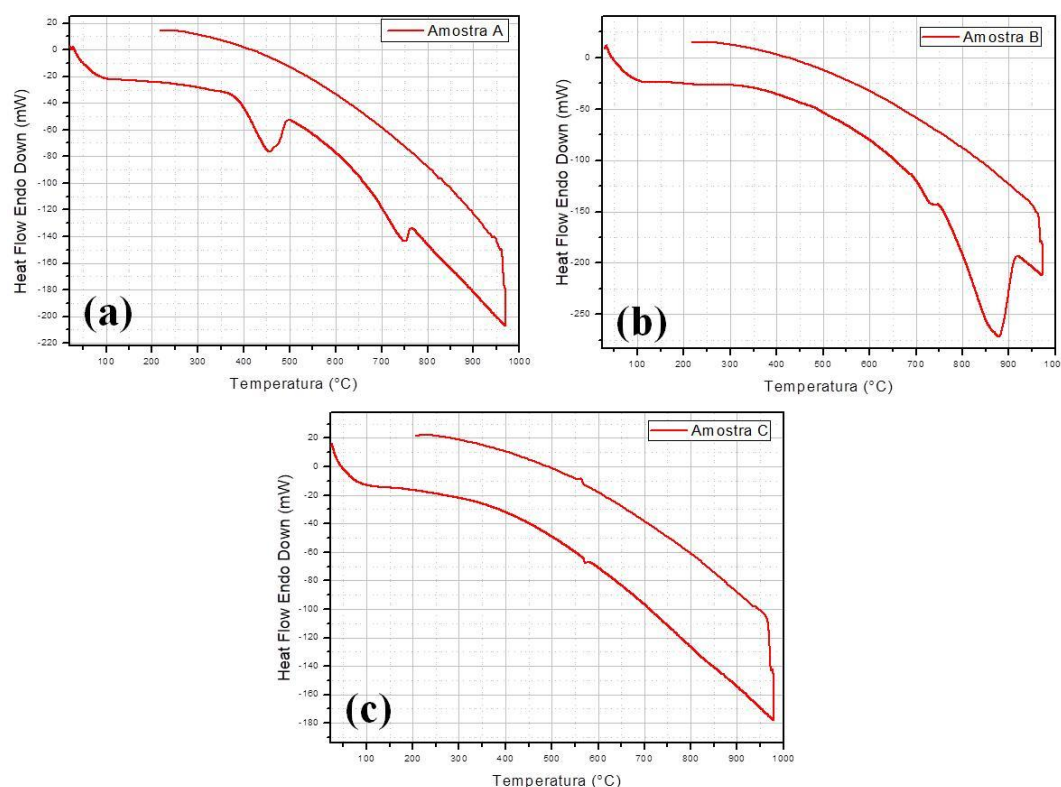


Figura 37 – Comportamento térmico dos materiais analisados. (a) Granito branco. (b) Travertino. (c) Granito cinza.

7.4.

Irradiação das amostras com os Lasers CO₂ e Diodo e Utilizando Gás para a Remoção do Material

O processo de perfuração com laser pode ocorrer através de diversos efeitos, físicos e químicos, que por si só retiram o material ou permitem a sua retirada com pouca energia mecânica adicional. Entre estes efeitos, podem ser citados evaporação, ablação, espalhamento, dissociação química e fusão. O efeito

predominante depende das características físicas e químicas do material e do comprimento de onda da radiação utilizada.

Nas rochas analisadas neste trabalho, há sempre a necessidade de retirar mecanicamente o material alterado pelo laser. Para tanto, foram utilizados jatos de nitrogênio direcionados à região sendo perfurada para efetuar esta remoção. Esta técnica não é necessariamente a mais eficiente, mas foi possível sua instalação no local dos testes.

Durante a irradiação dos materiais, foi possível notar que as rochas não apresentam estruturas homogêneas. Assim, pode-se observar diferenças nos resultados dos processos de perfuração, como é observado na Figura 38. Na Figura, foram usadas as mesmas condições de potência e tempo de exposição ao laser, mas foram obtidos resultados diferentes.



Figura 38 – Diferenças de resultado na perfuração do granito branco que podem ser atribuídas à não homogeneidade do material (a) laser de CO₂ máxima potência, tempo de exposição 10s. (b) laser de CO₂ máxima potência, tempo de exposição 10s.

Um primeiro teste usando gás de nitrogênio a uma pressão de 100 bar para remover as camadas de material, em jatos curtos intercalados com irradiações de 10 segundos do laser. Foram feitas três perfurações, variando o tempo total de exposição ao laser sendo, a mais longa, de 120 segundos. A Figura 39 mostra como a luz do laser incide na superfície da rocha.

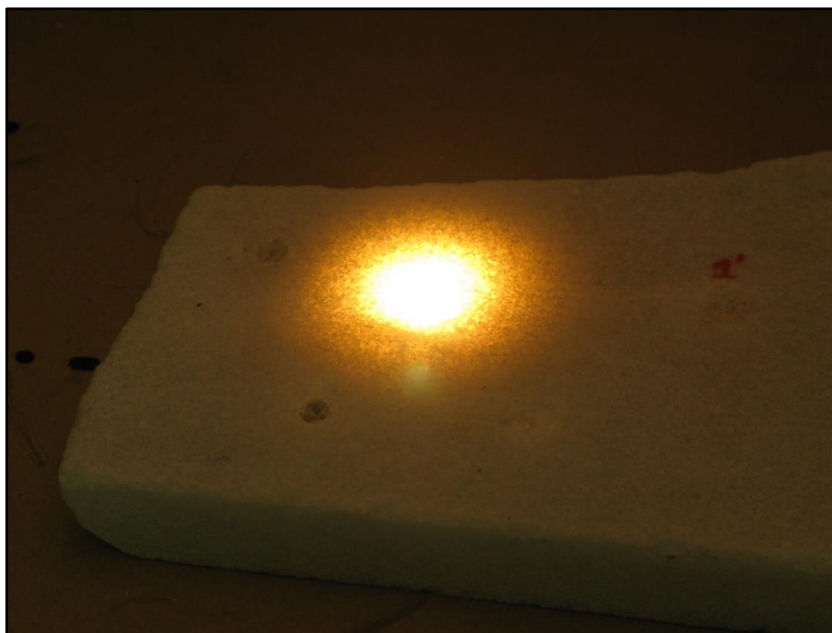


Figura 39 – Perfuração usando nitrogênio para limpar o material removido em granito branco.

Na Figura 40, pode-se comparar os resultados obtidos com a remoção manual e usando o nitrogênio a alta pressão para limpar o material residual depois da irradiação com o laser. O uso do gás de nitrogênio permite que o processo de perfuração seja contínuo, com diâmetro bastante homogêneo logo abaixo da superfície da rocha.

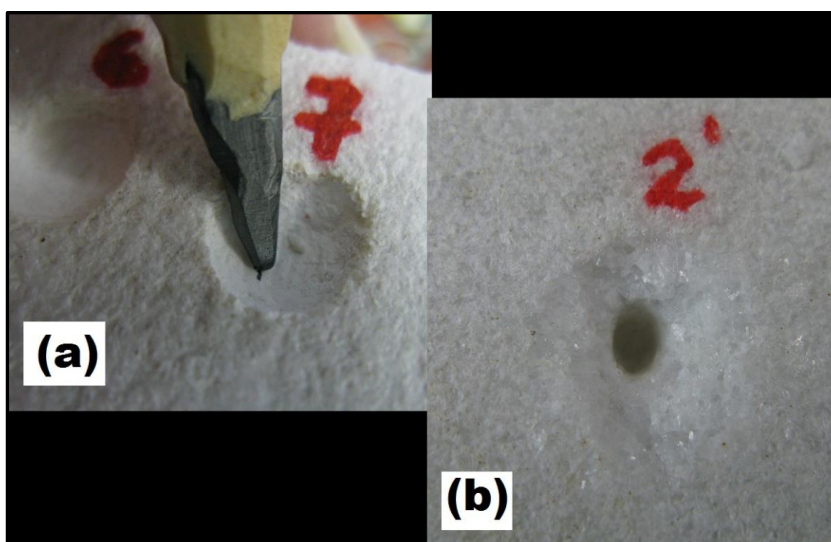


Figura 40 – Furo à potência máxima com um tempo de 120 seg (Granito branco). (a) remoção do material manualmente (profundidade de 2,95 mm), e (b) usando nitrogênio para limpar o material removido (profundidade de 9,84 mm).

Para efeito de comparação, o volume retirado neste procedimento pode ser visto no gráfico da Figura 41, onde fica claro o crescimento linear do volume com a energia utilizada quando o material é retirado durante a perfuração com o nitrogênio, indicando que este processo melhor a eficiência da perfuração.

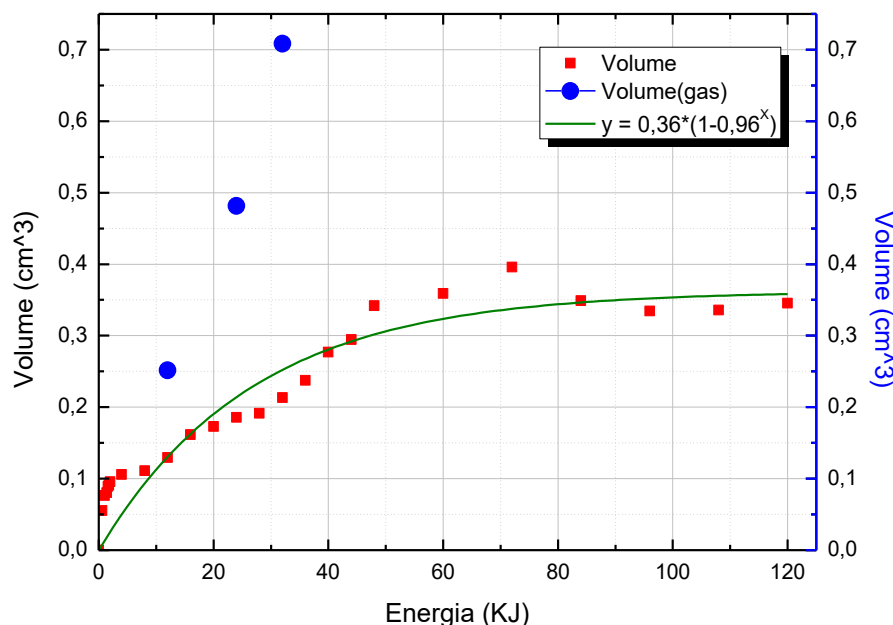


Figura 41 – Volume de material retirado em função da energia luminosa total utilizada. Pontos vermelhos sem retirar material fragilizado e pontos azuis com a retirada do material fragilizado com o nitrogênio entre irradiações do laser.

7.4.1.

Irradiação das Amostras de Granito Branco e Cinza

Para analisar o comportamento do granito branco, foi irradiada uma amostra de granito com o laser de CO₂. O comportamento do granito fundido pode ser esclarecido através da análise das fotos tiradas nos experimentos. As fotografias mostram uma sequência do comportamento desde o início da irradiação com o laser até 180 segundos. Foi observado que durante o processo são criadas tensões térmicas que fraturam o material, Figura 42(b). A profundidade torna-se maior no decorrer do tempo, alcançando-se um furo de profundidade de 20 mm. Além disso, como se vê nas Figuras 42(c) e 42(d), quanto maior a profundidade do furo, menor é o seu diâmetro. Uma possível explicação para isto é que a pressão do gás

para limpar não tenha sido suficiente para retirar todo o material atingido pelo laser.

