



Renato Amaro

Análise da Viabilidade da Perfuração em Rochas com a Utilização do Laser

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga
Co-orientador: Prof. Luiz Carlos Guedes Valente

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2013



Renato Amaro

Análise da Viabilidade da Perfuração em Rochas com a Utilização do Laser

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

Prof. Arthur Martins Barbosa Braga
Orientador
Pontifícia Universidade Católica - Rio

Prof. Luiz Carlos Guedes Valente
Pontifícia Universidade Católica – Rio

Prof. Giancarlo Vilela de Faria
Pontifícia Universidade Católica – Rio

Prof. João Carlos Ribeiro Plácido
Petróleo Brasileiro S. A.

Prof. Luiz Alberto Santos Rocha
Petróleo Brasileiro S. A.

Prof.^a Rosana Fátima Teixeira Lomba
Petróleo Brasileiro S. A.

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de fevereiro de 2013

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

Renato Amaro

Graduou-se como Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná em 1980 e realizou curso de pós-graduação em Engenharia de Petróleo pela Universidade Petrobrás em 1983. Especialista na área de construção de poços direcionais e horizontais.

Ficha Catalográfica

Amaro, Renato

Análise da viabilidade da perfuração em rochas com a utilização do laser / Renato Amaro; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga; co-orientador: Luiz Carlos Guedes Valente. – 2013.

127 f. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Rochas duras. 3. Sistemas de perfuração. 4. Energia específica. 5. Laser de alta energia. 6. Laser a fibra. 7. Perfuração a laser. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Valente, Luiz Carlos Guedes. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Dedico este trabalho aos meus pais: Gentil e Nimpha,
à minha esposa Viviane e minha filha Leticia.

Agradecimentos

A Deus, como princípio gerador da existência, pela dádiva de desfrutar a vida com saúde, proteção e motivação suficiente para superar os desafios que os projetos de longo curso exigem.

Aos meus pais pelo apoio, exemplo de vida e dedicação mútua.

A minha esposa Viviane e filha Letícia pela compreensão e apoio ao longo desta caminhada. A razão, emoção e essência que nos movimenta para a superação dos desafios e para a realização dos objetivos.

Ao professor e orientador Arthur Braga pelo constante apoio e orientação no desenvolvimento da dissertação.

Ao professor e co-orientador Luiz Guedes pela orientação e disponibilidade na condução dos testes de absorção ótica.

Ao professor Giancarlo pelo apoio e suporte na realização dos testes.

Ao professor João Carlos Plácido pela cooperação e sugestões sobre o tema.

À professora Rosana Lomba pela cooperação nos testes de absorção ótica.

À Monica Teixeira da Silva e Luiz Sacorague pela realização dos testes de absorção ótica.

Ao professor Luiz Alberto Rocha pelo incentivo no início da caminhada.

Ao professor Norberto Cella da UERJ/IPRJ por sua contribuição na realização dos testes com a técnica de fotoacústica.

À Maria Angélica pelo apoio e colaboração no trabalho apresentado no congresso Rio Oil & Gás.

Ao Zaneli pelo empenho na fabricação do dispositivo para o teste de bancada.

À PUC-Rio, pelo auxílio concedido, através do qual foi possível realizar este trabalho na forma como se apresenta.

À Petrobras, através do seu centro de pesquisa – CENPES, pela valiosa contribuição para a realização das pesquisas.

Aos companheiros de curso e amigos que contribuíram com seu incentivo para a superação deste grande desafio.

Resumo

Amaro, Renato; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Análise da Viabilidade da Perfuração em Rochas com a Utilização do Laser**. Rio de Janeiro, 2013. 127p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos maiores desafios na perfuração das rochas carbonáticas, situadas a grandes profundidades, é superar as baixas taxas de penetração que vem sendo obtidas na perfuração de poços verticais e direcionais. Para vencer este desafio, um grande esforço vem sendo desenvolvido em várias linhas de pesquisa, tanto no desenvolvimento de novos conceitos de brocas como na seleção de um sistema de perfuração que apresente um melhor desempenho. Para atingir este objetivo, estão sendo priorizados procedimentos e sistemas de perfuração que apresentem menores níveis de vibração, pois este fenômeno além de reduzir a eficiência da perfuração, também compromete o tempo de vida útil dos equipamentos e, por consequência, acarreta a redução da confiabilidade do sistema e eleva o custo por metro da perfuração. Por conseguinte, novas tecnologias de brocas e sistemas de perfuração estão em desenvolvimento e, dentre as novas tecnologias, podemos diferenciar aquelas que promovem melhorias nas tecnologias convencionais e as tecnologias francamente inovadoras, aquelas que utilizam novos mecanismos para cortar ou fragilizar a rocha. Dentre as tecnologias inovadoras, a perfuração assistida por laser é uma das mais promissoras, nesta versão o feixe da energia radiante tem a função principal de fragilizar a rocha, facilitando o avanço da perfuração. Esta dissertação tem por objetivo realizar uma avaliação das possibilidades de aplicação da tecnologia laser na perfuração de rochas. O meio através do qual o laser deverá atuar nas aplicações futuras é analisado sobre o enfoque das suas propriedades físico-químicas. Dessa forma, o conhecimento da interação com o fluido de perfuração é o ponto de partida para a análise de viabilidade. Inicialmente, análises de absorção ótica foram realizadas em alguns tipos de fluido utilizados na indústria do petróleo e, na sequência, foram realizados testes de bancada com um dispositivo eletro-mecânico, especialmente desenvolvido, para servir de base para o laser, com potência máxima de 1500 W, direcionado sobre amostras de rochas carbonáticas. A análise de absorção ótica tem por

objetivo compreender melhor o processo de interação do laser com o fluido de perfuração. Os testes de absorção ótica foram realizados para avaliar a absorção da luz, na faixa de comprimento de onda entre 800 nm até 1200 nm. A partir destas informações foi dado o primeiro passo no conhecimento da interação com o fluido de perfuração. Na seqüência da abordagem, um resumo, em nível de pesquisa bibliográfica é apresentado com os estudos, análises e testes de bancada já realizados por vários pesquisadores para verificar o estágio de desenvolvimento desta tecnologia inovadora. A partir deste conhecimento, será possível fazer uma inferência sobre as reais possibilidades desta tecnologia e iniciar um levantamento preliminar sobre os pontos considerados críticos para a sua aplicação, no cenário de perfuração de um poço de petróleo. O cenário de perfuração, como se sabe, é um ambiente agressivo, sujeito a altas vibrações, temperaturas e pressões elevadas. Para concluir, serão apresentados os resultados obtidos em teste de bancada com dispositivo especificamente construído para a fundamentação das conclusões da dissertação. Dentre os aspectos mais relevantes, podemos mencionar: a determinação da durabilidade do sistema, considerando a resistência da lente de focalização ao aquecimento provocado pelo laser e, também, uma avaliação da eficiência do processo sob o ponto de vista do valor obtido para a energia específica. Em resumo, o objetivo final dessa dissertação é o de concentrar em um documento as informações mais atualizadas sobre a utilização do laser na perfuração de rochas e apresentar uma análise, ainda que preliminar, sobre os possíveis pontos de melhoria que permitam viabilizar esta tecnologia no futuro.

Palavras-chave

Rochas duras; sistemas de perfuração; energia específica; laser de alta energia; laser a fibra; perfuração a laser.

Abstract

Amaro, Renato; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Analysis of the Feasibility of Drilling of Rocks with Lasers**. Rio de Janeiro, 2013. 127p. Msc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the biggest challenges in drilling the carbonate rocks located at great depths is to overcome low penetration drilling rates that have been obtained in vertical and directional wells. To overcome this challenge, a great effort is being developed on multiple lines of research. All of them are focused in new concepts of drilling procedures and the selection of a drilling system that presents a better performance. To achieve this goal, new procedures are being designed and drilling systems with lower vibration levels are under development. Vibration reduces the efficiency of drilling, also decreases the lifetime of equipment and consequently causes a reduction in reliability of all system and raises the drilling costs. Consequently, new drill bit technologies and drilling systems are being developed and, among the new technologies we can differentiate those that only promote improvements in conventional technologies and those innovative technologies, in which new mechanisms to cut or weaken the rock are used. The drilling assisted laser is one of the most promising mechanism in which the radiant energy beam has the primary function to weaken the rock increasing the performance of drilling process. This dissertation aims to perform an assessment of the possibilities of laser technology in rock drilling applications. The laser will have to pass through the drilling fluid in the future applications so it is very important to understand their physicochemical properties and their mutual interaction. For this reason, the knowledge of the interaction with the drilling fluid is the starting point for this work. First of all, it will be accomplished an analysis of optical absorption in some types of fluid used in the oil industry. After that, it will be performed bench testing with an electro-mechanical device that will support a laser whose maximum power can reach 1500 W and it will be pointed to carbonate rock samples. The optical absorption analysis aims to better understand the interaction

of the laser with the drilling fluid. The optical absorption tests are performed to evaluate the absorption of light in the wavelength range from 800 nm to 1200 nm. From this information, it will be taken the first step to understand the interaction with the drilling fluid, which is the starting point for the feasibility study of the use of lasers. Following the approach, a literature review will be presented with the studies, analysis and bench testing already conducted by various researchers to check the stage of development of this new technology. Taking into account this knowledge, it will be possible to make an initial approach about the actual possibilities of this technology and initiate a preliminary survey on the questions that are critical to its application in a drilling scenario in the well construction, an aggressive environment which is subject to high vibrations, high temperatures and pressures. To conclude, we present the results obtained in bench testing with device specifically built for supporting the conclusions of the dissertation. Among the most relevant aspects, we can mention the durability of the system, considering the focusing lens lifetime under the heating effects caused by the laser. Another point, it is to make an evaluation of the performance of drilling process, considering the specific energy. In summary, the ultimate goal of this dissertation is to concentrate in a single document the most current information about the use of laser drilling and present an analysis, though preliminary, about the possible improvement points that will allow the feasibility of this technology in the future.

Keywords

Hard rocks; drilling systems; specific energy; high energy laser; fiber laser; laser drilling.

Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Objetivo	19
1.2.	Estrutura do Trabalho	20
2	Revisão Bibliográfica	21
2.1.	A Interação Rocha-Laser	21
2.2.	O Processo de Fragmentação da Rocha	27
2.3.	A Ação do Laser sobre Rochas Carbonáticas	37
2.4.	O Uso do Laser sobre Amostras Imersas na Água	43
2.5.	Teste de Dispositivos com Movimento Circular	47
3	Tecnologias Convencionais	52
3.1.	Composições de Fundo	52
3.1.1.	BHA Estabilizado	53
3.1.2.	BHA com Motor de Fundo de Alto Torque	53
3.1.3.	BHA com Motor de Fundo de Alta Velocidade	54
3.1.4.	BHA com Turbina	54
3.1.5.	BHA com <i>Rotary Steerable</i>	54
3.1.6.	BHA com Sistemas de Verticalização Contínua	55
3.2.	Efeitos da Vibração sobre o Sistema de Perfuração	55
3.3.	Brocas Utilizadas no Cenário de Rochas Duras	57
3.4.	Sistemas de Perfuração para Rochas Duras	58
3.5.	Geração de Energia para os Equipamentos do BHA	59
4	Laser	60
4.1.	Conceitos Elementares sobre o Laser	60
4.2.	Tipos de Laser	63
4.2.1.	Laser de CO ₂	63
4.2.2.	Laser de CO	63
4.2.3.	HF (DF) Laser	64

4.2.4. Laser de Estado Sólido	64
4.2.5. Laser Excimer	64
4.2.6. Laser de Corante	65
4.2.7. Laser a Fibra	65
4.3. Classificação dos Tipos de Laser	65
4.4. Laser de Alta Potência	66
5 Análise de Absorção Ótica	68
5.1. Caracterização dos Fluidos de Perfuração Utilizados	72
5.1.1. Fluido A	72
5.1.2. Fluido B1	73
5.1.3. Fluido B2	73
5.1.4. Fluido C	74
5.2. Equipamentos Utilizados	75
5.3. Espectroscopia dos Fluidos no Infravermelho Médio (MIR)	76
5.4. Espectroscopia dos Fluidos no Infravermelho Próximo (NIR)	80
6 Análise Fotoacústica	86
6.1. Técnica Fotoacústica	86
6.2. Análise Fotoacústica da Água	87
6.3. Análise Fotoacústica do Fluido A	88
6.4. Análise Fotoacústica do Fluido B1	88
6.5. Análise Fotoacústica do Fluido B2	89
6.6. Análise Fotoacústica do Fluido C	90
6.7. Comparação de Resultados da Análise Fotoacústica	91
7 Dispositivo para Teste de Bancada	93
7.1. Motivação para o Teste de Bancada	94
7.1.1. Laser YLS-1500	94
7.2. Componentes do Dispositivo para Teste de Bancada	97
7.2.1. Tubo Protetor	97
7.2.2. Estrutura de Assentamento do Tubo Protetor	97
7.2.3. Lente de Borosilicato	98
7.2.4. Trave de Sustentação	98

7.2.5. Cuba Giratória	98
7.2.6. Motor de Passo com Drive Integrado	99
7.3. Proposta para Teste de Bancada	99
8 Metodologia	100
8.1. Protocolo de Teste com Laser YSL-1500	101
8.1.1. Meio Ar	101
8.1.2. Meio Água	102
8.1.3. Medição do Volume Removido	102
9 Resultados e Discussões	103
9.1. Teste Realizado com a Amostra no Ar	103
9.2. Teste Realizado com a Amostra Imersa na Água	109
9.3. Teste Cortando a Amostra	111
10 Conclusões	114
11 Recomendações	117
12 Referências Bibliográficas	118
13 Apêndice A: Dispositivo Para Teste de Bancada	120
14 Anexo A: Cálculo da Energia Específica	123

Lista de figuras

Figura 1: Mudança no método de remoção do material, da descamação para a fusão.	35
Figura 2: Variação percentual da massa obtida por termogravimetria.	38
Figura 3: Efeito do laser sobre o mármore Travertino.	40
Figura 4: Furos produzidos por laser de CO ₂ e a diodo.	40
Figura 5: Volume do material removido em função da energia.	40
Figura 6: Energia específica em função do volume removido.	42
Figura 7: BHA sem ferramenta para mitigar vibração.	56
Figura 8: BHA com ferramenta para mitigar a vibração torsional.	56
Figura 9: Desgaste nas brocas PDC nos carbonatos.	57
Figura 10: Desgaste nas brocas impregnadas nos carbonatos.	57
Figura 11: Número de corridas dos sistemas de perfuração.	58
Figura 12: Sistema de geração de energia elétrica no BHA.	59
Figura 13: Intervalo ótico do espectro eletromagnético.	67
Figura 14: Espetros MIR da amostra fluido A, antes (em vermelho) e após a retirada dos sólidos da suspensão (em azul).	77
Figura 15: Espetros MIR da amostra fluido B1 antes (em vermelho) e após a retirada dos sólidos da suspensão (em azul).	78
Figura 16: Espetros MIR da amostra fluido B2 antes (em azul) e após (em vermelho) a retirada dos sólidos da suspensão.	79
Figura 17: Espectro MIR da amostra fluido C.	80
Figura 18: Energia no detector em função do número de onda da radiação infravermelho.	81
Figura 19: Espectro NIR (8500-14000 cm ⁻¹), fluido B1, referência ar.	81
Figura 20: Espectro NIR (8500-14000 cm ⁻¹), fluido B2, referência ar.	82
Figura 21: Espectro NIR (8500-14000 cm ⁻¹), fluido C, referência ar.	82
Figura 22: NIR (8500-14000 cm ⁻¹), para os fluidos B1, B2 e C, ar como referência.	83
Figura 23: Espectro NIR (8500-14000 cm ⁻¹) no detalhe para os fluidos B1 e B2.	84