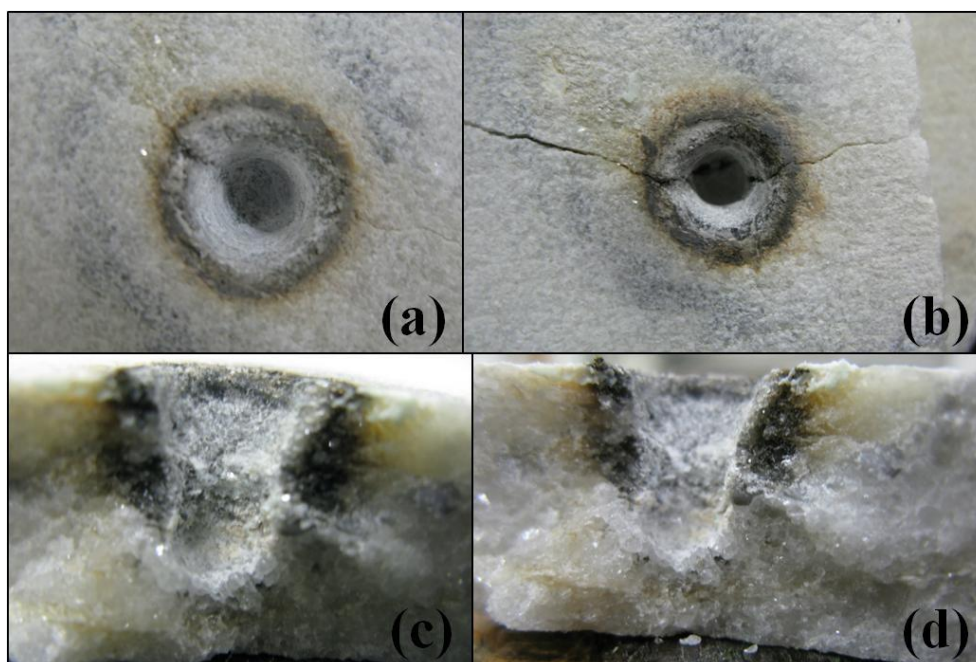


Figura 42 – Perfil do processo de perfuração do granito branco

As Figuras 43(a)-(d) mostram fotos do granito cinza obtido a partir desta experiência. A Figura 43(a) é uma vista superior do granito irradiado com o laser. A Figura 43(b) é uma vista de cima ampliada do furo criado na amostra de granito. A partir destas imagens, foram observados objetos vítreos transparentes cristalizados, cobrindo a parede do furo. A Figura 43(c) é uma imagem das primeiras irradiações do laser sem ocasionar fraturas. Observa-se que o granito fundido estava prestes a sair do fundo enquanto era aquecido pela radiação laser, no entanto, este não pode sair totalmente do furo, solidificando-se no fundo para fechar o fundo do furo, o que podasse achar que a pressão do gás não é suficientemente alta para arrancar o material vitrificado. Desta forma, o vidro cristalizado que se solidificou no furo pode refletir e espalhar o laser, o que diminui a eficiência da perfuração por falta de calor necessário para processar ou fundir a amostra de granito. Como resultado, um furo completo não pode ser criado pela irradiação do laser (Figura 43(d)).

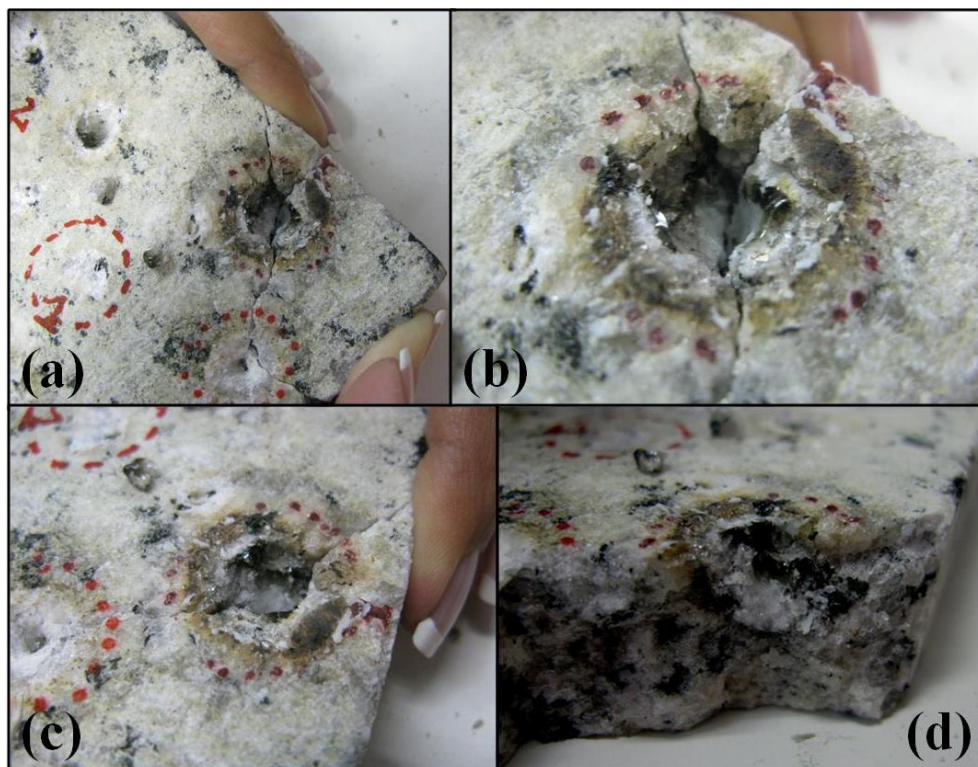


Figura 43 – Sequência do processo de perfuração do granito cinza usando jatos de gás nitrogênio para remover o material fragilizado.

O granito cinza apresenta composição química com grande concentração de silício, compatível com a presença expressiva de sílica (SiO_2) e os resultados de TG não apresentam perda de massa significativa quando aquecido. No entanto, observa-se que, sob irradiação dos lasers, ocorre a fusão do material que, caso não seja removido, permanece no local em forma densa, mas com aspecto vítreo. Esta observação é compatível as medidas de DTA, que indicam uma transição reversível em termos energético, próximo a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, que é fusão e posterior solidificação na forma vítrea. Assim sendo, também é possível perfurar este material com os lasers utilizados, mas para tal deve-se retirar o material enquanto este se encontra na fase líquida.

A Figura 44 mostra os resultados obtidos com amostra de granito branco perfurado com os dois lasers (CO_2 e diodo) nas mesmas condições de operação, potência máxima e tempo de exposição de 8 segundos, demonstrando que apresenta melhores resultados em quanto a profundidade o laser de CO_2 (15,12 mm), sendo este um furo limpo que o diâmetro diminui à medida que o furo vá se aprofundando.

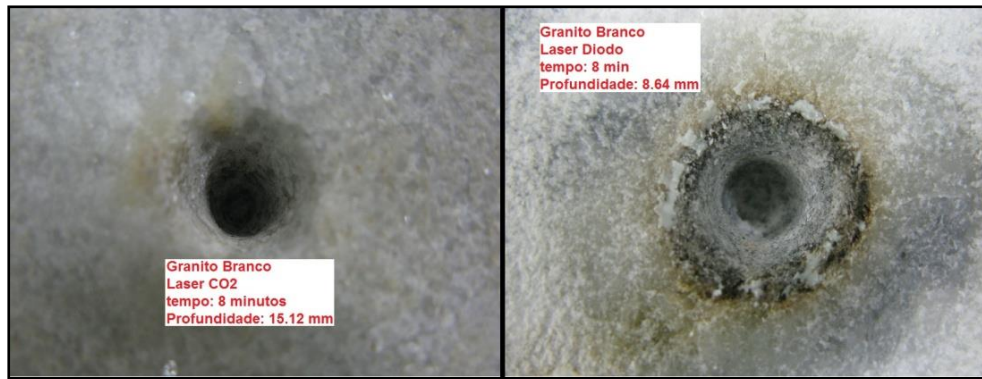


Figura 44 – Comparação dos lasers de CO₂ e laser de diodo nas mesmas condições de trabalho para uma amostra de granito branco.

Analisando os resultados obtidos a partir da interação laser – rocha com o granito branco usando os dois lasers, durante o processo foram registradas mudanças no desempenho dos lasers no material testado, pode-se apreciar que a interação do laser de CO₂ tem um melhor resultado com o granito branco onde se necessita menor energia para retirar uma maior quantidade de material fragilizado Figura 45(a), onde também é possível comparar que a eficiência do laser de CO₂ é melhor já que esta é alcançada em um menor tempo de interação com a superfície da rocha (Figura 45(b)).

Para o cálculo da energia se teve em consideração a potência do laser pelo tempo de exposição do laser, para estes resultados os lasers foram operados a potência máxima no modo contínuo, o tempo de exposição do laser foi de 10 segundos, com jatos de gás nitrogênio para remover o material fragilizado cada 3 segundos eq. (35).

$$E = P_{real} * tempo [J] \quad (35)$$

Onde a potência está dada do laser em Watts e o tempo em segundos.

Tendo em conta a eq. (35) se calcula a eficiência

$$\eta = \frac{Vol_{rem}}{E} \left[\frac{cm^3}{KJ} \right] \quad (36)$$

Onde

η = Eficiência

Vol_{rem} = Volume removido

E = Energia

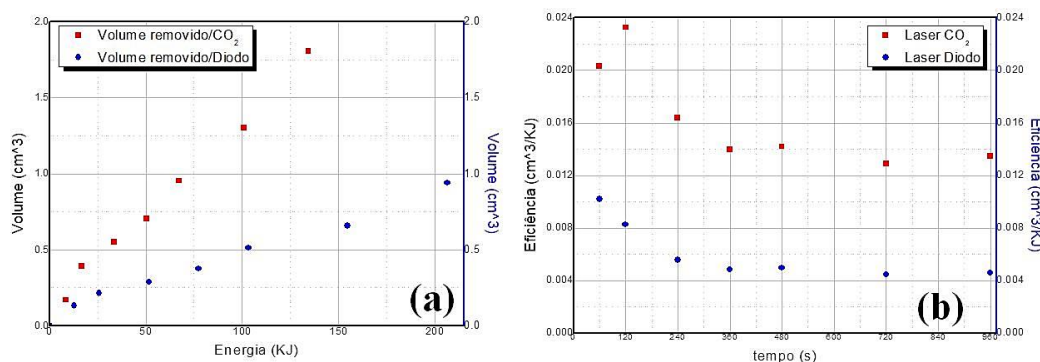


Figura 45 – Análise usando laser (CO₂ e Diodo) no granito branco nas mesmas condições de trabalho. (a) energia necessária para remover certa quantidade de volume. (b) Eficiência dos lasers.

7.4.2.

Irradiação da Amostra Mármore

A seguir, apresenta-se uma análise dos resultados encontrados com travertino, este apresenta um comportamento semelhante sob efeito da radiação laser com o granito branco. Conforme foi visto, a análise de TG indicou uma importante perda de massa no caso do travertino e do granito branco, ambos perdendo aproximadamente 40% de suas massas quando sua temperatura alcança a faixa dos 800 °C. Desta forma o material remanescente, predominantemente CaO, se apresenta na forma de pó e pode ser facilmente removido, pelo jato de gás de nitrogênio. A Figura 46 mostra a superfície de algumas amostras de travertino expostas a diversas intensidades superficiais de laser de CO₂. Na Figura 46(a), temos a superfície exposta a um nível de radiação suficiente para promover a alteração na coloração, onde a reação é apenas superficial, não sendo suficiente para gerar uma quantidade significativa de material a ser retirado. Na Figura 46(b), tem-se uma amostra exposta a uma potência de 140 W do laser de CO₂ durante 60 segundos. Neste caso, fica claro que parte do material foi transformada e se encontra na forma de pó compactado. Quando retirado este material, obtém-se um furo com o aspecto da amostra apresentada na Figura 46(c).