Figura 24: Espectro de absorção ótico da água.	84
Figura 25: Espectro de absorção da água pela técnica fotoacústica.	87
Figura 26: Espectro de absorção do fluido A pela técnica fotoacústica.	88
Figura 27: Espectro de absorção do fluido B1 pela técnica fotoacústica.	89
Figura 28: Espectro de absorção do fluido B2 pela técnica fotoacústica.	90
Figura 29: Espectro de absorção do fluido C pela técnica fotoacústica.	91
Figura 30: Espectro de absorção para a água e fluidos de perfuração.	91
Figura 31: Dispositivo eletro-mecânico desenvolvido para o teste.	93
Figura 32: Laser a fibra YLS-1500 com potência de 1500 W.	95
Figura 33: Espectro para máxima potência de saída referente ao laser.	96
Figura 34: Ponteira do laser a fibra.	96
Figura 35: Potências aplicadas de 500, 550, 1000 e 1500 W.	106
Figura 36: Amostra referente aos testes com 550, 1000 e 1500 W.	106
Figura 37: Aplicação do laser com uma sequência de voltas.	107
Figura 38: Amostra utilizada na sequência de voltas.	107
Figura 39: Volume removido em função da energia aplicada do laser.	108
Figura 40: Teste realizado com potência de 500 W em pistas distintas.	109
Figura 41: Teste no ar e na água com 500 W, estático 600 W.	111
Figura 42: Dispositivo com soprador e aspirador instalados.	112
Figura 43: Corte em anel realizado.	113
Figura 44: Corte pelo laser em amostra de 20 mm de espessura.	113
Figura 45: Estrutura de proteção da ponteira do laser.	120
Figura 46: Peça de apoio da estrutura de proteção.	120
Figura 47: Trave de sustentação do tubo de proteção.	121
Figura 48: Cuba para colocação do fluido e da amostra de rocha.	121
Figura 49: Base de apoio para o motor de passo integrado.	122

Lista de tabelas

Tabela 1: Refletividade (ρ_r) de alguns minerais obtidos para o raio no espectro visível.	23
Tabela 2: Refletividade de alguns minerais para diferentes comprimentos de onda.	23
Tabela 3: Coeficientes do corpo negro em função da temperatura.	25
Tabela 4: Propriedades termo físicas de amostras de rocha.	34
Tabela 5: Composição química predominante nas rochas analisadas.	37
Tabela 6: Energia específica em kJ/cm^3 para o laser de CO_2 e laser de diodo.	41
Tabela 7: Resumo dos principais textos da revisão bibliográfica.	51
Tabela 8: Caracterização do fluido A.	72
Tabela 9: Caracterização do fluido B1.	73
Tabela 10: Caracterização do fluido B2	74
Tabela 11: Caracterização do fluido C.	74
Tabela 12: Comprimentos de onda do laser YLS - de 1500 Watts.	95
Tabela 13: Resultados da primeira rodada de testes de bancada.	103
Tabela 14: Valores obtidos em teste de bancada na primeira rodada.	105
Tabela 15: Dados obtidos na segunda rodada de testes.	110
Tabela 16: Definições para o cálculo da energia específica.	124
Tabela 17: Energia específica dos métodos de perfuração.	126
Tabela 18: Energia específica de diferentes tipos de Laser para o arenito Berea.	127

Simbologia e siglas

BHA (*Bottom Hole Assembly*): equipamentos de fundo de poço.

RSS (*Rotary Steerable System*): sistema de perfuração para controle de trajetória utilizando somente a perfuração rotativa.

PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*): pastilhas de diamante sintético dispostas de maneira balanceada na face de ataque da broca.

MWD (*Measuring While Drilling*): equipamento que determina a posição do poço enquanto perfura.

LWD (*Logging While Drilling*): equipamento que determina as propriedades da formação enquanto perfura.

SE: *Specific energy*

MSE: *Mechanical specific energy*

Nd:YAG: *Neodymium yttrium aluminum garnet*

UCS (*unconfined stress*): tensão não confinada

WOB: Peso sobre a broca

ROP: Taxa de penetração da broca

TQB: Torque na broca

RPM: Rotação da broca ou da coluna de perfuração

ECD: Densidade equivalente de circulação

ESD: Densidade estática equivalente

TVD: Profundidade vertical total

MIRACL: *Mid-Infrared Advanced Chemical Laser*

COIL: *Chemical Oxygen-Iodine Laser*

NIR: *Near Infrared*

MIR: *Mid Infrared*

FIR: *Far Infrared*

λ : Comprimento de onda

P_{av} : Máxima potência média

P_p : Máxima potência de pico

W_p : Largura do pulso

Debris: fragmentos, cascalhos.

1 Introdução

Um dos maiores desafios na perfuração das rochas carbonáticas do pré-sal é superar as baixas taxas de penetração que vem sendo obtidas na perfuração da rocha reservatório nos poços verticais e direcionais. Para vencer este desafio, um grande esforço vem sendo desenvolvido em várias linhas de pesquisa, tanto no desenvolvimento de novos conceitos de brocas, como na seleção de um sistema de perfuração que apresente um melhor desempenho. Para atingir este objetivo, estão sendo priorizados procedimentos e sistemas de perfuração que apresentem menores níveis de vibração, pois este fenômeno, além de reduzir a eficiência da perfuração, também compromete o tempo de vida útil dos equipamentos e, por consequência, acarreta a redução da confiabilidade do sistema e eleva o custo por metro da perfuração. Dessa forma, novas tecnologias de brocas e sistemas de perfuração estão em desenvolvimento, dentre as novas tecnologias, podemos diferenciar aquelas que promovem melhorias nas tecnologias convencionais e as tecnologias inovadoras, aquelas que utilizam mecanismos, totalmente novos, para cortar ou fragilizar a rocha.

No campo das tecnologias convencionais, já é possível observar uma gradual evolução no desempenho no que se refere às taxas de penetração e nos custos métricos das brocas utilizadas, vale mencionar a melhoria no gerenciamento dos parâmetros visando à redução das vibrações inerentes do processo de perfuração. Dentro do contexto da melhoria de desempenho, o controle e a mitigação dos efeitos da vibração na coluna e perfuração vêm recebendo uma atenção especial quando se trata da perfuração de rochas duras. Dispositivos específicos para a mitigação da vibração vêm sendo testados, e os resultados estão sendo analisados, conforme menciona Amaro, *et al*, 2012. Ao longo do desenvolvimento desta dissertação, é apresentada uma visão geral dos sistemas convencionais de perfuração que estão sendo utilizados nos últimos anos.

Em relação às tecnologias inovadoras, algumas vêm sendo testadas ou, ainda, se encontram em estágios iniciais de pesquisas. Dentre as tecnologias mais

promissoras, podemos destacar a perfuração a laser propriamente dita e a perfuração assistida por laser, onde o feixe de laser tem a função principal de fragilizar a rocha, facilitando o avanço da perfuração.

1.1. Objetivo

O objetivo dessa dissertação é avaliar as possibilidades da utilização da tecnologia laser na perfuração de rochas e apresentar um resumo dos estudos e análises que estão em andamento para verificar o real potencial dessa tecnologia. Para embasar as conclusões, será apresentado o resultado de testes de bancada realizados e um levantamento dos pontos considerados críticos para a sua aplicação, como por exemplo, a análise da interação com o meio, através do qual o laser deverá atuar nas aplicações futuras, sobre o enfoque das suas propriedades físico-químicas e suas propriedades quanto à absorção da luz incidente.

Em resumo, o objetivo final é o de traçar um painel do cenário de aplicação para esta tecnologia promissora e, apresentar uma análise, ainda que preliminar, sobre a sua viabilidade técnica, comparando a energia específica para a remoção da rocha em testes de bancada, em um dispositivo desenvolvido com esse propósito, com os valores obtidos na pesquisa bibliográfica. Em razão de sua característica multidisciplinar e do elevado número de variáveis envolvidas no processo, tem sido difícil o estabelecimento de um juízo de valor mais preciso sobre a real potencialidade desta tecnologia emergente.

1.2. Estrutura do Trabalho

Esta dissertação de mestrado está estruturada em doze capítulos, um apêndice e um anexo, distribuídos conforme a sequência apresentada a seguir:

Capítulo 01: Introdução, Objetivo e Estrutura do Trabalho

Capítulo 02: Revisão Bibliográfica

Capítulo 03: Tecnologias Convencionais

Capítulo 04: Laser

Capítulo 05: Análise de Absorção Ótica dos Fluidos

Capítulo 06: Análise Fotoacústica

Capítulo 07: Dispositivo para Teste de Bancada

Capítulo 08: Metodologia

Capítulo 09: Resultados e Discussões

Capítulo 10: Conclusões

Capítulo 11: Recomendações

Capítulo 12: Referências Bibliográficas

Apêndice A - Dispositivo para Teste de Bancada

Anexo A - Cálculo da Energia Específica

2 Revisão Bibliográfica

A partir do desenvolvimento de lasers de maior potência, no final do século XX, é possível encontrar na literatura especializada uma série de experiências mostrando a ação dos tipos mais comuns de laser sobre rochas com características variadas. Em 1997, o *Gas Technology Institute* (GTI) iniciou um estudo de viabilidade da utilização de laser de alta potência, até então usado apenas com objetivos militares, em aplicações visando à indústria de exploração de óleo e gás. A concepção do estudo, basicamente, se resumiu à exposição de diferentes tipos de rocha à ação de um laser de alta potência.

Os experimentos relatados na revisão bibliográfica foram realizados com vários tipos de rochas, tais como: arenitos, folhelhos e rochas carbonáticas, que representam a grande maioria das rochas, nos cenários de perfuração da indústria de exploração de petróleo e gás. Basicamente, o que se busca nestes experimentos é avaliar a melhor configuração de parâmetros para o laser, como por exemplo: a potência e a largura do raio de luz, a taxa de repetição, o tempo de exposição e a energia. A partir desses parâmetros, a intenção é avaliar como estes fatores afetam a energia transferida para a rocha, tendo-se em mente que, o objetivo principal é remover o máximo possível de volume de rocha com o mínimo de energia aplicada pelo sistema.

2.1. A Interação Rocha-Laser

As propriedades da rocha relacionadas com a absorção e reflexão são de grande importância na compreensão do fenômeno de interação entre a energia incidente do laser e a rocha. O fenômeno da reflexão interfere diretamente na quantidade de energia que é transferida para a rocha, enquanto que a absorção está relacionada com o nível de fragmentação e fusão que a rocha pode sofrer através da ação da energia incidente. Uma alta absorção de energia equivale a um elevado

nível de destruição do material. O espalhamento da energia da luz incidente é uma das formas de perda de energia no processo de destruição 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 (Larkina *et al.*, 1976; Gasoyan, 1976; Sobol, 1983).

- Refletividade. Esta propriedade da rocha é uma função do comprimento de onda da energia incidente, composição mineralógica da rocha, cor da superfície, temperatura do material e do ângulo de incidência da radiação. Em relação à superfície do material, também são relevantes: a rugosidade, o tamanho dos grãos e as condições de limpeza desta superfície. A perda por dissipação de energia afeta o total de energia transferida para a rocha pela radiação incidente. Assim, uma maior reflexão implica em uma menor energia transferida e, por consequência, um menor nível de construção do furo. A Tabela 1 mostra a refletividade (ρ_r) de alguns minerais quando expostos a luz incidente do laser no espectro visível (λ entre 6,38 μm e 0,77 μm) (Rzhevskii, 1967). Permanecendo os demais parâmetros constantes, o raio incidente do laser penetraria mais profundamente na hematita do que em uma rocha calcária de cor branca, basicamente, em razão da refletividade do material. 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, como se observa na Tabela 2, onde é mostrada a refletividade de alguns minerais para diferentes comprimentos de onda (Maloveev *et al.*, 1972).

Tabela 1: Refletividade (ρ_r) de alguns minerais obtidos para o raio no espectro visível.

Mineral	Refletividade ρ_r (%)
Arsenopirita	57
Galenita	43
Cinabar	27
Calcopirita	47
Hematita	25
Magnetita	20
Cromita	14
Talco	85 – 90
Mármore branco	80 - 95
Grafite	26,5
Ouro*	84

*Utilizado a título de comparação. Fonte: (Rzhesvkii, 1967).

Tabela 2: Refletividade de alguns minerais para diferentes comprimentos de onda.

Tipo de rocha	Comprimento de onda – λ (μm)		
	0,478	0,541	0,633
	Refletividade - ρ_r (%)		
Magnetita – Hematita Hornstone	18	19	20
Magnetita – Martita Hornstone	23	24	26
Granito	33	33	33
Mármore cinza	30	30	30
Mármore branco	77	77	77

Fonte: (Maloveev *et al.*, 1972).

- Absorção. O processo de destruição da rocha é diretamente influenciado pela energia absorvida pelo material. A absorção tem um efeito diametralmente oposto ao da reflexão no efeito de penetração do laser no

material. A absorção provoca: aquecimento, alteração das propriedades químicas e físicas, fratura e, finalmente, a fragmentação da rocha. O coeficiente de absorção da rocha varia entre 10 e 1000 cm^{-1} e, é uma função da composição mineralógica da rocha e do comprimento de onda da energia radiante incidente. Esta comparação foi feita entre o infravermelho e a luz visível por Larkina *et al.*, (1976), Gasoyan (1976) e Sobol (1983). Foi observado que a radiação infravermelha possui um poder 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.

- Radiação do corpo negro. Quando a temperatura da rocha aumenta muito, a própria rocha se torna uma intensa fonte de radiação. Esta fonte de energia é chamada de radiação do corpo negro (Larkina, 1976). A radiação do corpo negro representa uma perda de energia no processo de destruição da rocha pelo laser, pois isto causa a emissão de energia de volta para a superfície, ao invés de ser absorvida pela rocha, sendo, portanto uma desvantagem deste método. O fluxo de energia do corpo negro ($E_{\text{corpo negro}}$) pode ser calculado pela equação Stephane-Boltzman para sólidos (Sobol *et al.*, 1983, 1985).

$$E_{\text{corpo negro}} = \varepsilon \cdot \delta \cdot T^4 \quad (2.1)$$

Onde: ε é o coeficiente de negritude

δ é a constante e

T a temperatura em graus Kelvin.

Os valores para os coeficientes do corpo negro para alguns tipos de rocha são apresentados em diferentes temperaturas na Tabela 3.

Tabela 3: Coeficientes do corpo negro em função da temperatura.

Mineral – Metal	Temperatura (°K)	Coefficiente do Corpo Negro
Mármore branco	313	0,95
Calcário	293	0,8 – 0,9
Argila	343	0,8
Carvão	373 – 873	0,79 – 0,81
Quartzo grosseiro fundido	293	0,93
Ferro oxidado	373	0,74
Chumbo cinza oxidado	298	0,28

Fonte: (Larkina, 1976).

Algumas rochas são boas emissoras da radiação do corpo negro, como por exemplo, o quartzo, que como se observa na Tabela 3, chega a emitir de volta 93% da energia incidente do laser, na forma de energia do corpo negro, na temperatura de 293 °K. Parte desta energia emitida de volta não contribui para o processo de destruição da rocha. Quanto maior o valor da radiação do corpo negro, maior é a energia perdida durante a aplicação do laser (Kuznestov *et al.*, 1979). Outro fator importante no processo de fragmentação é a possibilidade de desidratação de argilas e carbonatos. Esta ocorrência levará a um aumento do volume de espaços vazios no interior da rocha.

- A condutividade térmica é a quantidade de calor transmitida para uma unidade de volume na unidade de tempo (Flinn e Trojan, 1981). Uma alta condutividade térmica indica um elevado intervalo de distribuição de temperatura e, portanto, mais microfaturas serão produzidas. A condutividade térmica depende de vários fatores como: o contato entre grãos, densidade, saturação, cimentação, porosidade e permeabilidade da amostra de rocha (Somerton, 1992). A condutividade térmica pode ser calculada pela equação (2.2) (Flinn e Trojan, 1981).

$$Q_x = -K_f \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

Onde: Q_x é o fluxo de calor na direção do eixo x
 K_f é a condutividade térmica e
 T é a temperatura

A condutividade térmica está relacionada com a densidade do material conforme a equação a seguir.

$$K_f = \frac{\rho_b^4}{9,56 \cdot 10^{-3}} \quad (2.3)$$

Onde: K_f é a condutividade térmica (W/m.K)
 ρ_b é a densidade (g/cm³)

A densidade está relacionada à porosidade pela seguinte equação.

$$\rho_b = 2,65 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - \phi) \quad (2.4)$$

Portanto, a condutividade térmica pode ser relacionada à porosidade através da seguinte expressão.

$$K_f = 5,16 \cdot (1 - \phi)^4 \quad (2.5)$$

Estas equações são baseadas em amostras secas e os experimentos foram conduzidos a 20 °C e 100 °C. O contato entre os grãos pode ser considerado como ponte ou meio para a transferência de calor. Quanto maior for a área de contato, maior será a transferência de calor.

Os conceitos e considerações sobre as propriedades da rocha que interferem no processo foram resumidos a partir do trabalho apresentado por Batarseh, 2001, em sua Tese de Doutorado.

2.2. O Processo de Fragmentação da Rocha

Os testes de interação do laser com a rocha procuram determinar os parâmetros otimizados de configuração do laser para a máxima eficiência na fragmentação e remoção da rocha. Os mecanismos de fragmentação da rocha observados nestes experimentos são: a descamação, a fusão e a vaporização do material sob a ação do laser. As experiências têm mostrado que, cada tipo de rocha possui um conjunto de parâmetros de configuração mais adequado à maximização do processo de fragmentação e remoção da rocha. Este é um primeiro aspecto importante a destacar, não basta apenas fragmentar a rocha, é necessário um processo eficiente de remoção do material fragmentado.

A absorção pela rocha da energia radiante proporcionada pelo laser dará início ao processo térmico que levará ao aumento de tensões internas da rocha e resultará na fragmentação, fusão ou vaporização do material. Outro aspecto importante que tem sido observado é que as taxas de difusão do calor na rocha são facilmente ultrapassadas pelas taxas de absorção de energia proporcionada pelo raio laser. Dessa forma, a temperatura da matriz de rocha sobe rapidamente, podendo atingir o ponto de fusão. Esta questão tem sido evidenciada por pesquisadores, como Gahan *et al.*, 2001, onde a energia específica apresenta um incremento quando se atinge o ponto de fusão. Os valores de menor energia específica são observados na faixa de fragmentação por descamação, antes de se instaurar o processo de fusão. Nesse momento, é útil lembrar que a energia específica (SE - *specific energy*) é uma forma de avaliar a eficiência do corte e remoção da rocha pelos sistemas de perfuração. A indústria do petróleo utiliza o conceito de energia específica para avaliar o rendimento dos sistemas de perfuração.

A tecnologia do laser possui um enorme potencial de aplicação nessa atividade, simplesmente, pelo fato de que é um processo que permite concentrar alta energia em uma área reduzida. Dessa forma, é possível cortar ou fragilizar rochas duras com um requerimento de energia menor se comparado aos métodos convencionais de perfuração. Um dos objetivos da presente dissertação é verificar a viabilidade desse potencial e, ao mesmo tempo, fazer uma análise crítica de algumas afirmações encontradas em artigos técnicos que, em uma avaliação

preliminar, parecem não estar em sintonia com a realidade das operações de perfuração que ocorrem em um poço de petróleo.

As pesquisas realizadas com laser de alta potência, e que lançaram um novo alento sobre esta tecnologia, utilizaram sistemas de laser que atuam na faixa média do infravermelho, como o *Mid-Infrared Advanced Chemical Laser* (MIRACL) pertencente ao *U. S. Army* e o *Chemical Oxygen-Iodine Laser* (COIL) pertencente a *U. S. Air Force*, sendo o primeiro na faixa de potência de 1 kW e o segundo na faixa de 10 kW. Vários tipos de rocha como: arenito, folhelho, carbonato, granito, halita e outros materiais compostos como concreto, foram utilizados nas experiências. Os resultados obtidos relativos à taxa de progressão do furo feito com laser foram animadores. A alteração nas propriedades básicas das rochas foi outro aspecto positivo, como por exemplo, o aumento da porosidade ao redor da área de atuação do laser, fenômeno este, observado em arenitos. No entanto, também foi observado o aparecimento de efeitos secundários não desejáveis, na medida em que, a profundidade do furo provocado pelo laser aumentava. Dentre estes efeitos não desejáveis, podem ser enumerados: o retrabalhamento dos cascalhos gerados através da fusão repetida do material e a liberação de gás da amostra de rocha, como consequência da elevação de temperatura durante o processo até atingir a descamação por *stress* térmico. Todos estes fenômenos reduzem a quantidade de energia transferida para a rocha, o que resulta em uma quantidade menor de material removido. Em outras palavras, eles contribuem para aumentar a energia específica.

Os testes realizados pelo *Gas Technology Institute* (GTI) mostraram que a tecnologia do laser atualmente disponível é suficiente para fragmentar, fundir ou vaporizar qualquer tipo de rocha. Também, mostraram que a energia requerida para realizar este trabalho varia muito conforme o tipo de rocha. No entanto, não foram obtidos resultados quantitativos sobre a energia mínima necessária ou a determinação precisa de quais fatores controlam o processo. Porém, ficou evidente no estudo a necessidade de controlar a quantidade de material que sofre o processo de fusão e, também, a necessidade de se conhecer a energia mínima necessária para realizar a fragmentação da rocha (Gahan *et al.*, 2001).

A partir deste estudo inicial, um acordo de cooperação entre o *Gas Technology Institute* (GTI), o *Argonne National Laboratory* e *Colorado School of Mines*, viabilizou a pesquisa da energia mínima requerida para remover a rocha

com a atuação do laser. Um dos produtos desta investigação refere-se à determinação da energia específica para a remoção da rocha (kJ/cm^3). Dessa forma, para cada amostra testada foram registrados os seguintes parâmetros de configuração: comprimento de onda do laser, frequência do pulso, duração do pulso, potência do laser, tempo de exposição total da amostra e o total de energia do laser aplicada sobre cada amostra. Neste estudo, foi utilizado o laser de alta potência Nd:YAG pulsado e o laser de CO_2 de onda contínua. A principal razão de se optar por um laser pulsado, nesta fase dos estudos, foi a de poder controlar melhor os parâmetros do laser que interferem na interação com a rocha e que resultarão no processo de fragmentação, fusão ou vaporização. As pesquisas se concentraram nas variáveis que afetam a determinação da energia específica e, procurou-se minimizar, e até evitar, se possível, o aparecimento dos efeitos secundários. Assim sendo, as experiências foram limitadas a furos de pequena profundidade, onde a presença dos efeitos secundários é menos relevante. Todas as amostras de rocha testadas passaram por testes para a determinação de sua composição mineralógica.

No processo de criação e progressão do furo na amostra de rocha, o tipo de laser representa um papel crucial na eficiência e qualidade do corte da rocha. Sendo assim, as propriedades do laser como o tipo de descarga, se contínuo ou pulsado, o comprimento de onda, a potência de pico, a potência média, a intensidade, a taxa de repetição e a duração do pulso interferem no tipo de interação que será obtido com a rocha e, por consequência, na energia transferida para a superfície da rocha. Os resultados obtidos nos testes preliminares mostraram que o laser penetra na matriz da rocha, uma vez que, esta possui um baixo índice de reflexão para ondas eletromagnéticas. Também, o fato das rochas possuírem uma baixa condutividade térmica promove um rápido aquecimento da superfície e o aparecimento de tensões internas, sendo estes, os principais fatores que contribuem para a eficiência do processo de fragmentação.

Para fragmentar a rocha por tensões, mecanicamente ou termicamente induzidas, uma quantidade de energia suficiente deve ser aplicada na amostra de rocha para que as tensões induzidas sejam maiores que a resistência da rocha. De modo similar, quando ocorre a fusão da rocha, calor suficiente deve ser gerado para produzir no local uma temperatura que exceda a temperatura de fusão do material. Uma vez que, estes valores limítrofes de potência e energia sejam

atingidos, a quantidade de energia requerida para fragmentar e remover uma unidade de volume de rocha permanecerá praticamente constante. Este parâmetro de energia, o qual é a medida de eficiência de destruição da rocha, é definida como energia específica (SE).

Resumindo, a energia específica é a quantidade de energia requerida para fragmentar e remover uma unidade de volume de rocha e, pode ser representada como se segue:

$$SE \text{ (J/cc)} = \text{Energia aplicada} / \text{volume removido} \quad (2.6)$$

$$SE = \frac{\text{Energia aplicada}}{\text{Volume removido}} = \frac{E}{\frac{dV}{dt}} = \frac{kW}{\frac{cm^3}{s}} = \frac{kJ}{cm^3} \quad (2.7)$$

Existem três fenômenos básicos que interferem no processo de transferência de energia radiante para os sólidos: reflexão, espalhamento e absorção da radiação. O fluxo de energia de uma onda eletromagnética incidente é, portanto, apresentado conforme a fórmula indicada a seguir:

$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{refletida}} + E_{\text{espalhada}} + E_{\text{absorvida}} \quad (2.8)$$

No caso de superfícies planas e polidas, como um espelho, a parcela que prevalece é a parcela da energia refletida, já no caso de superfícies rugosas, a parcela da energia incidente predominante é a parcela da energia espalhada. A refletividade é determinada pela composição do material, enquanto que o espalhamento é determinado pelo comprimento de onda da energia incidente. Entretanto, é a energia absorvida que dá início ao processo de aquecimento da rocha e a indução de tensões internas no material provocado pelo calor, levando, finalmente, à fragmentação ou fusão. Assim, pelo que foi anteriormente exposto, a reflexão e o espalhamento representam perdas de energia durante o processo de destruição da rocha. Portanto, a minimização das frações de energia refletida e energia espalhada que representam perdas, contribuirão para a maximização da

energia radiante disponível a ser transferida para o processo de destruição da rocha.

Existem fatores que afetam a quantidade de energia transferida para a amostra de rocha. Estes fatores são conhecidos como efeitos secundários. Dentre estes efeitos, inclui-se a formação de material proveniente de fusão, a absorção da energia do raio por gases dissociados da amostra, como resultado da rápida elevação da temperatura e a indução de micro fraturas na vizinhança do furo e que contribuem para a dissipação do calor. Quando se aplica energia radiante proveniente de um laser de alta potência sobre a rocha, os fenômenos que ocorrem são, os já mencionados: descamação, fusão e vaporização do material da superfície da rocha, resultado da elevação da temperatura localmente. Os minerais iniciam o processo de fusão quando a taxa de dissipação de calor da rocha é excedida pela taxa de absorção de energia pela rocha. Com o passar do tempo, a energia se acumula em forma de calor, aumentando a temperatura local que ultrapassa a temperatura de fusão dos minerais que constituem a rocha, formando uma estrutura vítrea. A quantidade de material fundido é uma função da mineralogia da amostra e do espaço intergranular do material. Quanto mais próximos os grãos estiverem uns dos outros, maior será a transferência de calor e, portanto, maior a quantidade de material fundido.

Por outro lado, grãos fortemente empacotados podem apresentar uma maior condutividade térmica, o que contribuirá para uma taxa de dissipação de calor maior, provocando um efeito contrário, reduzindo a quantidade de material fundido, que por sua vez interfere diretamente no cálculo da energia específica. Devemos considerar o fato de que, alguns materiais ao se decompor, contribuem para a produção de gases quando aquecidos. Da mesma forma que o material fundido, os gases gerados podem absorver parte da energia incidente, isto provocará a redução da energia transmitida para a matriz da rocha. As microfraturas induzidas na amostra, por sua vez, têm impacto sobre a energia específica. Essas microfraturas podem contribuir para fragilizar a rocha e facilitar no processo de remoção do material. Outro fator a considerar com relação às fraturas induzidas reside no fato de que, as dimensões, formas e comportamento das fraturas variam muito conforme o tipo de rocha estudada. Esta variação está associada a fatores intrínsecos, tais como: mineralogia, propriedades térmicas da rocha, volume dos espaços vazios, dimensão da amostra e magnitude das tensões

geradas pelos efeitos térmicos. Por exemplo, a argila contém água, que tende a se vaporizar em pressões relativamente baixas, sendo esta a condição dos testes realizados até o momento, o que pode levar a indução de tensões e provocar fraturas induzidas pela pressurização do vapor.

Na questão da condutividade térmica, os arenitos e os folhelhos possuem alta condutividade. Por sua vez, os carbonatos possuem baixa condutividade térmica e, de um modo geral, pequenas quantidades de quartzo e, geralmente, não possuem argila. Dessa forma, não é de se esperar o aparecimento de fraturas pelo mecanismo de expansão do vapor, uma vez que este é um fenômeno oriundo da água presente nas argilas.

Rochas que possuem alta condutividade térmica, como arenitos e folhelhos, apresentam um aquecimento pela energia incidente mais eficiente e um padrão de distribuição de temperatura mais uniforme. Este tipo de rocha, por esta razão, apresenta um padrão de resfriamento, também, mais uniforme ao longo da amostra. Esta característica contribui para o desenvolvimento de fraturas regulares, não randômicas. As altas temperaturas resultantes da energia do laser causam a expansão dos grãos de quartzo. Segundo (Gahan *et al.*, 2001), na temperatura de 600 graus centígrados o grão de quartzo expande, cerca de, 1,75% do seu volume original. Esta é uma característica muito interessante para cenários com a presença de nódulos de sílica. As dimensões das amostras utilizadas nos testes podem afetar o comportamento e as dimensões das fraturas, como, de fato, foi observado em experimentos de laboratório.

O tipo de descarga por pulsos permite um melhor controle dos efeitos do laser sobre a rocha do que a descarga contínua. Por exemplo, pulsos longos e altas taxas de repetição favorecem a fusão da rocha, ao passo que, pulsos curtos e baixa taxa de repetição favorecem a criação de microfraturas. Este tipo de controle não é possível no caso da descarga contínua. Nos experimentos onde o diâmetro do raio é variável, é necessário definir a intensidade do laser, I (também, chamada de densidade de potência), sendo a potência de pico dividida pela área de incidência do raio. Somente assim, será possível estabelecer comparações válidas entre outras experiências.

$$I(\text{Watts}/\text{cm}^2) = P_p (\text{Watts})/\text{área do raio} (\text{cm}^2) \quad (2.9)$$

A opção por uma variação larga de parâmetros tem por finalidade poder avaliar melhor os efeitos do laser sobre a determinação da energia específica. A energia específica tende a aumentar em uma relação direta com o tempo de exposição. No início do processo da ação do laser, a energia radiante interage somente com a superfície da amostra e, neste momento, os efeitos secundários são mínimos, como por exemplo, o depósito de material fundido. Nesta situação, o raio pode atingir diretamente a rocha sólida e remover o material fragmentado. No entanto, à medida que o tempo de exposição aumenta, a região de interação vai sendo aquecida e os efeitos secundários passam a desempenhar um papel mais relevante. Assim, o material fundido começa a se formar e a consumir energia adicional ou, até mesmo, bloquear a ação sobre a rocha e, por fim, dificultar a remoção do material.

Sobre a questão do valor da energia específica ser maior para carbonatos do que para folhelhos, até o momento, somente é possível especular sobre a coloração da rocha. Uma vez que, rochas com tonalidades mais claras poderiam refletir uma parcela maior da energia radiante, resultando em uma menor absorção de energia pelo material. O processo levaria a uma menor eficiência na descamação, contribuindo para menores valores de material removido, ou uma energia específica maior.