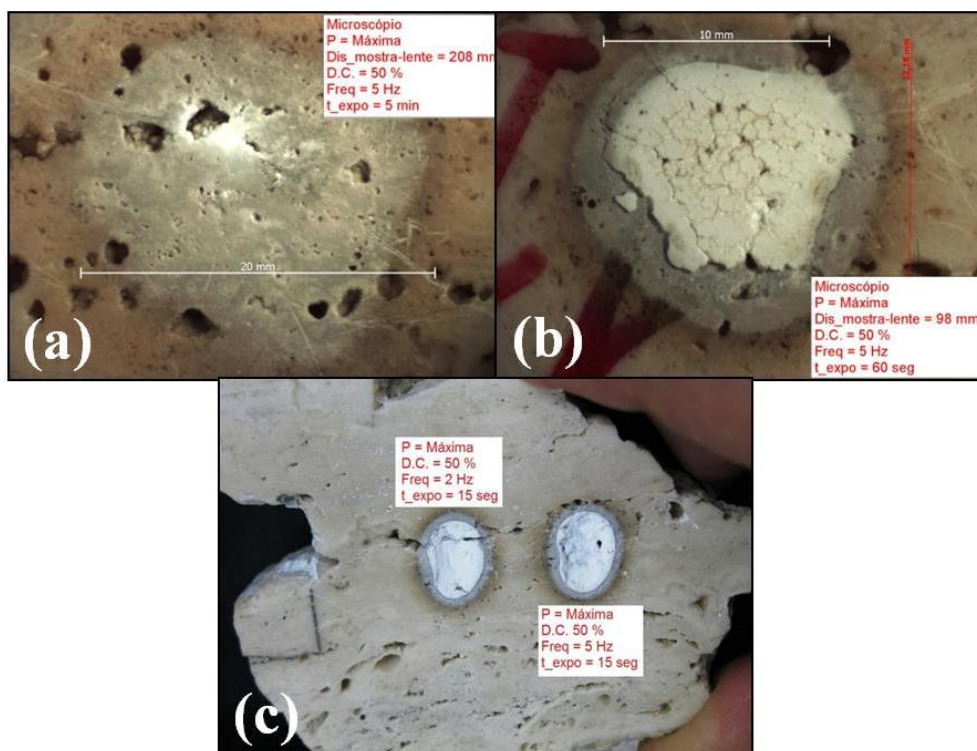


Figura 46 - (a) Densidade superficial de potência óptica insuficiente para fragilizar o material; (b) Material alterado que permanece no local e precisa ser retirado; (c) Regiões que sofreram efeito da radiação e posterior retirada do material fragilizado na forma de pó.

Na Figura 47 observa-se o perfil da amostra de travertino depois do processo de perfuração, onde se vê a mudança do material em quanto a cor e textura, isto pode ser pelo aumento de temperatura que este sofre.

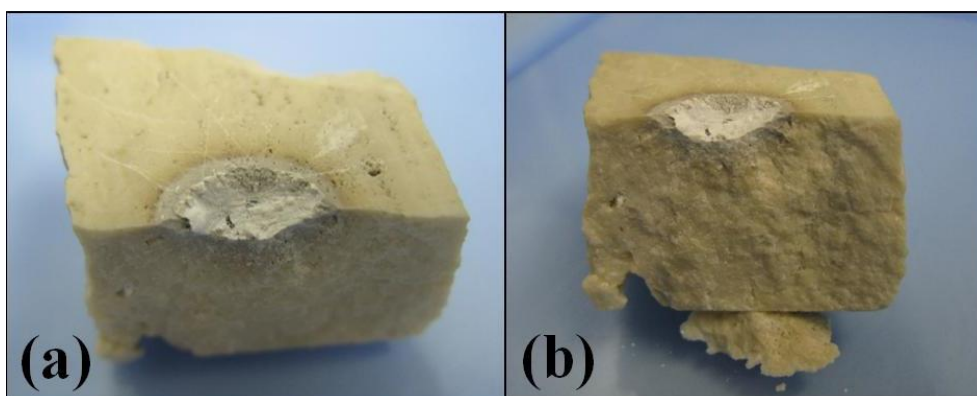


Figura 47 – Vista da transformação da composição química do travertino

Na Figura 48(a) pode-se observar uma amostra de travertino depois de ser irradiada pela ação do laser de CO₂ cabe ressaltar a mudança de cor na superfície

da rocha isto é possível a composição química do material quando é submetida a câmbios de temperatura, as transformações de fase são visíveis. A Figura 48(b) mostra o resultado de um furo passante feito com laser de CO₂ em uma amostra de travertino.

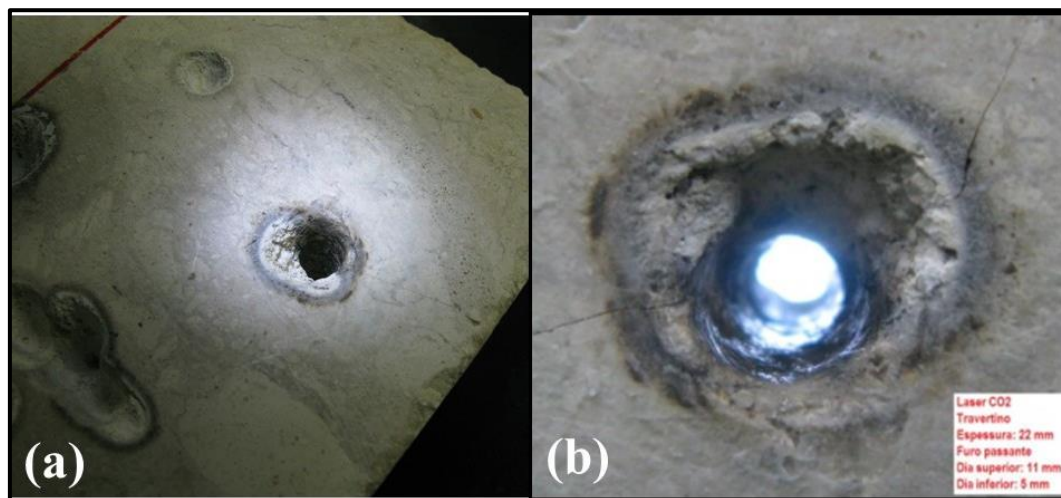


Figura 48 – (a) Perfuração travertino laser CO₂ (t = 60 s) (b) Furo passante no travertino pela irradiação do laser de CO₂

A repetição desta sequência (irradiação da amostra com o laser e o uso intercalado do jato de nitrogênio para limpar) compõe o processo de perfuração. O ajuste de parâmetros como o tempo de irradiação, a densidade de potência e o comprimento de onda do laser influenciam diretamente na eficiência do processo, e alguns deles foram estudados numa primeira fase. A Figura 49(a) mostra um gráfico do volume removido em função da energia aplicada no processo, os pontos vermelhos indicam a interação constante laser – rocha, observa-se que, como o material fragilizado permanece no local, em poucos segundos o processo de perfuração satura. Por outro lado, os pontos azuis marcam a retirada do material fragilizado seja manualmente ou com o uso dos jatos de nitrogênio antes de se prosseguir com a incidência do laser, nota-se um crescimento linear do volume de sólido removido com a energia total utilizada, evidenciando que a perfuração segue com a mesma eficiência.

A otimização do tempo de exposição de interação dentre o laser de diodo e os materiais a testar (granito branco e o travertino), e está apresentado na Figura 49(b). Nota-se que para esses materiais e para a potência disponível (200W) e

diâmetro de feixe (8 mm) o tempo entre jatos de gás de nitrogênio deve ser próximo a 10 segundos, onde se observa que para o granito branco precisa-se uma menor quantidade de energia requerida para remover certo volume de rocha, tornando o processo mais eficiente, causando microfissuras no material pelo aquecimento térmico que produz o carbonato de cálcio presente no granito.

Os resultados para a profundidade de perfuração em função do tempo integrado de exposição ao laser, para diversos tempos entre jatos de gás, para os dois lasers podem ser vistos na Figura 49(c). Neste caso a amostra é de travertino e não foi ajustado para a mesma potência dos dois lasers, o que explica a maior velocidade de penetração obtida para o laser de diodo que possui aproximadamente 50% mais potência que o laser de CO₂. O experimento indicou que para potências maiores se tem efeitos secundários quando aumentava a profundidade do furo, estes efeitos incluíam o derretimento do material fragilizado causando estreitamento do diâmetro reduzindo assim a transferência de energia e por tanto a taxa de penetração.

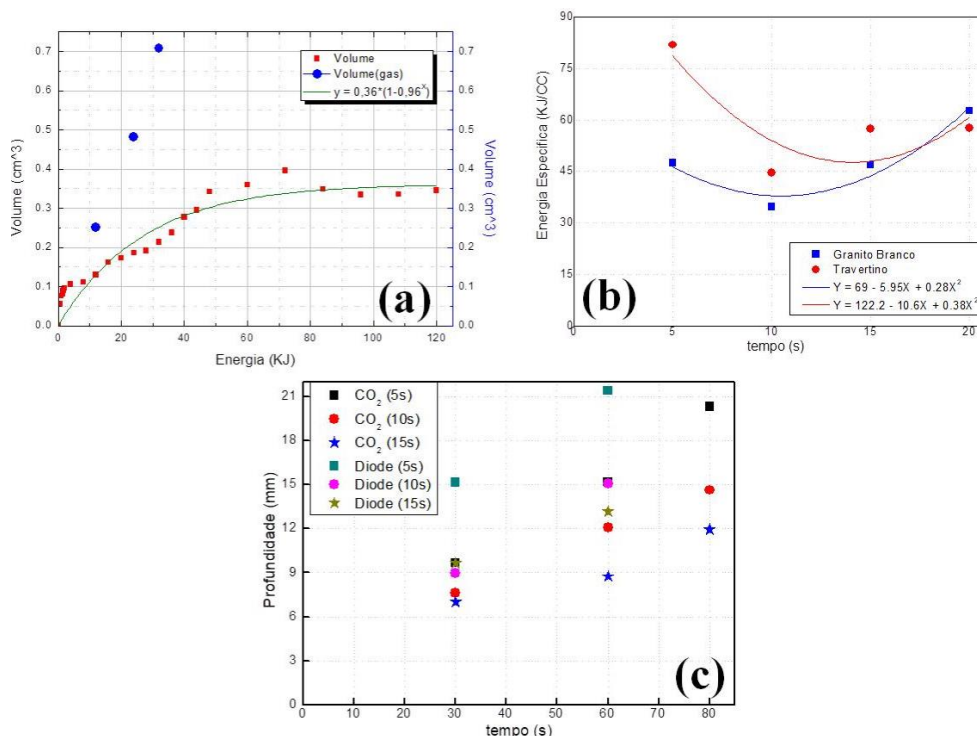


Figura 49 – (a) Volume de material retirado em função da energia luminosa total utilizada, (b) Energia específica em função do tempo entre os jatos de gás de nitrogênio, (c) Profundidade perfurada em função do tempo com ambos os lasers em diversas condições de exposição.

7.5.

Análise do Material Fragmentado Produzido pela Irradiação do Laser

Levando em consideração que existem mudanças de fase nos materiais quando são expostos a altas temperaturas, decidiu-se fazer a análise qualitativa do material fragilizado produzidos pela irradiação dos lasers. Foram feitas análise de Microscopia Eletrônica de Varredura e análises térmicas (TG, DTA e DTG). As amostras foram preparadas em pó, já que os equipamentos só permitem amostras pequenas e bem trituradas. Para isto foram tomadas amostras do material fragilizado pela ação do laser nos casos do granito branco e do travertino, para o granito cinza o material levado para a análise foi aquele que vitrificou no local perfurado.

7.5.1.

Granito Branco

Como é possível notar que a perda de massa ocorre entre os 400 °C e os 800 °C (Figura 50), essa perda de massa é a consequência da calcinação do carbonato de cálcio (CaCO_3) restante no material.

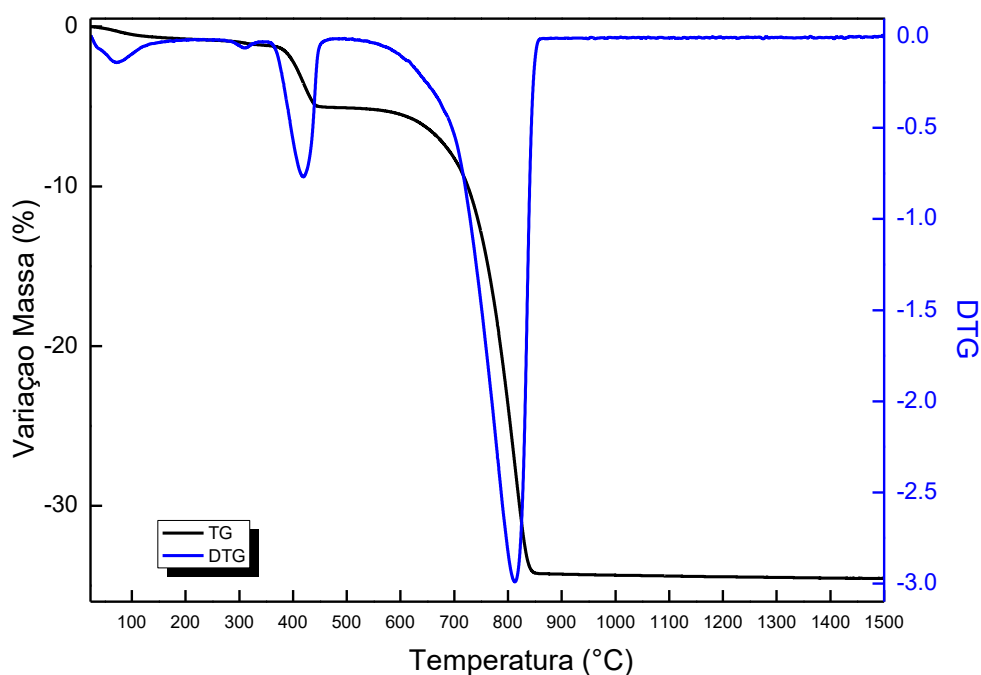


Figura 50 – Variação da massa dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do granito branco (T = 1500 °C).