Outro conjunto de testes, realizado por (Gahan *et al.*, 2001), estudou o comportamento da energia específica em relação à duração do pulso. Os resultados, obtidos com arenitos para pulsos de um e dois milissegundos, encontraram valores decrescentes de energia específica. Este comportamento tem sido explicado em termos da quantidade de energia depositada na amostra por unidade de tempo e na duração do tempo de resfriamento entre os pulsos do laser. Para uma determinada intensidade, a quantidade de energia depositada por unidade de área dobra para um pulso de dois milissegundos em relação a um pulso de um milissegundo.

Outro parâmetro analisado foi a taxa de repetição e seu efeito sobre a energia específica. A taxa variou de 50 até 400 pulsos por segundo, sendo que os demais parâmetros foram mantidos constantes. Este mesmo comportamento foi observado para diferentes valores de duração do pulso, tempo de exposição da amostra e intensidade do pico de energia para cada tipo de rocha testada. O resultado pode ser atribuído ao fato de que a descarga de pulso cria um ciclo de

aquecimento e resfriamento na amostra, que leva a indução de tensões que produzem microfaturas.

Conforme o trabalho realizado por (Gahan *et al.*, 2001), a energia específica decresce com o aumento da taxa de repetição do pulso. Estes resultados são válidos desde que a duração do pulso seja mantida constante ou tenha variações muito pequenas. A conclusão mais importante é a de que o efeito da duração do pulso é dominante em relação à taxa de repetição do pulso. A zona de transição depende da potência do laser e da temperatura de fusão dos minerais componentes da amostra. A temperatura de fusão da amostra de rocha aumenta com a porcentagem de quartzo e, na medida em que a temperatura de fusão da rocha vai aumentando, a eficiência do processo para destruição da rocha vai decrescendo. Aplicando o conceito de energia específica, quanto maior a porcentagem de quartzo maior a energia consumida para se obter a fusão e a vaporização do material. O conceito é particularmente aplicável quando se produz furos com maior profundidade. No caso de furos rasos, com um sistema de liberação de gases mais eficiente, outros parâmetros competem com a concentração de quartzo para o controle do processo de fusão. Estes fatores são: a rugosidade da superfície, a coloração da rocha, a concentração de grãos, a presença de vesículas (*vugs*) e fraturas, além das propriedades térmicas, como condutividade, calor específico do material e difusibilidade. Os valores destes parâmetros para arenitos, folhelhos e carbonatos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades termo físicas de amostras de rocha.

Tipo de rocha	Mineralogia	Composição	Quartzo (%)	Condutividade térmica $10^3(\text{cal/seg/cm}^\circ\text{C})$	Capacidade térmica $(\text{cal/g}^\circ\text{C})$	Difusividade (cm^2/seg)
Arenito Berea Gray	Quartzo Feldspato Outros	SiO ₂ Al ₂ O ₃	85 10 5	6,2	0,21	11,3
Calcário	Cálcio Carbonato Fragmentos	CaCO ₃ MgO	85 5 10	4,8	0,22	8,1
Folhelho	Quartzo Feldspato Fragmentos	SiO ₂ Al ₂ O ₃	35 20 45	-	-	7,5

Fonte: (Gahan *et al.*, 2001).

Um exemplo da transição entre zona de descamação e zona de fusão para folhelhos pode ser observado na Figura 1. Neste exemplo, a potência do laser foi incrementada de 0,2 kW para 1,2 kW e várias determinações da energia específica foram realizadas. No gráfico da Figura 1, é possível identificar os 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.

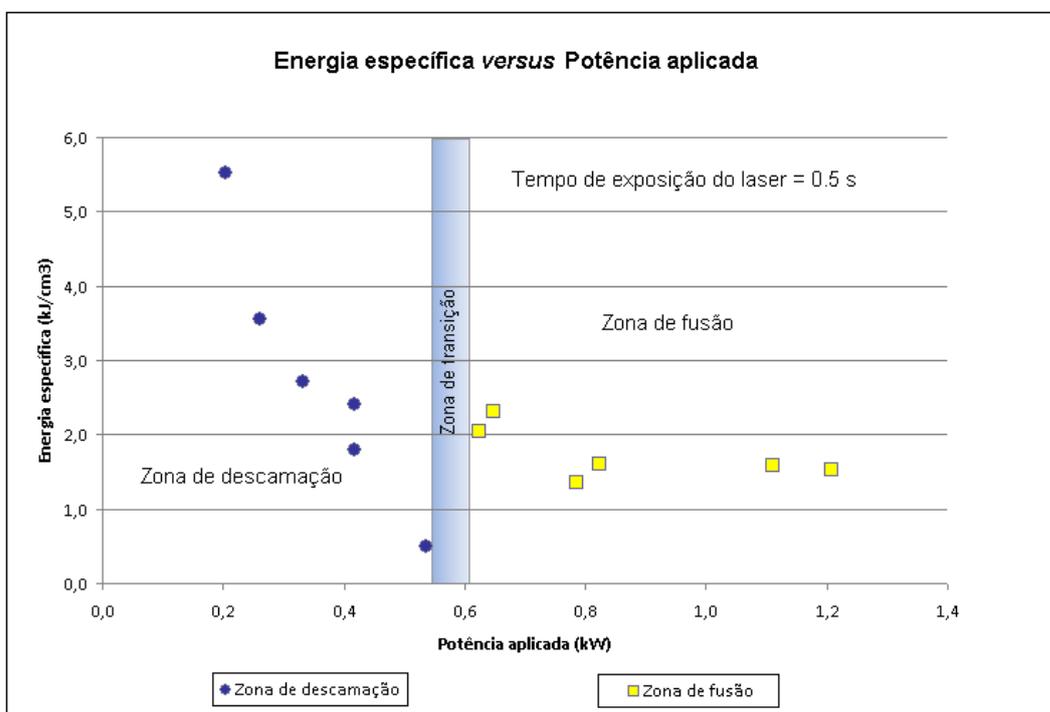


Figura 1: Mudança no método de remoção do material, da descamação para a fusão.

Fonte: (Gahan *et al.*, 2001).

É possível observar na Figura 1, 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 raio, uma considerável parcela 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. Durante os testes realizados, os efeitos secundários foram minimizados, uma vez que os furos produzidos eram de pequena profundidade e o jato de gás era suficiente para remover o material produzido pela ação do laser.

O estudo realizado, por Gahan *et al.*, 2001, permitiu várias conclusões importantes sobre o laser Nd:YAG, em relação aos parâmetros de configuração que mais interferem no cálculo da energia específica.

- A energia específica aumenta rapidamente com a exposição ao raio incidente, indicando que os efeitos secundários consomem energia e, assim, reduzem a eficiência do processo.
- As amostras de folhelho registraram os menores valores referentes à energia específica calculada, em razão, provavelmente, da coloração e da composição mineralógica do material.
- Tanto para o aumento da taxa de repetição do pulso como para o aumento da duração do pulso foi observado um decréscimo da energia específica.
- A duração do pulso se apresenta como um mecanismo dominante na redução da energia específica.
- Nas amostras de folhelho, foram identificadas duas regiões com mecanismos de ação do laser: a zona de descamação e a zona de fusão. Sendo que o ponto de menor valor de energia específica encontrado é na zona de descamação próximo a zona de transição, antes de se atingir a zona de fusão.
- A taxa de absorção da matriz da rocha ultrapassa a taxa de difusão do calor, com isso a temperatura local aumenta para além do ponto de fusão do material. Por consequência, a energia específica aumenta.

2.3. A Ação do Laser sobre Rochas Carbonáticas

Outro importante estudo realizado para verificar a eficiência da atuação do laser sobre rochas duras foi conduzido por Valente *et al*, 2012. Foram realizados testes de bancada com a utilização de um laser de CO₂ e um laser diodo a fibra. As potências disponibilizadas na superfície da amostra foram modestas, para o laser de CO₂ foi de 140 W e para o diodo laser a fibra 215 W. Mesmo assim, foi possível realizar furos com diâmetros da ordem de 8 mm e com uma eficiência variando de 40 kJ/cm³ até 150 kJ/cm³. As amostras utilizadas nestes testes foram o granito cinza, o granito branco e o mármore Travertino.

Os experimentos consistiram na utilização do laser de CO₂ com um comprimento de onda de 10,6 µm e potência máxima de 140 W e um laser diodo a fibra com comprimento de onda de 980 nm e potência máxima de 215 W. Ambos os lasers eram colimados, com um diâmetro do raio constante, em torno de, 8 mm. Após a exposição da rocha por um determinado período de tempo, foi aplicado um jato de alta pressão com nitrogênio para a remoção do material. O processo era controlado por um programa de computador que permitia total flexibilidade, tanto quanto ao tempo de exposição do laser, como sobre a quantidade de jatos de limpeza com nitrogênio. As concentrações químicas das amostras foram obtidas por análise de fluorescência e estão representadas na Tabela 5. Outras análises com difração de raios-X confirmaram as propriedades químicas das amostras.

Tabela 5: Composição química predominante nas rochas analisadas.

Granito Branco		Mármore Travertino		Granito Cinza	
Elemento	Concentração	Elemento	Concentração	Elemento	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

Fonte: Valente G. *et al*, 2012.

Para que fosse possível comparar os efeitos da ação do laser sobre as amostras, foram realizadas análises de termogravimetria em um intervalo de temperatura entre 150 °C e 1500 °C. Estas análises indicaram uma forte perda de massa para as amostras de granito branco e mármore Travertino na temperatura de 800 °C, como pode ser observado na Figura 2, sendo nesta região onde se espera um efeito similar na aplicação do laser.

O processo responsável por esta perda de massa foi identificado como sendo a calcinação do carbonato de cálcio (CaCO_3) que tem como resultado a geração de gás carbônico (CO_2) e de óxido de cálcio (CaO), sendo este processo a essência do mecanismo de criação do furo provocado pelo laser. Para a comprovação de que se trata de um fenômeno basicamente térmico, as amostras destes materiais foram tratadas em um forno aquecido à temperatura de 800 °C, por alguns minutos, sendo o resultado obtido semelhante ao efeito da incidência do laser, o que corrobora a hipótese da calcinação do carbonato de cálcio. A análise de termogravimetria para o granito cinza não apresenta perda significativa de massa.

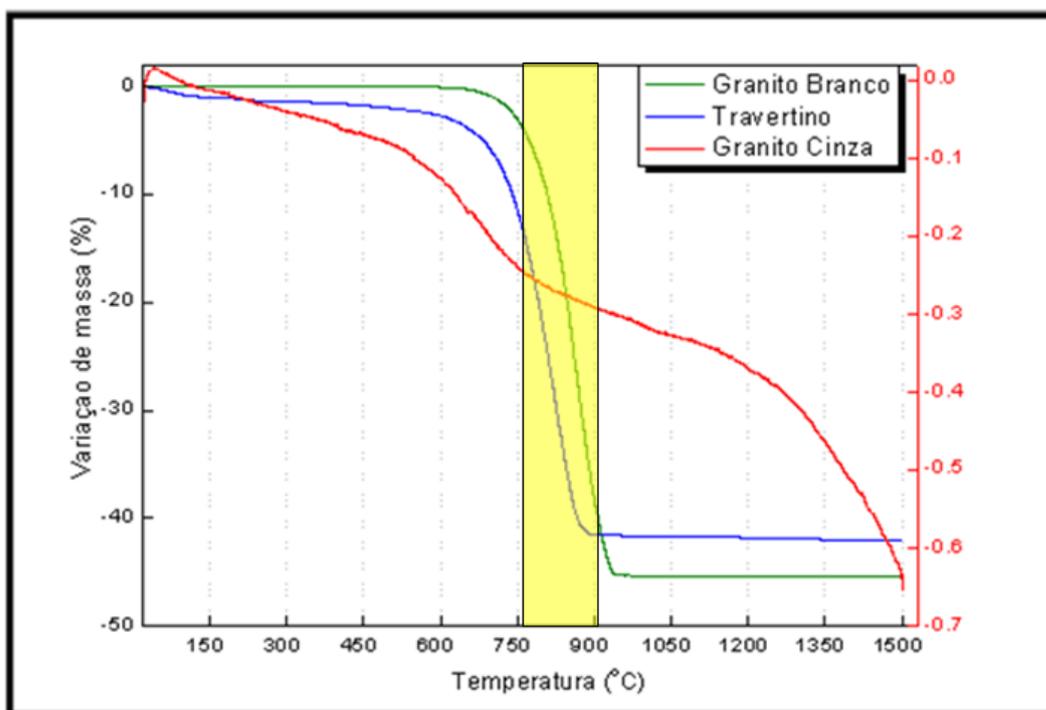


Figura 2: Variação percentual da massa obtida por termogravimetria.

Fonte: Valente *et al*, 2012.

O controle do laser pode ser feito através de um programa de computador desenvolvido no Laboratório de Sensores de Fibra Ótica da PUC-Rio (LSFO), sendo possível controlar: a taxa de modulação, o intervalo de exposição, o tempo e o número total de ciclos ligado/desligado.

O processo de perfuração com laser ocorre através da conjugação de vários efeitos físicos e químicos que, por si só, retiram o material fragmentado ou permitem a retirada do material fragilizado com pequena energia mecânica adicional. Entre estes efeitos, podem ser citados: a evaporação, ablação, descamação, dissociação química e fusão. O efeito predominante depende das características físicas e químicas do material e do comprimento de onda da radiação utilizada. No caso analisado, o material fragilizado pelo laser foi retirado mecanicamente, através de jatos de gás nitrogênio direcionados à região perfurada, uma vez que esta técnica, nas condições do experimento realizado, foi a que apresentou maior facilidade de implementação. As amostras de mármore Travertino e granito branco, por apresentarem alta concentração de carbonato de cálcio, também, apresentaram comportamento semelhante sob a ação da energia radiante incidente do laser. A análise de termogravimetria indicou uma importante perda de massa no caso do mármore Travertino e do granito branco, ambos perdendo aproximadamente 40% de suas massas quando a temperatura alcançou 800 °C. O material remanescente, predominantemente CaO, pode ser facilmente removido pelo jato de nitrogênio, uma vez que, se apresenta na forma de pó.

Na Figura 3, é possível observar no lado esquerdo, o efeito do laser sobre o mármore Travertino, com uma configuração com densidade superficial de potência óptica insuficiente para fragilizar o material. No lado direito, se observa o material alterado, que permanece no local e que necessita ser retirado por um processo mecânico.

A Figura 4 mostra o resultado da exposição de amostras de mármore Travertino e granito com parâmetros de configuração diferentes. Na sequência de fotos, podem ser observados os furos produzidos pelo: (a) laser a diodo no granito branco, potência = 215 W e $\lambda = 0,98 \mu\text{m}$, (b) laser de CO₂ no granito branco, potência = 140 W e $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$, (c) laser a diodo no granito cinza e (d) furo passante no mármore Travertino.



Figura 3: Efeito do laser sobre o mármore Travertino.

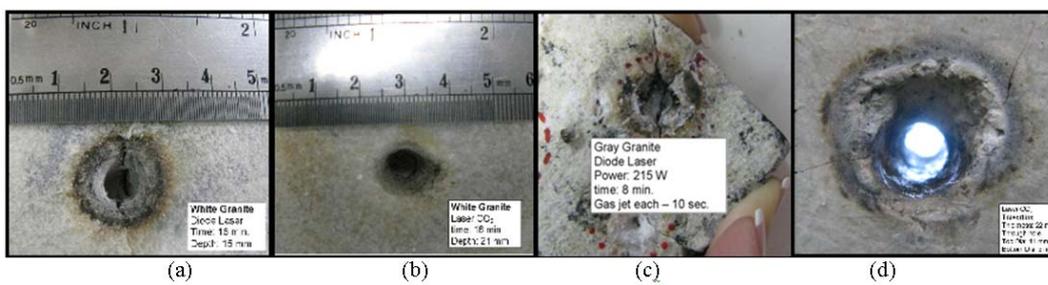


Figura 4: Furos produzidos por laser de CO₂ e a diodo.

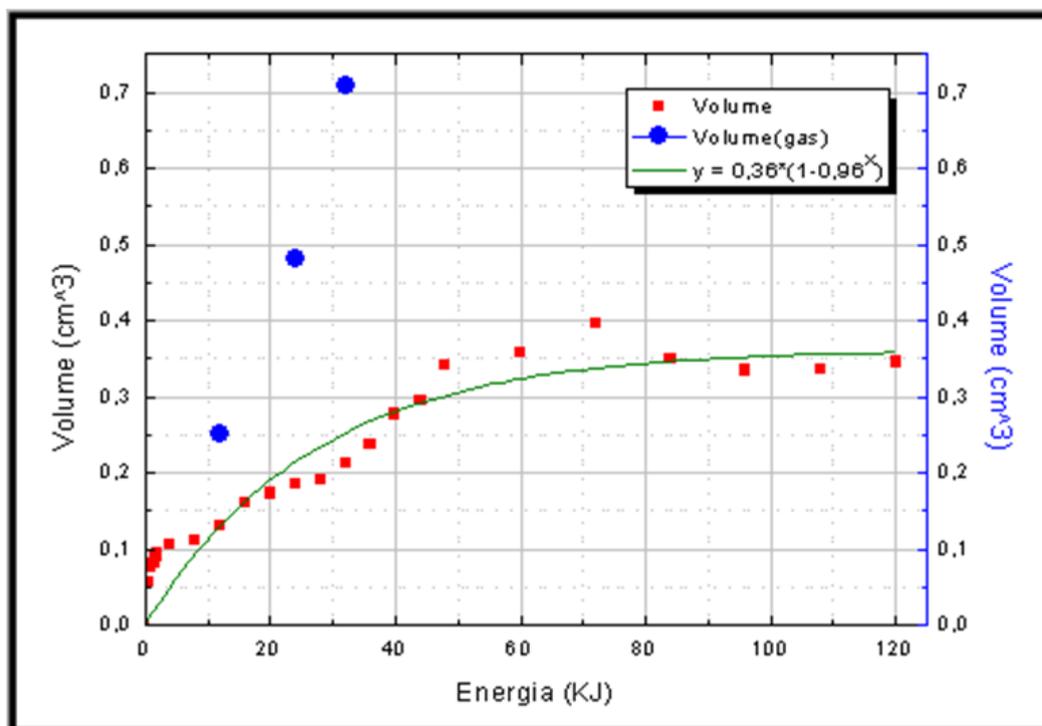


Figura 5: Volume do material removido em função da energia.

Fonte: Valente *et al*, 2012.

Na Figura 5, é possível observar o resultado de um teste de bancada, onde os pontos vermelhos representam a evolução do processo, sem a retirada do material fragilizado e os pontos azuis representam a evolução do processo, com a retirada do material entre as exposições ao laser.

Os resultados obtidos para a determinação da energia específica, para cada uma das amostras de rocha analisadas e para cada tipo de laser, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Energia específica em kJ/cm^3 para o laser de CO_2 e laser de diodo.

Laser	Granito branco	Mármore Travertino	Granito cinza
CO_2	34,71	44,55	66,69
Diodo	92,66	59,82	67,17

Fonte: Valente *et al*, 2012.

O granito cinza apresenta uma composição química com grande concentração de silício, onde se observa uma presença expressiva de sílica (SiO_2) e os resultados da análise de termogravimetria não apresentaram perda de massa significativa. No entanto, observa-se que, sob a irradiação do laser ocorre a fusão do material e, a menos que seja removido mecanicamente, permanecerá no local na forma vitrificada. Os resultados indicam que a eficiência no início da perfuração do granito cinza é semelhante ao encontrado para outras rochas, com energia específica de 60 kJ/cm^3 para ambos os lasers. No entanto, o processo de remoção do material com jato de nitrogênio não apresenta bons resultados no caso do granito cinza, em razão da vitrificação do material fundido e da dificuldade de remoção do material resultante da fusão. À medida que o furo se aprofunda, ocorre uma queda na eficiência, como pode ser observado para o caso do laser de diodo, na Figura 6.

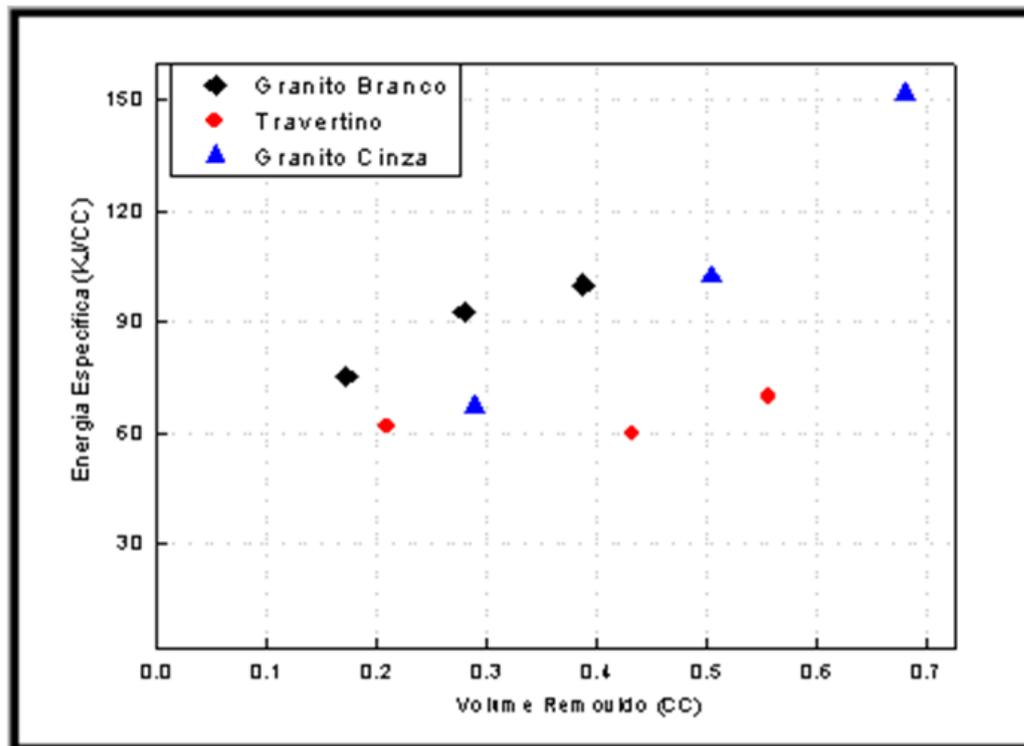


Figura 6: Energia específica em função do volume removido.

Fonte: Valente *et al.*, 2012.

Outro ponto importante a destacar, é o fato de que o granito cinza e o carbonato não apresentaram o comportamento relatado por (Gahan *et al.*, 2001), onde as amostras testadas (arenitos, folhelhos e carbonatos) passavam por um processo de descamação quando aquecidas abaixo do ponto de fusão do material e, após uma breve zona de transição, entravam em processo de fusão no local da incidência da luz do laser. A ação do laser de CO₂ no granito branco (na verdade um carbonato) foi mais eficiente do que a ação do diodo laser. Esta é uma indicação de que a luz do diodo laser, com comprimento de onda de 980 nm, não é totalmente absorvida pelo granito branco. Outro aspecto referente à parcial transparência do granito branco à luz com este comprimento de onda, é que não se observa a presença de bordas com canto vivo no furo provocado pelo laser, diferente do que se observa com o laser de CO₂. Isto indica a penetração de alguns milímetros na matriz da rocha da energia incidente com o comprimento de onda de 980 nm.

Para o granito branco a energia específica encontrada foi de 40 kJ/cm³, no caso do laser de CO₂ e, em torno de, 90 kJ/cm³, para o diodo laser. Para o mármore Travertino a energia específica foi de 60 kJ/cm³ para os dois tipos de

laser. No caso do granito cinza, a energia específica começava a partir de 60 kJ/cm³ e aumentava com o desenvolvimento do furo.

Estes resultados, mesmo que preliminares, estimulam a continuidade das pesquisas, despertando interesse, em particular, nos sistemas de laser a fibra, que teriam mais facilidade de ser incorporado aos sistemas de perfuração e apresentam maior eficiência de conversão de energia elétrica para ótica.

Em relação aos carbonatos, é interessante observar que, em torno de, 40% da massa removida do furo obtido com laser de CO₂ foi convertido na forma gasosa de CO₂, devido à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃). Em relação ao granito, o que se pode sugerir é o desenvolvimento de outros métodos de remoção do material após a ação do laser, pois o jato de alta pressão de nitrogênio provoca o resfriamento do local da amostra e drasticamente reduz a eficiência do processo de construção do furo.

2.4.

O Uso do Laser sobre Amostras Imersas na Água

Seguindo a linha de pesquisa de buscar na literatura assuntos correlatos com grau crescente de complexidade, o próximo trabalho analisado se refere à utilização do laser, neste caso laser de CO₂, para a execução de furos com a amostra de rocha submersa em água. Este trabalho apresentado por Kobayashi *et al*, 2008, utilizou amostras de granito, que segundo o autor é um material que não apresentava, até então, histórico de sucesso na execução de furos com laser com a amostra submersa. O trabalho descreve um experimento onde se utilizou um laser de CO₂ atuando sobre uma amostra de granito submersa inicialmente em água a uma profundidade de 50 mm. Em outra experiência foi utilizada uma solução com 4% de bentonita, um tipo de argila bastante utilizado na fabricação de fluidos de perfuração.

O laser de CO₂ utilizado possuía um comprimento de onda de 10,6 µm, o qual tem um elevado coeficiente de absorção na água e foi intermitentemente irradiado sobre a amostra submersa. A ação do laser induziu na lâmina d'água de 50 mm ondas de choque, a formação de bolhas de cavitação e micro jatos de água sobre as bolhas colapsadas. A alta potência do laser fundiu o granito,

transformando a sílica presente no material em vidro fundido para posteriormente transformá-lo em pequenas bolas de vidro fundido. As bolas de vidro formadas eram pequenas o suficiente para serem facilmente removidas para fora do furo criado. Este processo de remoção pode ser visualizado através de uma câmera de alta resolução utilizada durante a experiência. Através deste recurso, foi possível observar a formação de bolhas de vapor no formato de um cone e o laser atingindo a amostra de rocha, passando através deste cone de bolhas de vapor formado na lâmina d'água. Pesquisas anteriores realizadas por Mukhamedgalieva *et al*, (entre 1975 e 1982), com laser de CO₂ de baixa potência reportavam a formação de nuvens de material evaporado e concluíam que tais nuvens absorviam a energia do laser. Esta absorção levava ao aumento da temperatura da nuvem de material vaporizado e a um incremento da absorção da energia do laser pela nuvem, que culminava por interromper o processo de destruição da rocha por completo. Para evitar a fusão da rocha, algumas pesquisas têm sido conduzidas para a identificação de uma zona de transição entre a descamação e a fusão do material para os tipos de rochas mais comumente encontrados no cenário da indústria da construção de poços. De acordo com estas pesquisas, para fragmentar a rocha mecanicamente ou por indução de tensões térmicas, deve ser aplicada na rocha tensão suficiente, de forma a superar a resistência mecânica da rocha.

O raio do laser pode penetrar alguma distância em um fluido transparente. No entanto, o espalhamento e a absorção por parte de partículas sólidas contidas no fluido, com algum grau de turbidez, podem impedir que a rocha submersa seja atingida pelo laser, se esta distância for excessiva. As forças mecânicas induzidas pelo laser em sistemas fluido/rochas imersas, como anteriormente mencionado, são: ondas de choque, formação de bolhas e jatos de água provocados pelo vapor produzido. Na experiência realizada, a energia irradiada pelo laser é absorvida pela água até formar bolhas em uma forma que se assemelha a um cone e tem uma interface irregular. Uma vez que, as bolhas induzidas se mantenham até que um subsequente raio de laser atinja o objetivo, a rocha pode ser efetivamente perfurada.

No experimento realizado por Kobayashi *et al*, 2008, foi possível produzir um furo de 47 mm em uma amostra de granito imersa em 50 mm de um fluido composto por água com 4% de bentonita. As características físicas da amostra de granito utilizada (granito Inada) são:

Resistência compressiva uniaxial: 180 MPa

Resistência ao cisalhamento: 0,75 MPa

Módulo de Young: 65 MPa

Densidade: 2,63 g/cm³

Porosidade: 0,75%

Calor específico: 0,0167~0,0377 J/g/K

Condutividade térmica: 54,4~83,7 W/m/K

A formação de bolhas induzidas pela irradiação do laser de CO₂ através da água foi constatada durante este experimento. O comprimento e a largura das bolhas formadas variaram em função do tempo decorrido desde o início da irradiação. O laser utilizado possuía uma potência de pico de 5 kW, largura de pulso de 50 milissegundos, taxa de repetição de 10 Hz, energia pulsada de 250 J e uma razão de trabalho de 50 %. O experimento foi realizado com o ponto focal do raio laser, de 10 mm de diâmetro, posicionado em duas diferentes distâncias em relação à amostra: a primeira na superfície da água, e na segunda experiência, posicionado 50 mm em profundidade a partir da superfície da água. A irradiação do laser na água produziu um conjunto de bolhas em um formato semelhante a um cone, que evoluiu de cima para baixo. O comprimento máximo da bolha formado foi de 55,2 mm, em um tempo de 25 milissegundos. Esse comprimento máximo, com o foco do laser a 55 mm abaixo da superfície, foi 27 % maior do que o comprimento das bolhas formadas com o foco do laser posicionado na superfície da água. O padrão de formação das bolhas seguia uma seqüência bem definida: evoluía até o comprimento máximo, começava a encolher, dissociava-se, colapsava e desaparecia.

A temperatura da bolha foi medida por um termopar, e para proteger o termopar das altas temperaturas esperadas foi utilizada uma proteção com silicone. O termopar foi posicionado a 50 mm abaixo da superfície da água, em posição semelhante a que fica a amostra de rocha.

Na experiência realizada, o laser possuía um ponto de focalização, à medida que a irradiação acontecia e o furo na rocha era produzido, era necessário aproximar o laser da amostra para manter constante o foco. Caso contrário, devido à perda de foco, o laser perderia eficiência no processo de construção do furo. Dessa forma, foi identificada na experiência a velocidade ótima de aproximação

para a manutenção do foco do laser. Com a utilização de uma câmera de alta velocidade, foi possível conhecer o valor mais adequado para esta velocidade de aproximação. Estes valores foram identificados para as rochas amostradas, o melhor tempo de penetração encontrado para amostra com 20 mm de espessura foi de 0,5 mm/s. Para as amostras com 30 mm de espessura a melhor velocidade de aproximação do foco do laser foi de 0,4 mm/s. As amostras foram seccionadas para permitir uma melhor verificação do resultado da ação do laser e, em ambas, foi observada uma fina camada de vidro revestindo o interior do furo. O furo realizado possuía um diâmetro de, aproximadamente, 3 mm com uma parede relativamente retilínea.

Mesmo em uma solução aquosa com a adição de bentonita a 4%, portanto opaca, foi possível verificar a ação do laser sobre uma amostra de granito, observando-se o mesmo princípio, onde bolhas são geradas e, através das quais o raio atinge a rocha, iniciando-se um processo de fusão dos componentes como o quartzo e o SiO_2 . Na experiência reportada por Kobayashi *et al*, 2008, há referência à criação de uma cavidade no granito com 47 mm de profundidade e 15 mm de diâmetro máximo. O quartzo e SiO_2 são fundidos em pequenas partículas que podem ser removidas com facilidade da cavidade. Algumas conclusões interessantes podem ser destacadas neste experimento, por exemplo:

- A alta taxa de absorção de energia do laser de CO_2 pela água, chegando a produzir bolhas de vapor com elevadas temperaturas. O comprimento destas bolhas depende em grande parte da posição do foco do laser, quanto mais profundo o foco do laser dentro da água, mais profundo pode o laser se propagar através das bolhas induzidas.
- A irradiação do laser de CO_2 , que possui um comprimento de onda altamente absorvível pela água, provoca a geração de bolhas e, através destas bolhas, atinge a amostra, mesmo em águas opacas.
- As cinzas geradas durante o processo de irradiação pelo laser de CO_2 , nas experiências com a amostra dentro da água, são ejetadas durante o processo de irradiação.
- A pressão de colapso das bolhas induzidas causa a ejeção das cinzas para fora do furo criado no granito. Este processo de remoção evita que o material se solidifique dentro do furo.