Na Figura 51 se apresenta o resultado obtido na análise térmica (DTA) onde se observa que o processo térmico endotérmico irreversível, onde as maiores mudanças ocorrem entre os 800 °C, isto devido aos câmbios de fase que já havia apresentado o material no momento da interação laser – rocha, existindo a dissociação térmica o que produz dióxido de carbono (CO_2).

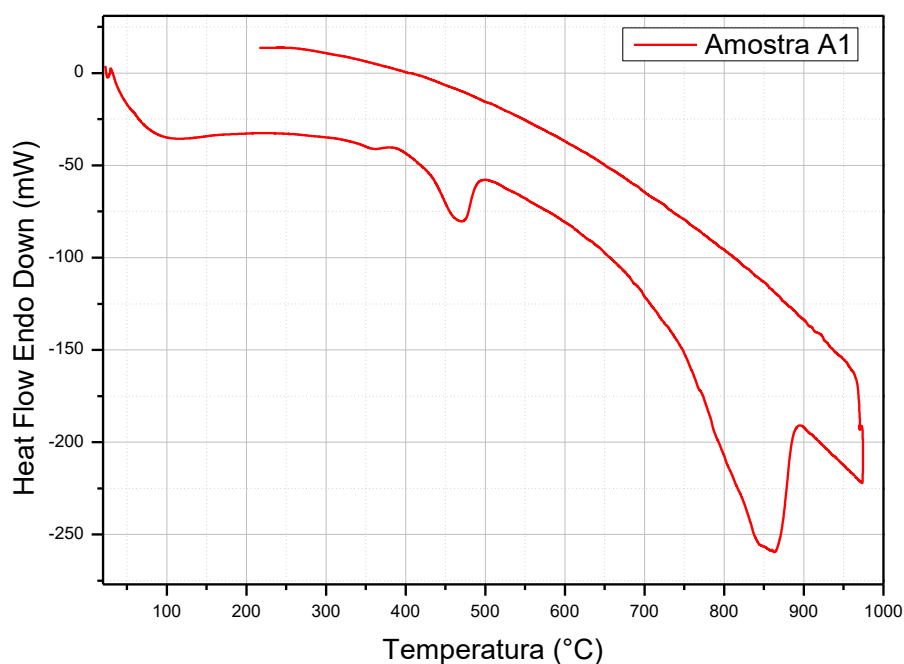


Figura 51 – Comportamento térmico dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do granito branco.

Para análise de Microscopia Eletrônica de Varredura, foi usada a amostra que foi irradiada com o laser Figura 52. Desta forma, se pode medir qualitativamente os elementos presentes na amostra original e aqueles que ficam depois que amostra é exposta ao laser.



Figura 52 – Identificação das zonas para a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura

Como pode ser visto na Figura 53, a quantidade de cálcio (Ca) diminui na zona perfurada e naquela que está perto da mesma. Além disso, cabe ressaltar que o elemento com maior concentração é o sílice (Si).

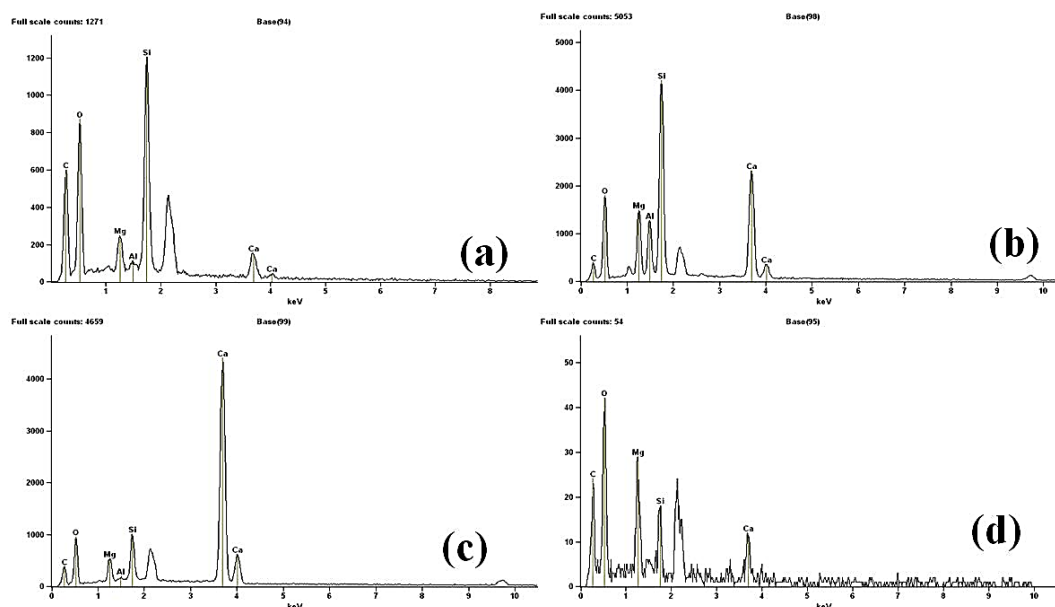


Figura 53 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura. (a) Região perfurada. (b) zona fronteira da região perfurada. (c) zona afastada da perfuração. (d) Região não perfurada.

7.5.2. Granito Cinza

Foi observado que durante o processo de irradiação dos lasers se tem mudanças no material, conforme foi observado na sequência de fotos do processo de perfuração do granito cinza mostrado na Figuras 43. Devido a estas mudanças, foi necessário fazer uma análise de fluorescência e análise térmica que ajudassem a determinar se é possível que haja uma mudança nas fases cristalinas no material ou se aplicar calor cria novos enlaces químicos. Além disso, quando foi exposto o bloco de granito cinza ao laser se criou uma lã mostrada Figura 54.



Figura 54 – Imagem microscópica da lã no granito cinza

Ao ser analisado microscopicamente, pode-se constatar que este se produz pela quantidade de silício que este material contém. Quando é exposto ao calor do laser em períodos curtos de tempo, na Figura 55 observam-se bolinhas na lã de vidro.

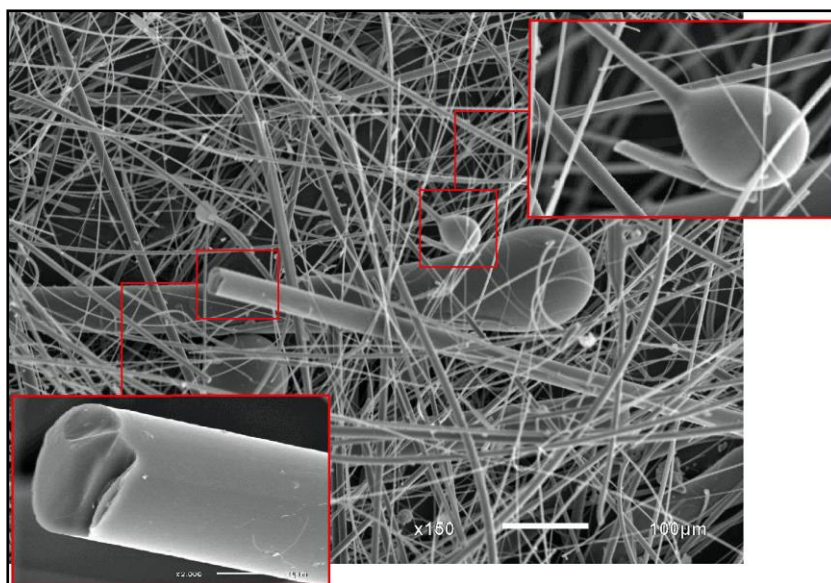


Figura 55 – Criação de lã no granito cinza pelo aumento da temperatura.

Na Figura 56 mostra os resultados obtidos no microscópio eletrônico de varredura (MEV) onde foram medidos diferentes pontos para obter a concentração dos elementos presentes na lã de vidro, produto da interação do laser e o granito cinza. Os pontos foram medidos onde a espessura era de máxima extensão. Nestes pontos, é possível notar que o elemento com maior presença é o silício (Si) com uma porcentagem de quase 70% sendo este o elemento presente no vidro, cimento e cerâmica e seu ponto de fusão é de 1600 K. O alumínio (Al) e o ferro (Fe) com uma quantidade menor. Tudo isto demonstra que o tempo de exposição do laser deve ser menor para evitar gerar vitrificação no lugar perfurado, e que este seja no modo pulsado.

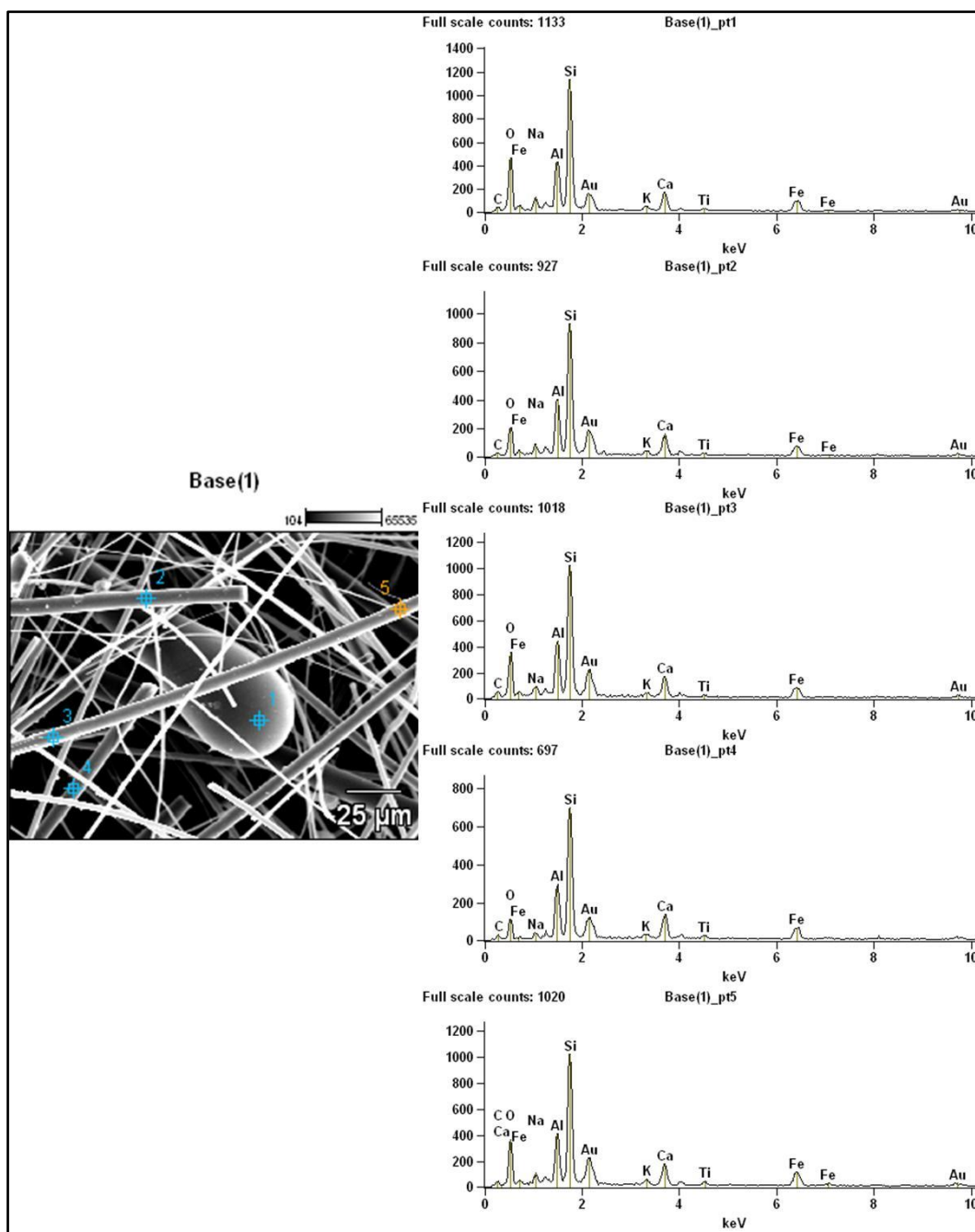


Figura 56 – Análise com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da lã de vidro gerada no granito cinza em diferentes pontos.

Foi possível comprovar que depois do processo de perfuração o material restante continua com uma quantidade grande de silício o qual diminui a eficiência na taxa de penetração criando um processo endotérmico reversível como se mostra na Figura 57.

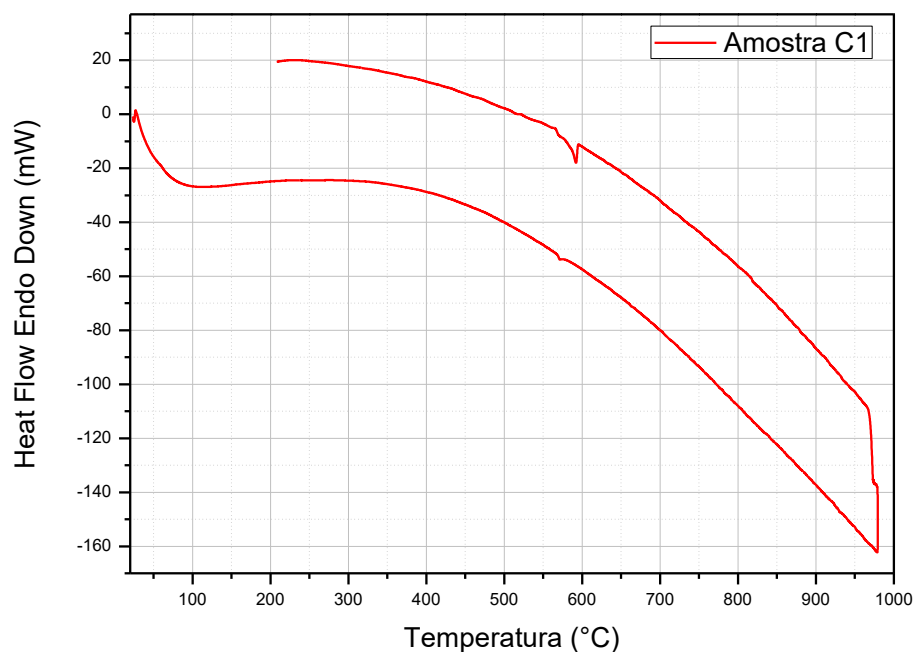


Figura 57 – Comportamento térmico dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do granito cinza.

A Figura 58 comprova que o elemento predominante nas diferentes regiões analisadas é o silício (Si) e o alumínio, nestes casos seria adequado testar os lasers no modo pulsado e com tempos menores de exposição do laser para assim diminuir a vetrificação do material no local perfurado. Este material torna ineficiente a perfuração empregando uma maior quantidade de energia para remover pequenos pedaços de material fragmentado.

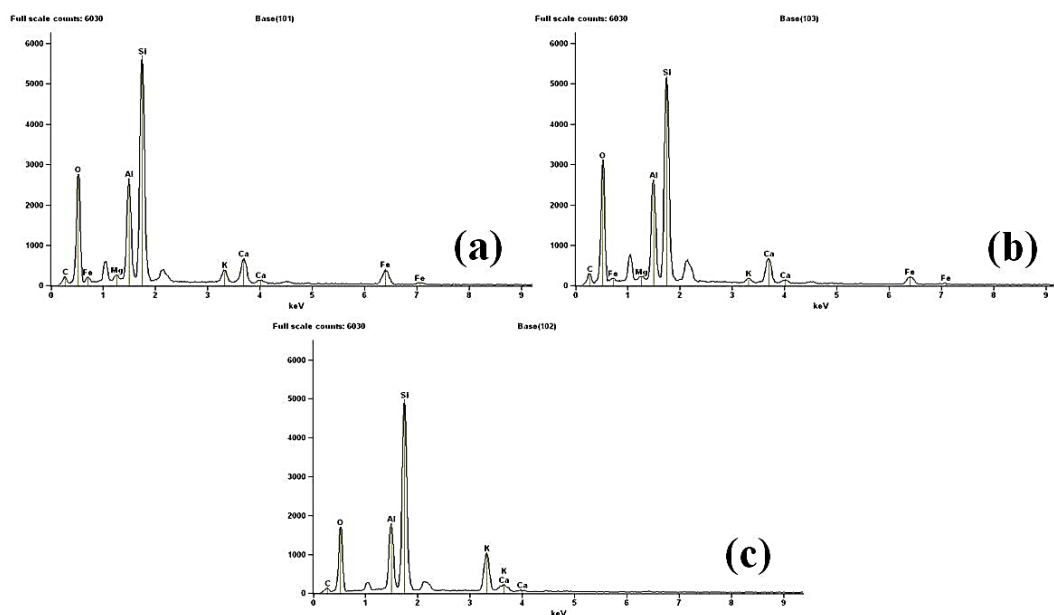


Figura 58 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura no granito cinza. (a) Região perfurada. (b) fronteira da região perfurada. (c) Região não perfurada.

7.5.3. Travertino

Na análise da amostra do material fragilizado do travertino apresenta uma perda de massa entre os 400 °C (Figura 59) a diferença da mostra original que a perde ocorre logo após dos 800 °C, isto indica que ao aumentar a temperatura no material também é removido certa quantidade de água presente nos poros da rocha.

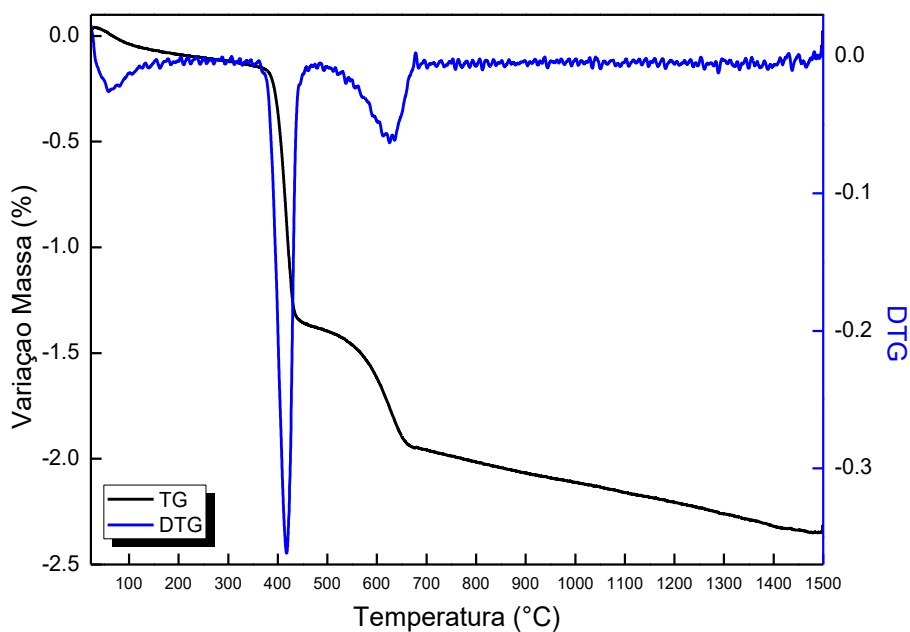


Figura 59 – Variação da massa dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do travertino (T = 1500 °C).

A análise térmica DTA mostra que o resultado obtido a partir da Termogravimetria (TG) a maior perda ocorre entre os 400 e 500 °C, sendo este um processo endotérmico irreversível apresentado na Figura 60.

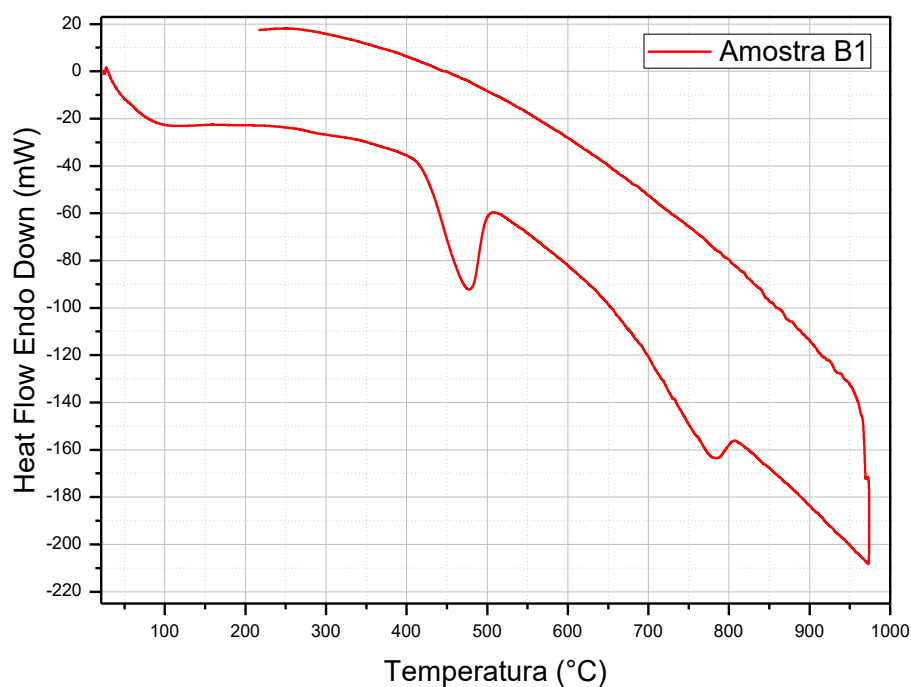


Figura 60 – Comportamento térmico dos fragmentos produzidos pela irradiação do laser do travertino.

A morfologia apresenta uma estrutura cristalina de grandes grãos depois do processo de perfuração, mostrando solidificação dos grãos de silício que são fundidos no local perfurado como é observado na Figura 61(d), devido ao aumento de temperatura.

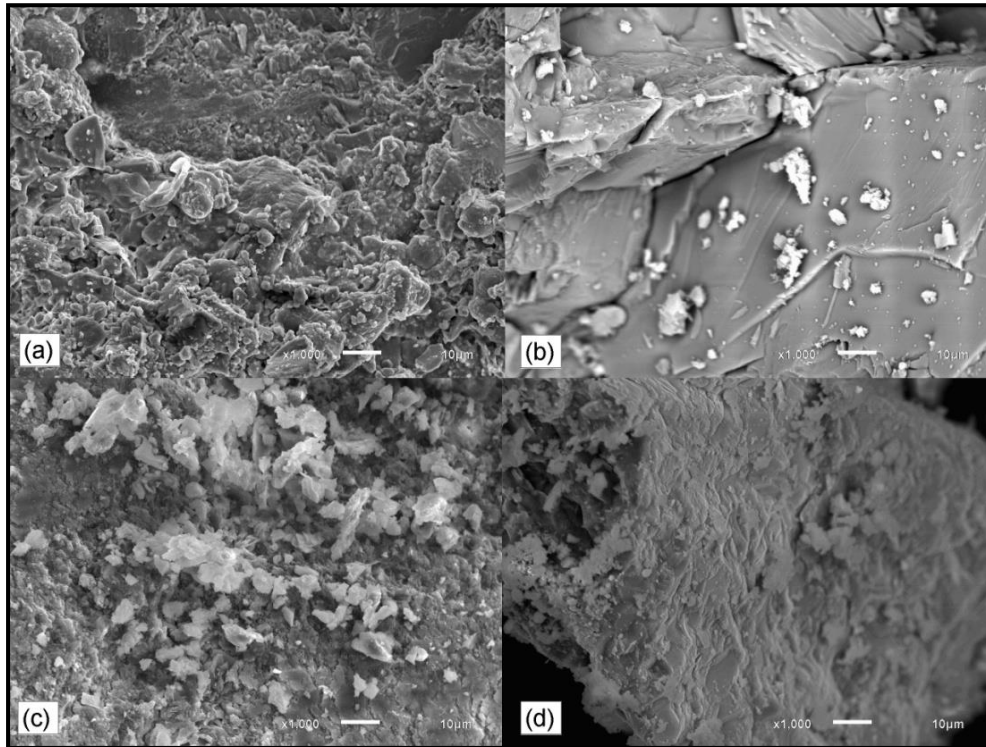


Figura 61 – Morfologia da amostra antes e depois do processo de perfuração

Levando em consideração as análises anteriores pode-se ressaltar que o cálcio é o elemento predominante antes e depois do processo de perfuração, o qual pode sofrer alterações criando novos enlaces com o silício que também está presente na região perfurada (Figura 62(a)).