2.5. Teste de Dispositivos com Movimento Circular

Outro trabalho analisado durante a pesquisa bibliográfica, que apresenta uma série de conclusões interessantes, e se assemelha a linha de ação da presente dissertação, foi apresentado por Zhiyue Xu *et al*, 2003. Nesse trabalho foi desenvolvido um teste de bancada com o objetivo de observar o comportamento da incidência da energia radiante de um laser de CO₂ e realizar um furo de 5,0 cm a 12,0 cm de profundidade com o laser atuando no modo pulsado sobre amostra de rocha. Acrescentando a particularidade do movimento relativo de aproximação laser/amostra.

A primeira observação reportada na experiência foi o aumento da permeabilidade da rocha sob a ação da energia incidente do laser. Segundo os autores, foi observado um aumento de permeabilidade entre 500 e 1.000% no arenito *Berea Gray*. Este aumento de permeabilidade é atribuído à formação de microfraturas devido à desidratação da argila presente na amostra e ao processo de fragmentação térmica.

O primeiro dispositivo consistia de um laser com um feixe de luz fixo de 25,4 mm de diâmetro não-focalizado, com a presença de dois tubos posicionados simetricamente a 65°, para injeção de gás para promover a limpeza do furo produzido. A ponteira do laser podia ser movimentada para baixo, com a finalidade de compensar a distância ao fundo do furo, à medida que o furo se aprofundava. No entanto, a distância possível de aprofundamento da ponteira era limitada pelos tubos injetores de gás e pela própria ponteira do laser. Neste primeiro experimento, um raio de laser de 25,4 mm não focado foi apontado para uma amostra de folhelho de 76,2 mm espessura por 76,2 mm de diâmetro. O laser de CO₂ possuía uma potência de 4000 W. Um fluxo de nitrogênio de 5663 litros por hora foi utilizado, para limpeza do furo, em cada um dos tubos posicionados a 65°.

O segundo dispositivo possuía uma base que proporcionava um giro circular à amostra de rocha, enquanto que o raio laser e um tubo de limpeza se encontravam em um posição vertical ortogonalmente à amostra. Como o feixe de luz era direcionado fora do centro geométrico da amostra, este sistema proporcionava um movimento circular relativo do raio não-focado de 12,7 mm

sobre a amostra. Sendo o diâmetro do raio de 12,7 mm propriamente, isto construía um furo de 25,4 mm de diâmetro após uma revolução completa. O tubo de limpeza realizava um movimento circular, juntamente com o raio laser, e era movimentado para baixo após cada revolução completada, de modo a fornecer uma pressão de limpeza adequada no fundo do furo à medida que o furo era aprofundado. Neste experimento utilizou-se uma potência de 4000 W e uma vazão de nitrogênio para limpeza de 8495 litros por hora. A ponteira do laser era movimentada para baixo em 12,7 mm entre cada disparo do laser, onde se entenda por disparo do laser, como sendo a ação da radiação do laser aplicada durante uma revolução completa da ponteira. Em resumo, o movimento axial da ponteira e, por consequência, a progressão do furo, acontecia a uma taxa de 127,0 cm por minuto ou o equivalente a uma taxa de 76,2 metros por hora.

O terceiro dispositivo consistia de uma amostra de rocha presa em um torno mecânico, de modo que, a amostra podia girar em torno de seu próprio eixo que se encontrava na posição horizontal. Com um raio de 12,7 mm de diâmetro e um tubo de limpeza de 3,175 mm de polegada posicionado a 0,6 cm de distância do eixo da amostra e mantido estacionário em cada ciclo. Para manter constante a distância ao fundo do furo, após cada ciclo era feito um ajuste com a aproximação da ponteira do laser e do tubo de limpeza.

Algumas lições aprendidas foram relatadas pelos autores:

No primeiro dispositivo foram utilizados quatro disparos com duração de quatro segundos, sendo aplicados no centro da amostra.

1 - Este dispositivo simples funcionou bem para um furo raso de, cerca de, 76 mm. A pressão do gás utilizado para limpeza foi suficiente para remover qualquer traço de material fundido nesta geometria de furo (25,4 mm de diâmetro, a mesma dimensão do raio e uma profundidade de furo de 76 mm).

2 - As nuvens de material pulverizado dificultaram a atuação do raio do laser, reduzindo a energia que efetivamente chegou até a superfície da amostra. Na situação mais crítica, o material pulverizado atingiu as lentes de focalização do laser, causando danos.

3 - O gás injetado pelos tubos de limpeza não foi suficiente para remover o material fundido durante o quarto disparo do laser, provavelmente, devido à impossibilidade do jato de gás atingir o fundo do furo com a energia necessária para realizar o trabalho. Um dispositivo que possua jatos que impeçam o material

pulverizado de danificar a lente de focalização e tenha condições de remover todo o material do fundo do furo é o mais indicado.

O segundo dispositivo apresentou duas significativas vantagens sobre o dispositivo fixo:

1 – O tubo de limpeza foi posicionado dentro do furo e possuía ajuste vertical, de modo que, era possível manter uma forte pressão de gás à medida que o furo era aprofundado.

2 – A rocha passou por um resfriamento antes que o raio do laser executasse uma volta completa e retornasse ao ponto inicial. Por essa razão, o processo de fusão do material no fundo do furo, que contribui para reduzir o rendimento do processo de construção do furo foi minimizado.

O terceiro dispositivo utilizou uma potência de 4000 W e uma baixa velocidade angular de 3,0 graus por minuto. Com esta configuração, um raio intenso de laser causou a fusão da rocha e formou uma camada vitrificada que permaneceu no furo. Com o aumento da velocidade angular conseguiu-se uma redução na quantidade de material fundido. As condições consideradas ótimas no desempenho de construção do furo foram atingidas com uma potência de 2500 W e uma velocidade angular de 10,0 graus/minuto. Com estes parâmetros, foi possível obter um furo limpo sem a presença de material fundido. Isto comprova que não é necessariamente a potência mais elevada que apresentará um melhor desempenho. Estes parâmetros otimizados foram utilizados para produzir um furo mais profundo em uma amostra de arenito. Um raio laser com 12,7 mm de diâmetro com um deslocamento de 6,35 mm, em relação ao centro da amostra, produziu um furo com 25,4 mm de diâmetro. A profundidade do furo alcançou 83,8 mm, após 45 segundos de exposição. No entanto, o furo apresentou um afunilamento, iniciando com 25,4 mm e terminando com 12,7 mm. Este resultado é consequência da atenuação do raio devido ao aparecimento de efeitos secundários, segundo Z. Xu *et al*, 2003.

Para se obter melhor resultado na construção de furos mais profundos será necessário projetar um sistema de limpeza mais eficiente e substituir o raio laser desfocado por um sistema colimado, de feixe paralelo. Dessa maneira, a distância da ponteira do laser até a amostra não teria interferência sobre o foco da luz incidente.

As conclusões finais mostram que os três dispositivos foram eficazes na realização de um furo, muito embora, atingindo diferentes profundidades. A profundidade final variou entre 76,2 mm e 127 mm. Este valor foi obtido em função do dispositivo utilizado, que tinha por limitação o método de limpeza do furo. A intensidade do raio, por um lado, perdia intensidade por atenuação, em razão da distância laser/amostra. Por outro lado, a intensidade excessiva provocava o derretimento da rocha com a formação de camadas vitrificadas que reduziam a eficiência na construção do furo.

A combinação de uma luz convergente do laser e um sistema de limpeza com limitações provocou o afunilamento do furo o que implicou na limitação da profundidade que o furo pode atingir. Por sua vez, as dimensões relativamente pequenas da amostra contribuíram para o aparecimento de rachaduras causadas por efeitos térmicos. Assim sendo, recomenda-se a utilização de amostras com dimensões maiores, algo em torno de 300 mm de aresta para uma amostra em forma de cubo. Para finalizar, os dados obtidos apontam para a necessidade de lasers com o raio de luz colimado e um sistema de limpeza de resíduos com maior eficiência.

A Tabela 7 apresenta um resumo dos principais trabalhos pesquisados na revisão bibliográfica, e traz breves comentários sobre os pontos mais relevantes encontrados. A revisão serviu de base para a elaboração do teste de bancada e contribuiu, no sentido de formar a convicção sobre a necessidade de aprofundar as pesquisas sobre os efeitos da absorção da luz incidente do laser pelos fluidos utilizados na perfuração. Sendo estes dois assuntos: a análise de absorção da luz pelos fluidos utilizados na perfuração e o teste de bancada os pontos principais da presente dissertação.

Tabela 7: Resumo dos principais textos da revisão bibliográfica.

Referência Bibliográfica	Ano	Assunto	Comentários
Gahan <i>et al</i>	2001	<i>Laser Drilling: Determination of Energy Required to Remove Rock</i>	O processo de fragmentação, comparando a energia específica obtida no processo por descamação e por fusão da rocha.
Valente <i>et al</i>	2012	<i>Drilling Granite and Travertine with CO₂ Laser</i>	Valores de energia específica obtidos para o mármore Travertino e granito com a utilização do laser de CO ₂ .
Batarseh <i>et al</i>	2001	<i>Application of Laser Technology in the Oil and Gas Industry</i>	A interação do laser com a rocha e uma explanação sobre as propriedades da rocha que interferem no processo.
Kobayashi <i>et al</i>	2008	<i>Underwater Laser Drilling: Drilling Underwater Granite by CO₂ Laser</i>	A utilização do laser de CO ₂ na fragmentação de rochas submersas na água e água com baritina.
Jain <i>et al</i>	2010	<i>Development of Underwater Laser Cutting Technique</i>	Teste de corte do aço submerso em água com uso do laser.
Xu <i>et al</i>		<i>Two-dimensional Modeling of Laser Spallation of Rocks</i>	Modelo bi-dimensional para a simulação do processo de descamação de arenito.
Xu <i>et al</i>	2003	<i>Applications of High Powered Lasers to Perforated Completions</i>	Testes com dispositivos rotativos em amostras de rocha carbonática e arenito.
Graves <i>et al</i>	2002	<i>Comparison of Specific Energy Between Drilling with High Power Lasers</i>	A energia específica, segundo vários autores, e uma comparação dos valores obtidos entre diferentes métodos.
Amaro <i>et al</i>	2012	<i>Hard Rock Drilling Performance</i>	Perfuração em rochas duras no cenário pré-sal da Bacia de Santos.

3 Tecnologias Convencionais

No campo das tecnologias convencionais, já é possível observar uma gradual evolução no desempenho, no que se refere às taxas de penetração e nos custos métricos das brocas utilizadas, sendo importante mencionar a melhoria no gerenciamento dos parâmetros visando à redução das vibrações inerentes ao processo de perfuração. Dentro do contexto da melhoria de desempenho, o controle e a mitigação dos efeitos da vibração na coluna e perfuração vêm recebendo uma atenção especial quando se trata da perfuração de rochas duras. Dispositivos específicos para a mitigação da vibração vêm sendo testados, obtendo resultados que ainda se encontram sob análise para a adequação ao cenário mais indicado.

3.1. Composições de Fundo

As composições de fundo, também conhecidas no jargão da indústria de construção de poço como BHA (*Bottom Hole Assembly*), são compostas por equipamentos que visam transmitir à broca de perfuração, através dos parâmetros de perfuração, a energia necessária para fragmentar a rocha. Além desta função elementar, alguns componentes do BHA têm a função de realizar o controle da trajetória, adquirir dados sobre a posição e condições do poço e sobre as propriedades das formações atravessadas. Por essa razão, qualquer projeto de BHA, visando prolongar a vida útil desses equipamentos, deve contemplar a mitigação dos efeitos das vibrações induzidas durante o processo de perfuração. As vibrações, além de reduzir a energia disponível para a fragmentação da rocha, contribuem negativamente, ao acelerar os mecanismos de fadiga da coluna e, também, reduzem a vida útil das ferramentas ao induzirem o surgimento de falhas mecânicas e eletrônicas nos equipamento de MWD/LWD (*Measuring While*

Drilling e Logging While Drilling) e em outros componentes do sistema de perfuração.

As composições mais utilizadas para a perfuração de rochas duras são explicitadas a seguir, e são referenciadas como sistemas de perfuração, pois são constituídas por uma ferramenta defletora para controlar a trajetória do poço e por um determinado tipo de broca de perfuração. Este conjunto, BHA e broca, para que atinja o seu máximo desempenho, deve possuir um elevado nível de integração entre os seus componentes, de maneira que o máximo da energia mecânica seja transmitido para a broca.

3.1.1. BHA Estabilizado

Composição de fundo utilizada para a perfuração com broca tricônica e broca com cortadores de PDC (*Polycrystalline Diamond Compact* – pastilhas de diamante sintético dispostas de maneira balanceada na face de ataque da broca). Sendo que, na opção por broca tricônica é necessário adicionar um maior número de comandos (equipamento utilizado para permitir a aplicação de maior peso sobre a broca), em razão da maior necessidade de peso disponível para ser aplicado sobre a broca tricônica.

3.1.2. BHA com Motor de Fundo de Alto Torque

A opção pela utilização de motor de fundo de alto torque é recomendada quando se utiliza a broca tricônica, devido ao fato de que a menor rotação provida pelo motor de alto torque, não afeta, significativamente, a vida útil dos rolamentos da broca. Em relação à broca com cortadores de PDC, o motor de alto torque, também, é indicado. Neste caso, devido à demanda de torque necessária para conferir rendimento a este tipo de broca. Quanto maior a agressividade da estrutura de corte, que está relacionada ao diâmetro dos cortadores e ao número de lâminas, maior é o torque necessário a ser transferido à broca pelo sistema de perfuração.

3.1.3. BHA com Motor de Fundo de Alta Velocidade

O motor de alta velocidade tem uma aplicação na perfuração de rochas duras quando associado com a utilização de brocas impregnadas. Este tipo de broca possui diamantes sintéticos adicionados a uma matriz metálica. Este sistema de perfuração tem como mecanismo de avanço o esmerilhamento da rocha. A alta velocidade do motor é necessária para conferir rendimento ao sistema.

3.1.4. BHA com Turbina

O sistema composto por turbina e broca impregnada tem tido a preferência dos especialistas para a perfuração de rochas duras, em razão da alta confiabilidade do sistema. As principais razões para a alta durabilidade são: a turbina, por não ter partes com elastômeros e as brocas impregnadas, por não possuírem partes móveis, podem permanecer operando por longos períodos, com altas temperaturas de fundo de poço e desgastes reduzidos, atingindo tempos de residência no fundo do poço (TBF - tempo de broca fundo) maiores que 400 horas.

3.1.5. BHA com *Rotary Steerable*

As composições de fundo com *rotary steerable* (ferramentas defletoras que permitem o direcionamento do poço com a coluna girando continuamente) são indicadas quando é essencial manter a trajetória do poço sob rigoroso controle, notadamente em poços direcionais e horizontais ou em poços verticais quando é crítico o controle de verticalidade. Nestes casos as brocas mais indicadas, também, são as do tipo PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*), basicamente, em razão da maior durabilidade da broca e da facilidade de controle da trajetória do sistema PDC/*rotary steerable*.