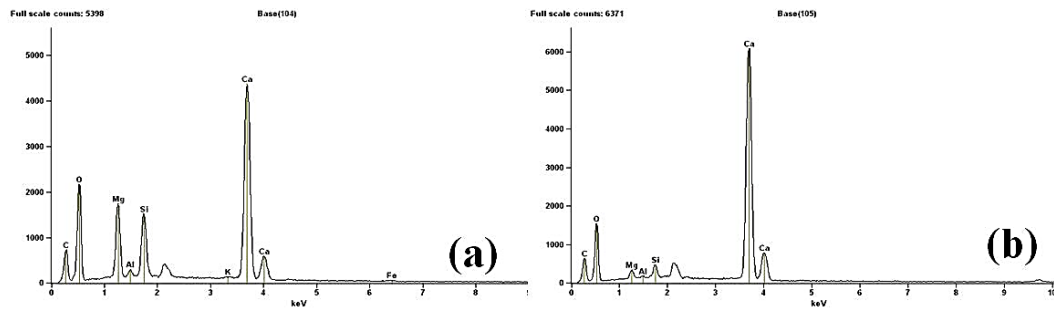


Figura 62 – Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura. (a) Região perfurada. (b) Região perfurada.

7.6. Energia Específica

Do ponto de vista das diferenças observadas entre os três materiais estudados, nota-se que o granito branco apresenta uma menor absorção óptica que o travertino na região espectral em que o laser de diodo emite, 980nm. Isto resulta em dois efeitos. Primeiro, pode-se notar que as bordas da região perfurada com o laser de diodo apresentam uma região de transição até a região do material virgem, indicando que houve alguma penetração da luz espalhada além da área de incidência do feixe. O mesmo não ocorre na perfuração com laser de CO₂, uma vez que o comprimento de onda de 10,6 μm é fortemente absorvido, ficando o efeito limitado à área de incidência do laser. Esta diferença pode ser observada na Figura 63, onde são apresentadas fotografias de perfurações em granito branco obtidas com os dois lasers.

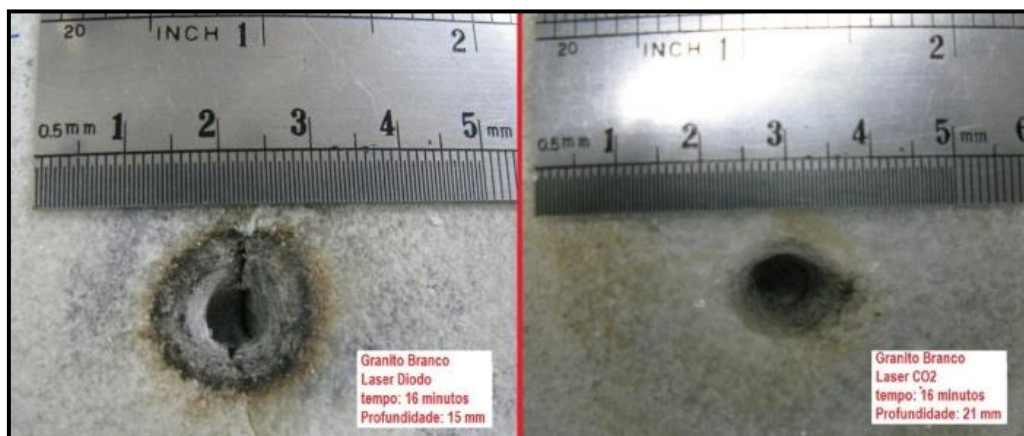


Figura 63 – Aspecto de furos em granito branco obtidas com laser de diodo (980 nm) à esquerda e com laser de CO₂ (10,6 μm) imagem à direita

O mesmo efeito não ocorre no caso do travertino, que absorve eficientemente ambos os comprimentos de onda. Como consequência, a energia específica de perfuração alcançada com o laser de diodo no granito branco é maior (menor eficiência) do que a obtida para o travertino, vide Figura 64. Por outro lado, os resultados encontrados com o laser de CO₂, indicam a mesma energia específica para o travertino, mas um valor significativamente menor para o granito branco.

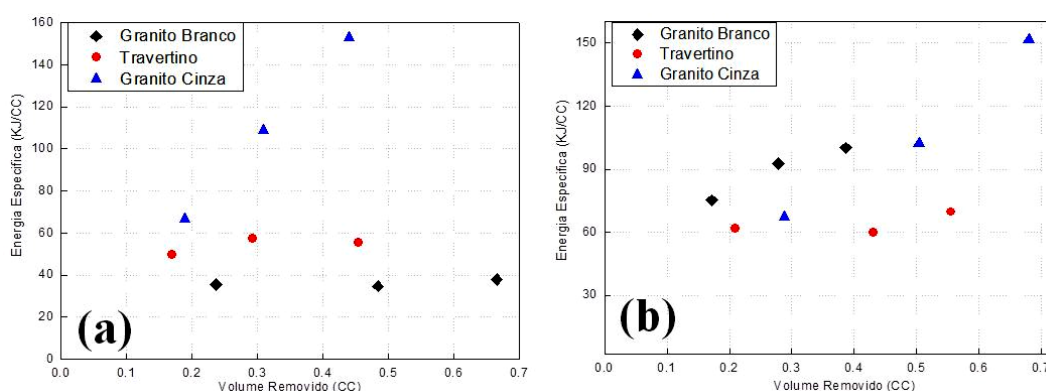


Figura 64 – (a) Energia específica para perfuração com laser de CO₂ (10,6 μm), (b) Energia específica em função do volume retirado para perfuração com laser de diodo (980 nm).

Granito cinza: Os resultados indicam que a eficiência no início da perfuração do granito cinza é semelhante ao encontrado para as outras rochas com energia específica de 60 kJ/cm³ para ambos os lasers. No entanto o processo de retirada de material através de jatos gás não apresenta bom desempenho à medida que o furo se aprofunda, levando a uma baixa eficiência. Estas observações podem ser confirmadas nos dados apresentados na Figura 65. Os resultados de energia específica para cada uma das rochas estudadas com os dois lasers estão resumidos na Tabela 15.

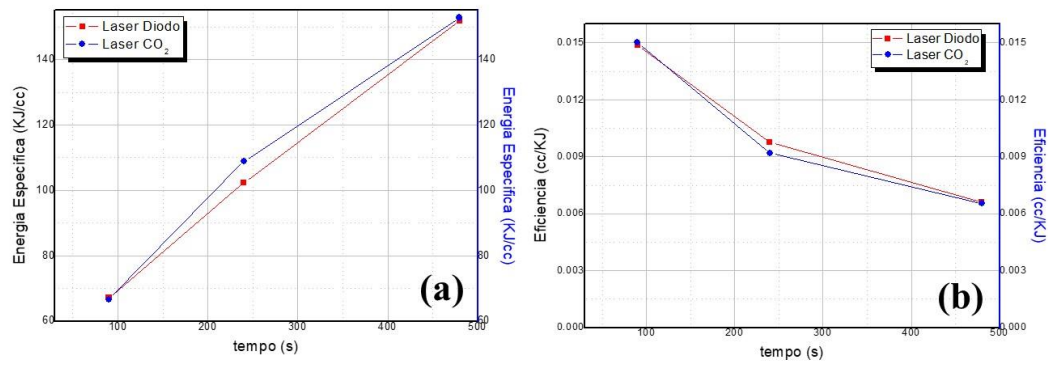


Figura 65 – Resultados com ambos os lasers. (a) Energia empregada para remover o material fragilizado. (b) Eficiência do processo de perfuração no granito cinza.

Bloco de Cimento: Medidas semelhantes foram feitas em blocos de cimento, com ambos os lasers, a potência máxima real (Figura 66). Os valores de energia específica encontrados são bastante mais baixos, ficando próximo a 12 kJ/cm³ nas melhores condições, vide Figura 67.



Figura 66 – Testes a diferentes tempos de exposição do feixe do laser.

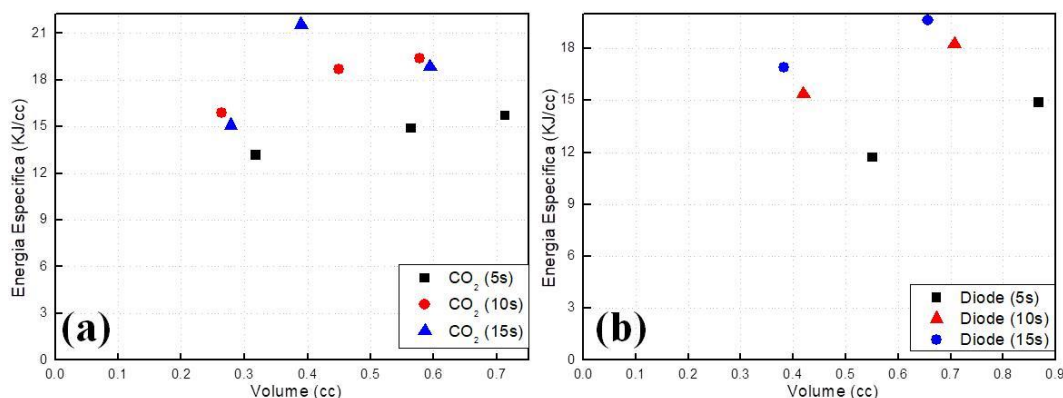


Figura 67 – (a) Energia aplicada para remover certa quantidade de material fragilizado pelo Laser de CO₂. (b) Energia aplicada para remover certa quantidade de material fragilizado pelo laser de diodo.

Na Figura 68 observa-se a evolução da profundidade com o tempo, está apresenta linearidade indicando continuidade no processo de perfuração, já que a quantidade de energia que se requer para remover o material fragilizado é menor fazendo mais eficiente a perfuração neste tipo de material. Este teste foi feito para um trabalho de canhoneio.

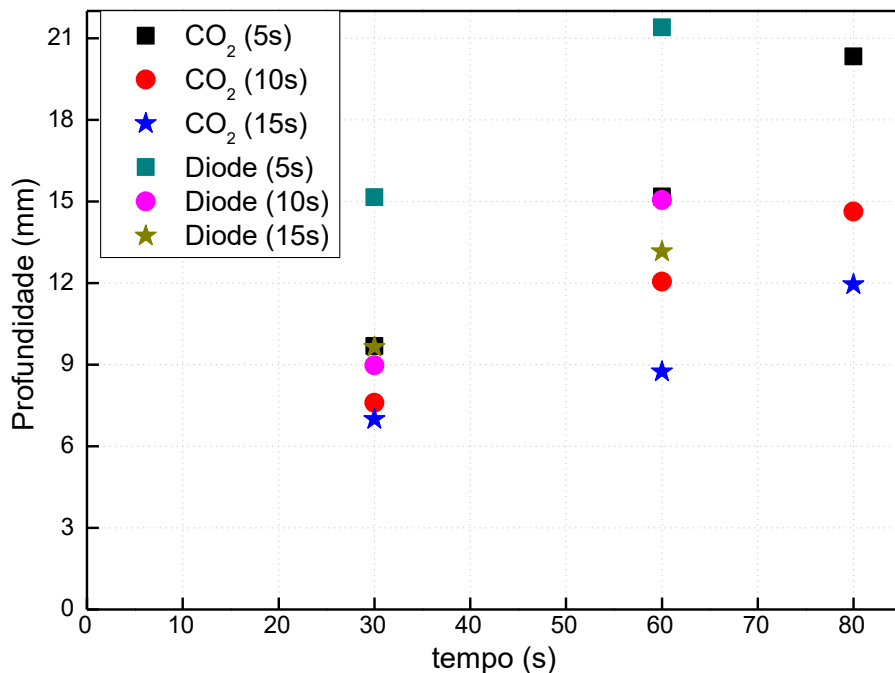


Figura 68 - Profundidade perfurada em função do tempo com ambos lasers em diversas condições de exposição.

Tabela 15 – Energia Específica

LASER	Granito Branco ^(a)	Travertino ^(a)	Granito Cinza ^(b)
CO ₂	34,71 kJ/cm ³	44,55 kJ/cm ³	66,69 kJ/cm ³
Diodo	92,66 kJ/cm ³	59,82 kJ/cm ³	67,17 kJ/cm ³

Notas: (a) Valor médio; (b) Valor mínimo.

Na tabela 16 apresentam-se os resultados obtidos da energia específica a partir do volume removido pela ação do laser, estes se obtiveram com a potência máxima de cada uns dos lasers, para depois tirar um valor médio de cada uns dos materiais testados.

Tabela 16 – Volume retirado para diferentes energias específicas (tempo entre os jatos de gás 10 segundos)

Material	LASER de CO ₂		LASER DE DIODO	
	Volume (CC)	SE (KJ/CC)	Volume (CC)	SE (KJ/CC)
Travertino	0,083	16,9031	0,0242	57,9669
	0,103	27,0887	0,0658	42,5326
	0,193	29,0640	0,0808	69,3490
	0,210	39,9861	0,1076	78,0823
	0,325	34,5030	0,1935	57,8867
	0,351	39,8667	0,2092	66,9205
	0,421	39,9098	0,1689	99,4899
Granito Branco	0,1705	49,2764	0,1317	97,9769
	0,3908	42,9914	0,2134	120,9273
	0,5505	61,0385	0,2873	179,5749
	0,7051	71,4809	0,3757	206,0028
	0,9534	70,4877	0,5062	203,8790
	1,3018	77,4322	0,6912	223,9472
	1,8113	74,2004	0,9477	217,7972
Granito Cinza	0,2881	67,1686	0,1889	66,6907
	0,5042	102,3453	0,3088	108,8245
	0,6805	151,6615	0,4399	152,7449

8. Conclusões e Recomendações

8.1. Conclusões

A análise por fluorescência de raios-X forneceu a composição química das três rochas, ficando claro que o granito cinza possui, como esperado, alta concentração de sílica, enquanto o travertino é um carbonato típico, com muito pouca sílica. No entanto, a rocha comercialmente denominada granito branco mostrou uma importante concentração de carbonato que, foi fundamental no processo de interação do laser com essa rocha.

O processo responsável por essa perda de massa foi identificado como sendo a calcinação do carbonato de cálcio (CaCO_3), gerando gás carbônico (CO_2) que é perdido, restando óxido de cálcio (CaO). Este processo é a base da perfuração desses dois materiais. Para confirmar que se trata de um fenômeno puramente térmico, amostras desses materiais foram tratadas termicamente em um forno a 800 °C por alguns minutos. O resultado obtido foi semelhante ao efeito da incidência do laser, confirmando assim a hipótese.

Analizando os resultados obtidos a partir da interação laser-rocha com o granito branco, usando os dois lasers, durante o processo foram registradas mudanças no desempenho dos lasers no material testado. Pode-se apreciar que a interação do laser de CO_2 tem um melhor resultado com o granito branco, que necessita de menor energia para retirar uma quantidade maior de material fragilizado. Também foi possível comparar que a eficiência do laser de CO_2 é melhor, já que esta é alcançada em um menor tempo de interação com a superfície da rocha.

Os resultados indicaram transformações não reversíveis para o granito branco e para o travertino, enquanto que o granito cinza apresenta uma

transformação reversível que está associada à fusão e posterior solidificação do material.

A análise TG para o granito cinza não apresenta perda significativa de massa, menos de 1%. A temperatura de fusão é de 800 °C e, segundo os testes, mostram vitrificação na zona irradiada pelo laser quando ele é usado de modo contínuo, ou seja, que a temperatura de interação é muito maior.

Na amostra ANP (amostra de rocha das formações do Pré-sal) foram realizados testes com laser de CO₂. Estes testes foram somente de análise qualitativa, que permitiu analisar o desempenho do laser de CO₂. O material fragilizado foi removido manualmente, obtendo-se um buraco cujas dimensões dependem do tempo de exposição, regime de pulsos e potência total do laser. Foram observadas mudanças de cor na região afetada, e concluiu-se que é necessário ter um mecanismo de remoção do material fragilizado.

Inicialmente, para a remoção do material, o gás foi ejetado simultaneamente com a interação do laser – rocha. No entanto, os resultados indicaram que o gás não deve ser aplicado de forma simultânea ao laser, pois o efeito obtido é o resfriamento da região iluminada e, conseqüente, uma redução da eficiência do processo.

A otimização do tempo de exposição de interação entre o laser de diodo e os materiais a serem testados (granito branco e o travertino) foi obtida. Nota-se que para esses materiais e para a potência disponível (200W) e diâmetro de feixe (8 mm), o tempo entre jatos de gás de nitrogênio deve ser próximo a 10 segundos. Foi observado que para o granito branco precisa-se uma menor quantidade de energia requerida para remover certo volume de rocha, tornando o processo mais eficiente, causando microfissuras no material pelo aquecimento térmico que produz o carbonato de cálcio presente no granito.

Quando comparados o volume retirado de forma manual e usando gás nitrogênio para limpar, fica claro o crescimento linear do volume com a energia

utilizada quando o material é retirado durante a perfuração com o nitrogênio, indicando que este processo melhora a eficiência da perfuração.

Os resultados para a profundidade de perfuração em função do tempo integrado à exposição do laser, para diversos tempos entre jatos de gás, e para os dois lasers, indicaram que, para potências maiores, se tem efeitos secundários quando aumentava a profundidade do furo. Estes efeitos incluíam o derretimento do material fragilizado, causando estreitamento do diâmetro, reduzindo assim a transferência de energia e por tanto a taxa de penetração.

Do ponto de vista das diferenças observadas entre os dois materiais, nota-se que o granito branco apresenta uma menor absorção óptica na região espectral em que o laser de diodo emite, 980 nm. Isto resulta em dois efeitos. Primeiro, pode-se notar que as bordas da região perfurada com o laser de diodo apresentam uma região de transição até a região do material virgem, indicando que houve alguma penetração da luz espalhada, além da área de incidência do feixe. O mesmo não ocorre na perfuração com laser de CO₂, uma vez que o comprimento de onda de 10,6 μm é fortemente absorvido, ficando o efeito limitado à área de incidência do laser.

O mesmo efeito não ocorre no caso do travertino, que absorve eficientemente ambos os comprimentos de onda. Como consequência, a energia específica de perfuração alcançada com o laser de diodo no granito branco é maior (menor eficiência) do que a obtida para o travertino. Por outro lado, os resultados encontrados com o laser de CO₂, indicaram a mesma energia específica para o travertino, mas um valor significativamente menor para o granito branco.

Os resultados indicam que a eficiência no início da perfuração do granito cinza é semelhante ao encontrado para as outras rochas com energia específica de 60 kJ/cm³ para ambos os lasers. No entanto, o processo de retirada de material através de jatos gás não apresenta bom desempenho à medida que o furo se aprofunda, levando a uma baixa eficiência.

Este trabalho apresentou os primeiros resultados para levar a diante novas pesquisas que estavam sendo desenvolvidas no laboratório, apresentando bons resultados nas fases posteriores.

8.2. Recomendações

Levando em consideração os resultados obtidos no granito cinza seria necessário usar tempos menores de interação laser-rocha, intercalando o uso de nitrogênio a maior pressão para remover o material que vitrifica no local perfurado.

Incluir uma nova linha no sistema de limpeza para ter dois jatos removendo o material fragilizado.

Fazer um mecanismo que faça rotação na amostra de forma que o diâmetro do furo seja muito maior.

Inventar um sistema de lentes ópticos para ampliar o feixe do laser, assim poderiam ter uma maior densidade de potência sobre a superfície da rocha.

ADARNSKI, J. L. et al. **Results of Commissioning the Injector and Construction Progress of the Boeing I-kW Visible Free-Electron Laser**. Free Electron Laser Challenges. San Jose CA: Proceedings of SPIE Volume 2988. 1997. p. 158 - 169.

ADENIJI, A. W. **The Applications of Laser Technology in Downhole Operations - A Review**. IPTC 2014: International Petroleum Technology conference. Doha, Qatar: 2014. p. 15.

AHMADI, M. et al. The effect of interaction time and saturation of rock on specific energy in nd: Yag laser perforating. **Optics & Laser Technology**, 43, n. 1, 2011. 226 - 231.

AKPEDEYE, K. U. **Advancement on Drilling Technology in Petroleum Industry**. HAMK University of Applied Science, 2010.

ALBERTINE, J. **Recent High-Energy Laser System Tests using the MIRACLISLBD**. Intense Laser Beams and Applications. SPIE Proceedings Vol. 1871. 1993. p. 229 - 239.

ALLGOOD, J. R. **Tunnel excavation with electrically generated shock waves**. US3840270A, 1974.

ALVES SILVA, I. A. et al. **OTC-20177-MS**. Offshore Technology Conference. Houston, Texas. 2009. p. 12.

AMARO, R. **Análise da Viabilidade da Perfuração em Rochas com a Utilização do Laser**. PUC-Rio. Rio de Janeiro, p. 127. 2013.

AMARO, R. et al. **IBP1285_12: PERFURAÇÃO EM ROCHAS DURAS: DAS TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS ATÉ O POTENCIAL USO DO LASER**. Rio Oil & Gas Expo and Conference 2012. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP. 2012. p. 10p.

AUGUSTINE, C. et al. Feasibility of Spallation Drilling in a High Pressure , High-Density , Aqueous Environment: Characterization of Heat Transfer from an H₂ -O₂ Flame Jet. **GRC Transactions**, p. 241–246, 2007.

AUGUSTINE, C. R. **Hydrothermal spallation drilling and advanced energy conversion technologies for Engineered Geothermal Systems**. Massachusetts Institute of Technology, 2009.

AUGUSTINE, C.; TESTER, J. W. Hydrothermal flames: From phenomenological experimental demonstrations to quantitative understanding. **Journal of Supercritical Fluids**, 2009. 415–430.

BARENBLATT, G. I. et al. The influence of High-Power Laser radiation on Rock mass. **Physical-technical problems of mining of mineral raw materials**, p. 106 - 106, 1970.

BATARSEH, S. **Application of Laser Technology in the Oil and Gas Industry: An Analysis of High Power Laser-Rock Interaction and Its Effect on Altering Rock Properties and Behavior**. Colorado School of Mines. Golden, Colorado, p. 214. 2001.

BATARSEH, S. et al. Specific energy for pulsed laser rock drilling. **Journal of Laser Applications**, 2003. 15.

BATARSEH, S. I. et al. **Deep hole penetration of rock for oil production using ytterbium fiber laser**. High-Power Laser Ablation. Bellingham, WA: Photonics, International Society for Optics and Photonics. 2004. p. 818–826.

BRAGA BARBOSA, A. M.; MARTELLI, C. US9062499B2, 2015.

BROWNING, J. **Flame-jet drilling in conway nm granite**. [S.I.]: Browning Engineering Company, 1981.

BROWNING, J. A.; HORTON, W. B. **Recent Advances in Flame Jet Working of Minerals**. 7th Symposium on Rock Mechanics, Pennsylvania State University. 1965.

CARLSLAW, H. S.; JAEGER, J. C. **Conduction of Heat in Solids**. [S.I.]: Oxford University Press., 1959.

DE OLIVEIRA MENESES, S. **Rochas: manual fácil de estudo e classificação**. São Paulo : Oficina de Textos, 2013.

DEY, T. N.; KRANZ, R. L. **Methods for Increasing Drilling Performance of the Thermal Spallation Drilling System**. 9th Conference of Geothermal Resources Council. California: Geothermal Resources Council. 1985. p. 103 - 106.

DULEY, W. W. **Laser Processing and Analysis of Materials**. New York: Plenum Press, 1983.

ERNEST, G. **Interpretation of Geological Phase Diagram**. W. H. Freemand and Company, 1972.

FAIRCLOTH, B. O. et al. US8424617B2, 2013.

FARRA, G.; NELSON, C. R.; MOAVENZADEH, F. **Experimental observations of rock failure due to laser radiation**. MIT Department of Civil Engineering, 1969.