3.1.6. BHA com Sistemas de Verticalização Contínua

Os sistemas de verticalização contínua consistem em ferramentas programadas para manter a verticalidade automaticamente. Tanto podem ser um *rotary steerable* configurado para esta função específica, como um motor de alto torque com um sistema de atuadores junto à parede do poço que traz o poço para a vertical assim que o menor desvio é detectado. As brocas utilizadas podem ser do tipo PDC ou tricônicas. Os fatores utilizados na escolha do tipo de broca são: o comprimento do intervalo a ser perfurado, o custo da broca e a dirigibilidade requerida para manter a trajetória do poço.

3.2. Efeitos da Vibração sobre o Sistema de Perfuração

A vibração é medida por acelerômetros segundo os três eixos cartesianos, e o seu efeito sobre o desempenho no processo de perfuração acontece sob dois aspectos principais: a diminuição da energia que é colocada à disposição da broca para fragmentar a rocha e pela indução de falhas mecânicas e eletrônicas nos componentes da composição de fundo (BHA – *Bottom Hole Assembly*).

A indústria do petróleo tem procurado enfrentar a questão da vibração de várias maneiras: utilizando componentes que reduzam o atrito nas paredes do poço, como *roller reamers*, e desenvolvendo ferramentas com a finalidade específica de mitigar o fenômeno da vibração, em especial à vibração torsional (*stick&slip*). Algumas destas ferramentas vêm sendo testadas com sucesso. As Figuras 7 e 8 mostram a comparação entre dois poços, onde foi medido o efeito da vibração torsional. É possível constatar na Figura 8 a melhoria dos níveis de *stick&slip* em um poço direcional. Na escala de cor à esquerda do gráfico, a cor verde e a cor amarela representam os níveis aceitáveis de vibração. Enquanto que, a cor vermelha e a vermelho-escura representam os níveis críticos de vibração torsional. Os parâmetros de perfuração interferem, diretamente, no desempenho da taxa de penetração e, também, afetam intensamente os níveis de vibração. Por esta razão, os componentes suscetíveis às falhas eletrônicas do BHA possuem sensores para medir estes níveis. No caso de vibração excessiva, a primeira ação

recomendada é uma alteração de parâmetros, de forma a diminuir o nível de vibração, sem comprometer em demasia a taxa de penetração.

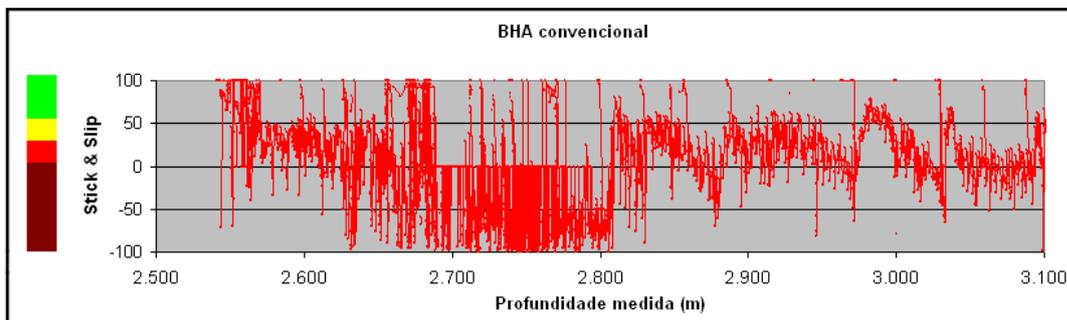


Figura 7: BHA sem ferramenta para mitigar vibração.

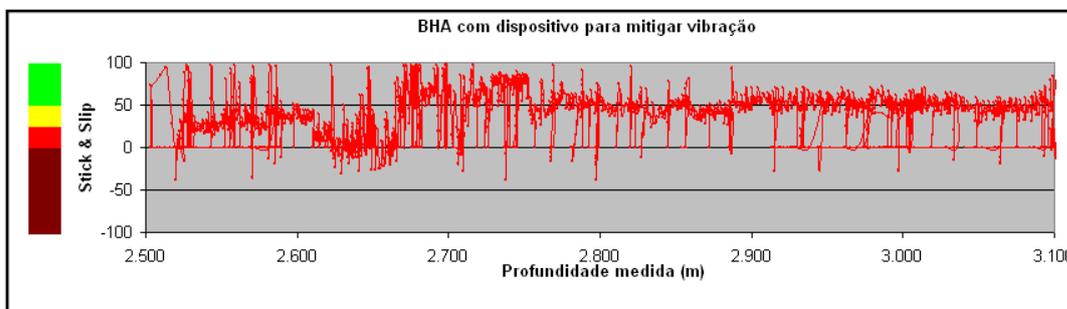


Figura 8: BHA com ferramenta para mitigar a vibração torsional.

Fonte: Amaro *et al.*, 2012.

Outro ponto crítico é a seleção do sistema de perfuração. Este sistema que é formado pela composição de fundo e tipo de broca de perfuração requer um projeto específico. Isto requer uma análise aprofundada dos poços de correlação e dos perfis que identificam a composição litológica presente na locação. Com este procedimento será possível identificar o sistema mais adequado ao tipo de rocha que se espera perfurar. Vários tipos de brocas estão disponíveis para a perfuração de rochas e, basicamente, podem ser classificadas por categorias como, por exemplo:

- Brocas de cortadores móveis, as tricônicas;
- Brocas de cortadores fixos, PDC e impregnadas;
- Brocas híbridas, àquelas que de alguma maneira fazem uma composição entre os tipos anteriores.

Outro aspecto de suma importância no processo de perfuração é o fluido de perfuração utilizado, principalmente no que se refere ao processo de interação

com a rocha e com os componentes do sistema de perfuração, onde os aspectos de lubricidade e capacidade de carregamento (transporte dos fragmentos de rocha) são fundamentais para a eficiência do processo de perfuração.

3.3. Brocas Utilizadas no Cenário de Rochas Duras

As rochas presentes no cenário pré-sal apresentam valores de resistência compressiva características de rochas médias e duras. Além da presença, já comprovada em testemunhos, de nódulos de sílica de dimensões e de distribuição aleatória na matriz da rocha carbonática.

As Figuras 9 e 10 apresentam as brocas que vêm sendo mais utilizadas neste cenário. Nessas figuras, é possível observar as características de desgaste das brocas, após o trabalho de perfuração.



Figura 9: Desgaste nas brocas PDC nos carbonatos.



Figura 10: Desgaste nas brocas impregnadas nos carbonatos.

Fonte: Amaro *et al.*, 2012.

Na Figura 11, é mostrada a distribuição dos tipos de sistema de perfuração e suas respectivas taxas médias de penetração (ROP). As taxas médias de perfuração, indicadas no gráfico, foram obtidas nas rochas carbonáticas, objeto dessa amostragem.

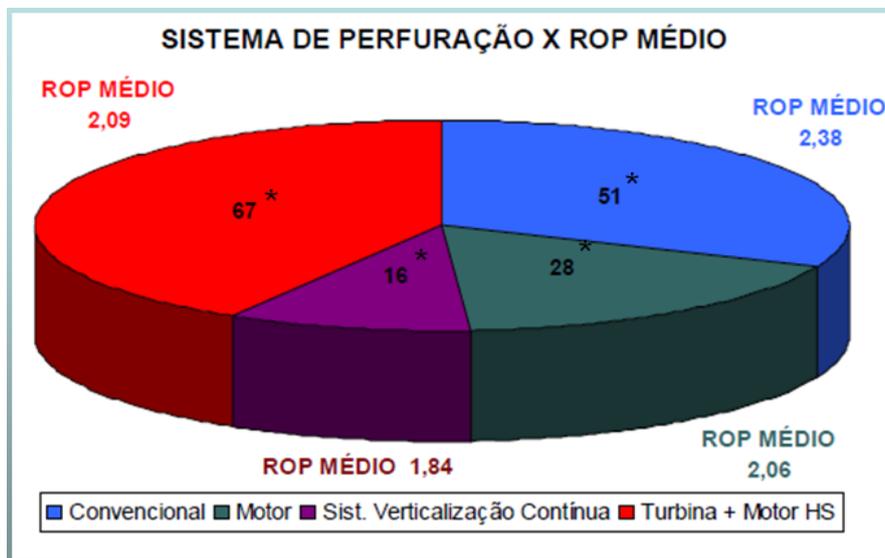


Figura 11: Número de corridas dos sistemas de perfuração.

3.4. Sistemas de Perfuração para Rochas Duras

A perfuração no cenário pré-sal se apresenta como um cenário desafiador e, principalmente, por esta característica é onde se espera que se desenvolvam as principais tecnologias inovadoras nos sistemas de perfuração e brocas nos próximos anos. Após um razoável número de poços perfurados nesse cenário, foi possível observar uma evolução nas taxas de penetração no intervalo do sal, entretanto, nas rochas carbonáticas, que constituem o reservatório de óleo, o desafio permanece. As taxas, em torno de 2 a 3 metros por hora, mostram a dimensão do desafio de perfurar nesse ambiente e, ao mesmo tempo, indicam onde tecnologias inovadoras, que aumentem a confiabilidade e o nível de desempenho dos sistemas de perfuração, encontrarão um vasto espaço para se desenvolver.

3.5. Geração de Energia para os Equipamentos do BHA

Os sistemas modulares que geram energia elétrica para os diversos componentes de MWD/LWD (*Measuring While Drilling e Logging While Drilling*) que integram o sistema de perfuração atingem potências, em torno de, 1000 W. Estes módulos de geração de energia podem ser combinados e o seu acionamento ocorre através da passagem do fluido de perfuração que aciona uma turbina. Os futuros sistemas a laser poderão utilizar um recurso semelhante para geração de energia no interior do BHA (*Bottom Hole Assembly*), evitando assim, a transmissão de energia elétrica ao longo da coluna de perfuração.

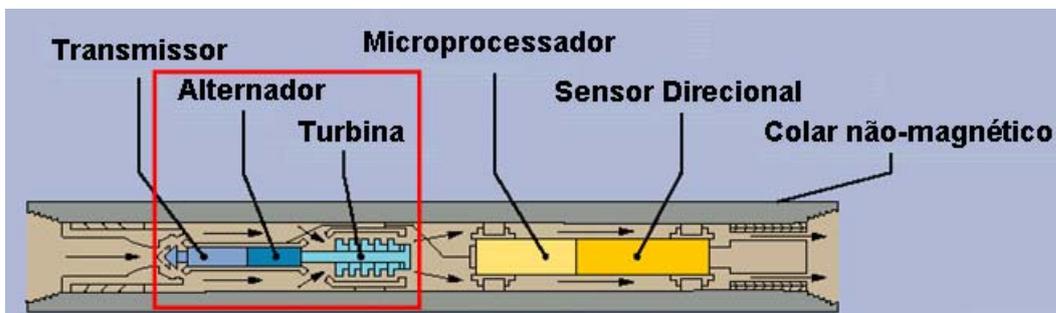


Figura 12: Sistema de geração de energia elétrica no BHA.

O aspecto relevante dos sistemas geradores de energia para os atuais equipamentos que compõem o BHA é a sua alta confiabilidade, possuem um tempo médio entre falhas superior a 400 horas.

4 Laser

A utilização do laser de alta energia passou a despertar o interesse dos pesquisadores no início dos anos 90, sendo a partir dessa época o aparecimento de vários trabalhos sobre o assunto.

4.1. Conceitos Elementares sobre o Laser

Embasados em uma série de fatos experimentais, tais como, os espectros de emissão de gases como o hidrogênio, foi possível a físicos como Plank e Niels Bohr estabelecer os postulados que buscavam explicar o comportamento dos elétrons ao redor do núcleo, que ficaram conhecidos como os postulados de Niels Bohr.

Os elétrons giram ao redor do núcleo do átomo em trajetórias específicas e não existe emissão de energia caso se mantenha na mesma órbita.

O elétron ao passar de uma órbita para outra, por qualquer razão que seja, absorverá ou emitirá energia, que pode ser calculada pela expressão a seguir:

$$\Delta E = h.f \quad (4.1)$$

Onde: h é constante de Plank e f é a frequência da radiação.

Esta quantidade elementar de energia que é absorvida ou emitida pelo elétron ao mudar de órbita é chamada de fóton. Dessa forma, quando o elétron, que gira em torno do núcleo do seu átomo, salta de uma órbita externa para uma órbita interna, há a emissão de um fóton de energia. Ao passo que, se o salto ocorrer da órbita mais interna para outra mais externa, o átomo absorverá energia. Esta alteração de órbita é denominada de transição eletrônica.

Os espectros de emissão obtidos em experimentos onde um gás, como o hidrogênio, é submetido à corrente elétrica, através da colocação de eletrodos com diferença de potencial em ampolas contendo o gás a baixa pressão, apresentam linhas claras e espaçadas. Estas linhas são o resultado da decomposição da luz proveniente da ampola de gás e mostram que essa luz é composta apenas de determinados comprimentos de onda. Por esta razão, é chamado de espectro discreto, diferente do espectro contínuo que é o resultado da decomposição da luz branca. Neste experimento, quando um gás a baixa pressão é submetido à alta voltagem através de eletrodos, há emissão de elétrons do catodo (pólo negativo) que são acelerados para o anodo (polo positivo). Durante este trajeto, ocorrem colisões entre os elétrons livres e os elétrons presentes nos átomos deste gás, normalmente, o hidrogênio. Nestes choques, o elétron livre transmite energia ao elétron do átomo de hidrogênio, que adquirindo maior energia, salta para uma órbita mais externa. Entretanto, nessa nova órbita mais externa, o elétron, energizado pelo impacto, se encontra em uma situação de instabilidade. Após certo tempo, o elétron retornará a sua órbita original. Este processo de retorno ao seu nível original, mais estável, acarretará a emissão de um fóton, que é a radiação observada no anteparo durante a experiência. Não há apenas uma única órbita externa à qual o elétron pode ir após o choque com o elétron emitido pelo catodo. Várias órbitas são possíveis e a posição exata da órbita dependerá da intensidade do choque. Quanto mais externa for a órbita, maior energia terá o elétron quando nela estiver. Portanto, quando o elétron retornar ao seu estado inicial, teremos radiações com diferentes energias, com diferentes comprimentos de onda, como é observado no espectro do hidrogênio. O elétron estando na órbita mais próxima do núcleo está no seu estado fundamental. Caso esteja nas órbitas mais afastadas, o elétron estará em um de seus estados excitados. Cada órbita corresponde a um nível de energia, o chamado nível energético, ao qual se atribui um número inteiro, o chamado número quântico principal.

Além do processo de absorção de um fóton pelo sistema atômico, causando a transferência do elétron de um nível de mais baixa energia para um nível de mais alta energia, também foi descrito o processo de emissão espontânea de um fóton pelo sistema atômico, causando a transferência do elétron para um nível de mais baixa energia. Existe um terceiro processo, fundamental para o entendimento do funcionamento do laser, que é a emissão estimulada.

A emissão estimulada ocorre nos elétrons que se encontram no estado excitado e, devido a esta instabilidade, tenderão a saltar para o nível de menor energia. No entanto, este processo é relativamente demorado para acontecer. Porém, é um processo que pode ser acelerado por um fator externo. Este fator externo acelerador do processo é um fóton. Dessa forma, um fóton externo estimula o decaimento do elétron que se encontra no estado excitado e este, ao saltar para a órbita de mais baixa energia, emite um fóton que emerge do sistema juntamente com o fóton que provocou a transição, com a mesma energia e propagando-se na mesma direção. Nessa condição, os fótons estão em fase. Os fótons, resultantes do processo de emissão estimulada, vão agir sobre outros átomos com elétrons em seus estados excitados, causando a emissão de mais fótons originados nas mesmas condições.