FLINN; TROJAN. **Engineering Materials and Their Applications**. Second. ed. Boston: Jaico Publishing House, 1981.

FÖLDVÁRI, M. **Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice**. BUDAPEST: Geological Institute of Hungary, 2011.

GAHAN, B. C. **Laser Drilling: Understanding Laser/Rock Interaction Fundamental**. 2002.

GAHAN, B. C. **Application of Fiber Lasers to Rock and Earth Materials**. USA. 2004.

GAHAN, B. C.; BATARSEH, S. **Laser drilling - drilling with the power of light**: High energy laser perforation and completion techniques. Annual Technical Progress Report by the Gas Technology Institute. Department of Energy. 2006.

GAHAN, B. C.; BATARSEH, S.; SIEGFRIED, R. W. **Improving gas well drilling and completion with high energy lasers**. National Energy Technology Laboratory Strategic Center for Natural Gas & Oil, Argonne ational Lab. Illinois. 2006.

GAHAN, B. C.; PARKER, R. A.; BATARSEH S. **Laser Drilling: Determination of Energy Required to Remove Rock**. SPE 2001. New Orleans. 2001.

GHANIZADEH, M.; VAHIDI, M.; ESMAILNEZHAD, E. **A Comprehensive Review of Laser Application in Oil and Gas Industry**. in 3rd Iranian Petroleum Engineering Congress. 1970.

GOLDBERG, L.; WELLER, ; TAYLOR , H. F. Spectral Characteristics of Semiconductor Lasers with Optical Feedback. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Apr 1982. 401 - 410.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I. **Ingeniería geológica**. Madrid: Prentice Hall, 2002.

GRAVES, R. M.; BAILO, T. Spectral Signatures and Optic Coefficients of Surface and Reservoir Rocks at COIL, CO₂, and Nd:YAG Laser Wavelengths. **Proceedings of SPIE**, 2004. 446 - 460.

GRAVES, R. M.; O'BRIEN, D. G. StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas Wells. **SPE Rocky Mountain regional meeting**, p. 131 - 140, 1999.

GRIFFITH, A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. **Philosophical transactions of the Royal Society of London**, p. 163, 1920.

GUEDES VALENTE, L. C. et al. Energy efficiency of drilling granite and travertine with a CO₂ laser and 980 nm diode laser. **Appl Phys A (Materials Science and Processing)**, Sep. 2013. 639 - 642.

HATCHER, M. Research team strikes it rich with a photon drill. **optics**, 20 March 2003.

HECHT, J. The Laser Guidebook, second edition. McGraw Hill Inc., 1992. p. 211.

HECHT, J. High-power lasers: Fiber lasers drill for oil. **Laser Focus World: Photonics Technologies & Solutions for Technical Professionals Worldwide**, 5 Dec 2012. Disponível em: <<https://www.laserfocusworld.com/>>.

HILTON, P. A.; JONES, L. A. **CO Laser Welding of Sheet Steel with Plasma-Disrupting Gases**. High-Power Lasers: Applications and Emerging Applications. France. 1996. p. 65 - 76.

IPG Photonics Corporation, 2006. Disponível em: <<https://www.ipgphotonics.com/>>.

KERR, R. A. Looking-Deeply-Into the Earth's Crust in Europe. **Science**, 16 Jul 1993. 295 - 297.

KOBAYASH, T. et al. **Drilling a 2-inch in Diameter Hole in Granites Submerged in Water by CO2 Lasers**. SPE / IADC Drilling Conference and Exhibition. Amsterdam, The Netherlands: Society of Petroleum Engineers. 2009.

KONOV, V. I. et al. **Ablation of Ceramics by UV, Visible, and IR Pulsed Laser Radiation**. Laser Applications in Microelectronic and Opto-electronic Manufacturing II. Proceedings of SPIE Vol. 2991. 151 -160. p. 1997.

KUZNETSOV, A. G.; SHAFRANOV, N. K. Consideration of Minerals and Rock Mass Destruction by CW Laser Beam. **Geology and Prospecting**, p. 143 - 147, 1975.

KUZNETSOV, A. N. Method of Thermal Rock Destruction. **Bulletin No 38**, 1981.

KUZNEZOV, V. V.; PROTASOV, Y. **Destruction of Rock Mass by Infrared Radiation**. Moscow: Publishing House NEDRA, 1979.

LARKINA, L. P. Application of Radiant Energy of Optical Range for Rock Destruction. Ukrainian: Publishing House "Naukova Durnka", 1976. p. 108.

LUKAWSKI, M. Z. et al. Cost analysis of oil, gas, and geothermal well drilling. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, June 2014. 1 - 14.

LYUBOV, B.; SOBOL, E. The Vaporization of Material by Concentrated Energy Flow with the Elliptical Cross Section. **Physics and Chemistry of Materials Processing**, p. 12 - 16, 1976.

MAURER, W. C. *Advanced Drilling Techniques*. Tulsa, Oklahoma: Petroleum Publishing CO, 1980.

MOTT, R. L. **Mecânica de Fluidos**. México: Pearson, 2006.

NANRI, K.; FUJIOKA, T. **New Methods to Obtain Higher Power from the Laser with the Unstable Resonator**. XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference. Edinburgh, UK: Proceedings of SPIE Vol. 3092. 1996. p. 317 - 320.

NORTON, F. H. A General Theory of Spalling. **Journal of the American Ceramic Society**, p. 29 - 39, 1952.

OLALEYE, M. A review of light amplification by stimulated emission of radiation in oil and gas well drilling. **Mining Science and Technology**, v. 20, n. 5, p. 752–757, 2010.

PARKER, R. A. et al. **Drilling Large Diameter Holes in Rocks Using Multiple Laser Beams**. International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics. Jacksonville, Florida. 2003. p. 13 - 16.

PARKER, R. et al. **Drilling large diameter holes in rocks using multiple laser beams**. ICALEO conference. 2003. p. LIA 504.

PASCOAL DE MORAIS, D. F. **Estudos dos principais tipos de brocas de perfuração de poços de petróleo e suas demandas tribológicas**. Natal: UFRN, 2014.

PIERCE, K. G.; LIVESAY, B. J.; FINGER, J. T. *Advanced Drilling Systems Study*. In: **Natural gas research, development and demonstration contractors review meeting, Baton Rouge**. LA (United States), 1996. p. 163.

POTTER, R. M.; POTTER, J. M.; WIDEMAN, T. W. Laboratory Study and Field Demonstration of Hydrothermal spallation Drilling. **GRC Transactions**, p. 249–252, 2010.

PRADA PARRA, D. **Análise numérica e experimental do canhoneio a laser em rochas carbonáticas**. PUC-Rio. Rio de Janeiro, p. 174. 2016.

PRESTON, F. W. The Spalling of Bricks. **Journal of the American Ceramic Society**, 1926. 654–658.

PRESTON, F. W. Observations on Spalling. **Journal of the American Ceramic Society**, p. 137-144., 1934.

PRESTON, F. W.; WHITE, H. E. Observations on Spalling. **Journal of the American Ceramic Society**, 1934. 137–144.

RAUENZAHN, R. M. Analysis of Rock Mechanics and Gas Dynamics of Flame-Jet Thermal Spallation Drilling. Massachusetts Institute of Technology, 1989.

RAUENZAHN, R. M.; TESTER, J. W. Rock Failure Mechanisms of Flame-Jet Thermal Spallation Drilling - Theory and Experimental Testing. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, p. 381-399., 1989.

REED, C. B. et al. **Application of high powered lasers to drilling and completing deep wells**. DOE Report ANL/TD/TM 03-02. U.S. 2003.

RINZLER, C. C. et al. **Methods and apparatus for removal and control of material in laser drilling of a borehole**. US8636085B2, 2014.

ROCHA, M. **Mecânica das Rochas**. Lisboa: LNEC, 1981.

RODLAND, A. Deep Geothermal Energy; Photonics forHarvesting. In: **Proceedings of the Swissphotonics-Workshop: Photonics for Deep Geothermal Energy Harvesting**. Trondheim, Norway: HSR University of Applied Sciences Rapperswil, Switzerland, 2012. p. 125 - 150.

ROTHENFLUH, T. **Heat transfer phenomena of supercritical water jets in hydrothermal spallation drilling**. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zurich, 2013.

SALEHI, I. A.; GAHAN, B. C.; BATARSEH, S. **Laser drilling-drilling with the power of light**. Gas Technology Institute (GTI). Des Plaines, Illinois, p. 94. 2007.

SAMOKHIN, A. A.; USPENSKII, A. The Vaporization of Materials by Laser Beam. **Physics and Chemistry of Materials Processing**, p. 3 - 11, 1981.

SCHENNIKOV, E. V. **Study of the Influence of the Laser Radiation on the Rock Strength Aimed at Analyzing the Perspectives of Laser Applications in Mining**. Moscow: Moscow Mining Institute, 1971. 202 p. Thesis of Candidate for Technical Sciences (PhD).

SCHIEGG, H. O. et al. Electropulse-boring (EPB): Novel super-deep drilling technology for low cost electricity. **Journal of Earth Science**, 26, n. 1, 30 January 2015. 37 – 46.

SILVA, F. J. R. et al. **Analysis of the Performance of a Thermal Spallation Device for Rock Drilling**. Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT. Curitiba, Brazil: Brazil Society of Mechanical Sciences and Engineering – ABCM. 2006.

SOBOL, E. N. **Phase Transformations and Ablation in Laser-Treated Solids**. New York: John Wiley and Sons, 1995. 332 p.

SOBOL, E. N.; UGLOV, A. Laser Processing of Rock Mass (Review). **Physics and Chemistry of Materials Processing**, 1983. 3 - 17.

SOMERTON, W. H. **Thermal Properties and Temperature-Related Behavior of Rock/Fluid Systems**. 1st. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 1992. 256 p.

SUGUIO, K. **Geologia sedimentar**. Sao Paulo: Blucher, 2003.

Technical and Economic Evaluation of Thermal Spallation Drilling Technology. New Mexico, Oklahoma. 1984.

TESTER, J. W. et al. **Advanced drilling and its impact on heat mining**. Proceedings of the World Geothermal Congress. New Zealand: International Geothermal Association. 1995. p. 385–1390.

TESTER, J. W. et al. Prospects for universal geothermal energy from heat mining. **Science & Global Security**, 21 Dec 2007. 99 - 121.

THOMAS, J. E. **Fundamentos Engenharia Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciencia, 2004.

VIEGA, F. L. **PERFURAÇÃO DE ROCHAS POR JATO SUPERSÔNICO QUENTE**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004.

VOLLMAR, D.; WITTIG, V.; BRACKE, R. Geothermal drilling best practices: The geothermal translation of conventional drilling recommendations-main potential challenges. **International Geothermal Association IFC**, 2003.

VON ROHR, P. R.; ROTHENFLUH, T.; SCHULER, M. **Rock drilling in great depths by thermal fragmentation using highly exothermic**

reactions evolving in the environment of a water-based drilling fluid. US8967293B2, 2015.

WEIBULL, W. A Statistical Theory of the Strength of Materials. **Ing. Vetenskaps Akad. Handl.**, p. 1 - 45, 1939.

WIDEMAN, T. W. et al. Hydrothermal spallation for the treatment of hydrothermal and EGS wells: A cost-effective method for substantially increasing reservoir production and flow rates,”. **GRC Transactions**, p. 283–285, 2011.

WILKINSON, M. A. **Ph.D Thesis, Computational Modeling of the Gas-Phase Transport Phenomena and Experimental Investigation of Surface Temperature During Flame-Jet Thermal Spallation Drilling.** [S.I.]: Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1989.

WILLIAM, R. E. **Thermal Spallation Drilling.** Geothermal Resources Council Symposium. Kailua-Kona, Hawaii: Los Alamos National Laboratory. 1985.

WILLIAMS, R. E.; POTTER, R. M.; MISKA, S. Experiments in Thermal Spallation of Various Rocks. **Journal of Energy Resources Technology**, 1996. 2 - 8.

XU, Z. et al. **Laser Spallation of Rocks for Oil Well Drilling.** Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. 2004. p. 2–7.

XU, Z. et al. **Rock perforation by pulsed Nd: YAG laser.** Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. 2004.

XU, Z.; YAMASHITA, Y.; REED, C. B. **Modeling of Laser Spallation Drilling of Rocks for Gas and Oil Well Drilling**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas, U.S.A. 2005.