Assim, a luz do laser provém da emissão que ocorre quando elétrons decaem de seus níveis energéticos de forma estimulada, produzindo uma luz, onde os fótons têm as mesmas características. Os fótons oriundos deste processo são direcionados novamente para o sistema através de espelhos. O fóton liberado por qualquer átomo tem um determinado comprimento de onda que depende da diferença de energia entre o estado excitado e o estado fundamental. Se esse fóton (que possui uma determinada energia e fase) encontrar outro átomo com um elétron em estado excitado idêntico, a emissão estimulada pode ocorrer. O primeiro fóton pode estimular ou induzir emissão atômica de tal maneira que o fóton emitido como consequência (a partir do segundo átomo) vibrará na mesma frequência e direção que o fóton recebido. Um par de espelhos, um em cada extremidade do meio gerador, é outro detalhe construtivo importante do laser. Os fótons, com um mesmo comprimento de onda e fase, refletem-se nos espelhos para viajar de um lado a outro do material gerador de laser. No processo, eles estimulam outros elétrons a fazer a emissão de mais fótons de igual comprimento de onda e fase. Um efeito dominó acontece e logo se terão propagado muitos e muitos fótons de mesmo comprimento de onda e fase. O espelho em uma das extremidades do laser é semi-prateado, o que significa que ele reflete uma parte da luz e permite a passagem de outra parte. Essa parte da luz que consegue passar é a luz laser.

A luz liberada é monocromática. Ela contém um comprimento de onda específico de luz (uma cor específica). O comprimento de onda de luz é

determinado pela quantidade de energia liberada quando o elétron vai para uma órbita menor.

A luz liberada é coerente, cada fóton se move juntamente com os outros. Isso significa que todos os fótons têm frentes de onda que são iniciadas em uníssono. A luz é bem direcionada e tem um feixe muito estreito e concentrado.

4.2. Tipos de Laser

Existem vários tipos de laser. O material gerador do laser pode ser sólido, gasoso, líquido ou semiconductor. Normalmente, o laser é designado pelo tipo de material empregado na sua geração:

4.2.1. Laser de CO₂

O laser a dióxido de carbono opera com um comprimento de onda de 10,6 μm , tanto no modo contínuo (CW) como no modo pulsado repetitivo (RP). A sua potência média pode atingir um mega watt (MW) (Roberts, 1985; Nanri *et al.*,1997). No modo pulsado, o seu intervalo de pulso pode variar de 1 a 30 segundos. Lasers de CO₂ emitem energia no infravermelho com comprimento de onda longo e são utilizados para cortar materiais resistentes. Uma vantagem importante do laser de CO₂ é a sua durabilidade e confiabilidade. Porém, devido ao seu grande comprimento de onda, há uma grande atenuação ao ser transmitido em fibras óticas ou através da água.

4.2.2. Laser de CO

O laser a monóxido de carbono opera em um comprimento de onda de 5 a 6 μm , e, também, pode operar nos modos contínuo (CW) e pulsado (RP). A sua potência média atinge valores entre 100 e 200 kW (Ionin, 1993, 1996; Hilton *et al.*,1996), sendo que, o comprimento de pulso pode variar de 1 até 1000 segundos.

Um comprimento de onda menor é importante, pois o material fundido pelo laser é reduzido à medida que o comprimento de onda seja menor.

4.2.3. HF (DF) Laser

Lasers que operam com fluoreto de hidrogênio e fluoreto de deutério possuem um comprimento de onda entre 2,6 μm e 4,2 μm , este é o caso do *Mid-Infrared Advanced Chemical Laser* (MIRACL). Este laser opera no modo contínuo (CW) e a sua potência de saída atinge 1000 kW (Albertine, 1993; Davis *et al.*, 1995).

COIL laser. O *Chemical Oxygen Iodine Laser* (COIL) opera em um comprimento de onda de 1,315 μm , e o seu modo de operação é tanto o modo contínuo (CW) como o modo pulsado (RP), sendo que a potência pode atingir 100 kW.

4.2.4. Laser de Estado Sólido

Este tipo possui material de geração distribuído em uma matriz sólida (como o laser de rubi ou o laser Yag de neodímio: ítrio-alumínio-granada). O laser neodímio-Yag emite luz infravermelha a 1.064 nanômetros (nm).

4.2.5. Laser Excimer

O nome 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.

4.2.6. Laser de Corante

Este tipo utiliza corantes orgânicos complexos para material de geração do laser, tais como, a rodamina 6G, em solução líquida ou suspensão. Estes lasers podem ser ajustados em uma ampla faixa de comprimentos de onda.

4.2.7. Laser a Fibra

O laser de estado sólido ou o laser amplificado eletronicamente, como o laser a diodo, onde a luz é guiada e refletida internamente em uma fibra ótica mono modo é chamado de laser a fibra.

4.3. Classificação dos Tipos de Laser

Os lasers são classificados em quatro grandes áreas, conforme seu potencial de provocar danos biológicos. Todo laser deve portar um rótulo com uma das quatro classes descritas abaixo.

Classe I - esses lasers não emitem radiação com níveis reconhecidamente perigosos.

Classe I.A. - essa é uma designação especial aplicada somente aos lasers que "não devem ser vistos", tais como a leitora de preços a laser de um supermercado. O limite superior de energia da Classe I.A. é de 4 mW.

Classe II - esses são lasers visíveis de baixa energia que emitem acima dos níveis da Classe I, mas com uma energia radiante que não ultrapasse 1 mW. A ideia é que a reação de aversão à luz brilhante inata nos seres humanos irá proteger a pessoa.

Classe IIIA - esses são lasers de energia intermediária (contínuos: 1-5 mW) e são perigosos somente quando olhamos na direção do raio. A maioria dos apontadores a lasers se encaixa nesta classe.

Classe IIIB - são os lasers de energia moderada.

Classe IV - composta pelos lasers de alta energia (contínuos: 500 mW, pulsados: 10 J/cm² ou o limite de reflexão difusa). São perigosos para a visão em qualquer circunstância (diretamente ou espalhados difusamente) e apresentam provável risco de incêndio e risco à pele. Medidas significativas de controle são requeridas em instalações que contêm laser Classe IV.

4.4. Laser de Alta Potência

A palavra laser é derivada do termo proveniente da língua inglesa “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”. Embora seja, algumas vezes, utilizada com o significado de luz amplificada, a sua melhor definição é a de um transdutor que converte uma forma de energia (elétrica, química, calor) em fótons (radiação eletromagnética) (Weller, 1984). O termo alta potência está relacionado aos lasers com potência acima de 1 kW. A luz emitida pela fonte de laser possui várias características que a distinguem de outras fontes de luz. É essencialmente monocromática (frequência única), coerente (todas as ondas de luz estão em fase) e colimada (feixe de luz paralelo) com um ângulo de divergência entre 10⁻² a 10⁻⁴ (W/cm².nm) radianos. O elevado paralelismo do feixe previne o espalhamento da intensidade da luz durante a sua trajetória. Em razão destas características, o raio do laser pode ser focalizado com instrumentos óticos para uma área bem definida. O comprimento de onda é uma função do tipo do laser, do seu meio ativo, e varia de 0,1 μm até 103 μm, passando pela luz ultravioleta, visível e infravermelho, segundo S. Batarseh *et al*, (2001), como se verifica na Figura 13.

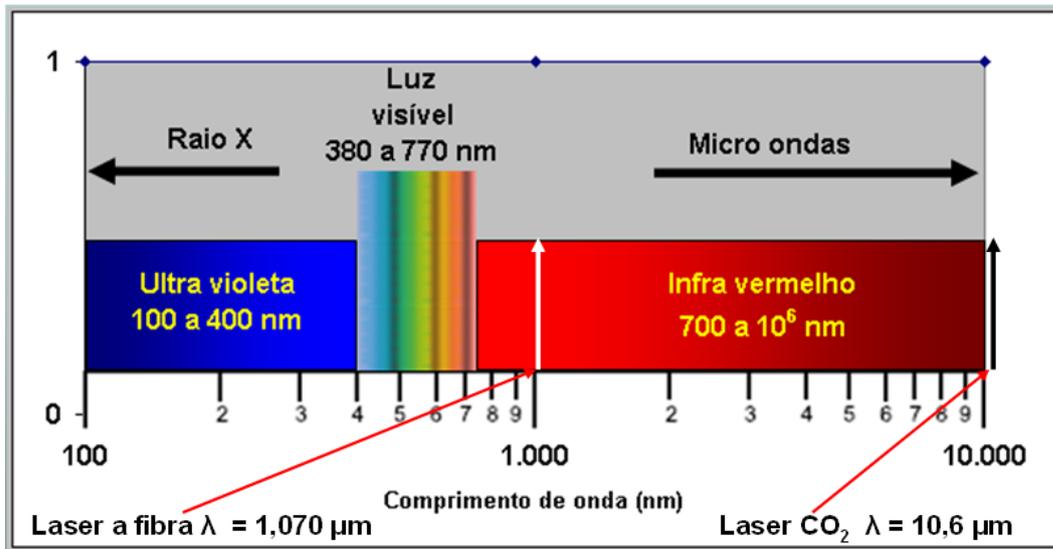


Figura 13: Intervalo óptico do espectro eletromagnético.

Fonte: www.intl-light.com.

Nos anos setenta, vários tipos de lasers foram desenvolvidos. Porém, com baixa potência e com pouca aplicação na indústria. Somente, a partir dos anos oitenta, com o surgimento de lasers com potência mais elevada foram desenvolvidas aplicações industriais.

5 Análise de Absorção Ótica

Para a realização da análise de absorção ótica foram selecionados alguns fluidos de perfuração, mais comumente utilizados na perfuração de um poço de petróleo. O objetivo dessa análise é o de poder melhor avaliar a interação da luz incidente com estes fluidos empregados na indústria da construção de poço.

A análise da interação da radiação do laser com o fluido de perfuração encontra-se em uma fase bastante preliminar. Para avaliar a perda de energia provocada que ocorre devido à passagem da luz através do fluido de perfuração devido aos fenômenos de absorção e espalhamento de luz foram realizados testes de absorção ótica.

O comprimento de onda da emissão do laser a ser utilizado neste estudo para perfuração de rochas carbonáticas é de 1070 nm, com uma largura de banda de 4,8 nm, valores nominais para o mínimo de 1065 nm e para o máximo de 1080 nm. Este comprimento de onda de 1070 nm corresponde a o número de onda de 9346 cm^{-1} . Vislumbrando a possibilidade futura de utilizar outros tipos de laser, em função da eficiência do processo, foram analisadas por espectroscopia quatro amostras de fluido de perfuração no infravermelho próximo (NIR) no intervalo de 14000 a 4500 cm^{-1} (comprimento de onda de 714 a 2222 nm). Por se tratar de fluido de perfuração, como era de se esperar, estas amostras contém elevado teor de sólidos. Estes estudos de absorção foram realizados no CENPES (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras).

A interação da matéria com a energia na região do infravermelho ocorre devido às diferentes transições vibracionais dos compostos presentes em uma matriz, que absorvem energia de ondas eletromagnéticas com a mesma frequência vibracional. A energia envolvida nesses processos é dependente, principalmente, dos átomos constituintes das ligações, da força com que esses átomos estão ligados entre si e do tipo de movimento executado durante a vibração, podendo ser observada em cada uma das três regiões em que se divide o espectro na região do infravermelho:

- Infravermelho distante (FIR, *far infrared*), abrangendo a região de 20 a 400 cm^{-1} , em que são observados os movimentos vibracionais de baixa energia, como os de retículos cristalinos;
- Infravermelho médio (MIR, *mid infrared*), entre 400 e 4000 cm^{-1} , onde se observa a maioria das transições fundamentais de ligações covalentes e onde praticamente todos os grupos funcionais de moléculas orgânicas absorvem; e
- Infravermelho próximo (NIR, *near infrared*), entre 4000 e 12800 cm^{-1} , em que se observam transições harmônicas (sobretons) e de combinações das transições fundamentais normalmente observadas no MIR, em especial aquelas associadas ao movimento de ligações covalentes que apresentem átomo de hidrogênio em sua constituição.

Os espectros de infravermelho médio (MIR) foram obtidos utilizando um espectrômetro com transformada de Fourier da Thermo Fisher, modelo Nicolet 380, equipado com fonte de infravermelho, detector de sulfato de triglicina deuterada (DTGS) e divisor de feixe de KBr, através da média de 32 leituras, com resolução de 4 cm^{-1} e, tendo o espectro do ar ambiente como referência.

Para a aquisição dos espectros na região entre 650 e 4000 cm^{-1} , foi empregado um acessório de refletância total atenuada (ATR - *Smart Golden Gate* da Thermo Fisher) com cristal de diamante de uma reflexão. Os espectros de refletância foram convertidos para transmitância.

As análises no infravermelho próximo (NIR) foram realizadas em duplicata em dois espectrômetros com transformada de Fourier da Thermo Nicolet, modelo Nicolet 6700, equipados com fonte de quartzo-halogênio (luz branca), através da média de 32 espectros com resolução de 4 cm^{-1} por transmissão de luz em célula de fluoreto de cálcio (CaF_2) com 0,2 mm de caminho ótico. Devido à presença de grande quantidade de sólidos nas amostras, foi necessário desmontar a célula para limpeza após cada experimento e medir o caminho ótico depois da montagem para assegurar que as condições experimentais eram mantidas.

Os espectros na região entre 4500 e 10000 cm^{-1} foram adquiridos utilizando detector de seleneto de chumbo (PbSe) e divisor de feixe de CaF_2 , enquanto de 8500 a 14000 cm^{-1} foram empregados um detector de silício (Si) e

divisor de feixe de quartzo. Os resultados de infravermelho estão apresentados em função da energia que chega ao detector na ausência e na presença da amostra.

Quando um feixe de radiação incide sobre uma célula contendo uma solução, vários fenômenos podem ocorrer. O efeito mais significativo ocorre quando parte da radiação é absorvida pelo meio que está sendo analisado e depende da composição química deste meio. Entretanto, este não é o único efeito que pode ser observado. Parte da radiação incidente pode ainda ser refletida, em função do absorvedor ou das diferenças entre o índice de refração do meio onde a radiação se propaga e do meio que está sendo analisado (inclusive pelas paredes da célula onde é analisada), enquanto que outra parte poderá ser simplesmente espalhada, caso o meio não seja transparente e homogêneo. Um aspecto extremamente importante, é que todos estes efeitos associados à intensidade de radiação estão relacionados entre si por uma expressão linear descrita pela equação 5.1:

$$I_o = I_r + I_e + I_a + I_t \quad (5.1)$$

Onde:

I_o = Intensidade do feixe incidente,

I_r = Intensidade do feixe refletido, resultado das diferenças do índice de refração entre o absorvedor e o ambiente,

I_e = Intensidade do feixe espalhado, resultado de um meio não homogêneo (suspensão) e/ou de flutuações térmicas,

I_a = Intensidade do feixe absorvido pelo meio,

I_t = Intensidade do feixe transmitido.

Em medidas analíticas convencionais, o efeito de reflexão da radiação eletromagnética, I_r , pode ser minimizado com o uso de medidas relativas e de células com paredes homogêneas de pequena espessura e de faces paralelas. Em soluções homogêneas e transparentes a intensidade de radiação espalhada pode ser considerada desprezível. As medidas espectrofotométricas usuais estão geralmente associadas a uma banda de radiação (feixe com vários comprimentos de onda). Conseqüentemente, a intensidade do feixe que é medida após a

passagem pela amostra (intensidade transmitida, I_t) será menor que a intensidade inicial (I_0).

A transmitância (T) exprime a fração da energia luminosa que consegue atravessar uma determinada espessura de um material, sem ser absorvida pelo mesmo; é medida em porcentagem, relativamente à quantidade de energia e comprimento de onda da radiação luminosa incidente. Nos experimentos realizados com as amostras dos fluidos heterogêneas e parcialmente opacas com sólidos em suspensão não é possível medir separadamente as contribuições do espalhamento e absorção de luz, de modo que o resultado espectral expresso como transmitância contém os dois efeitos. Portanto, a razão entre a energia do sinal que chega ao detector passando pela amostra de fluido e a energia do sinal que chega ao detector passando pelo caminho óptico do equipamento contendo ar, multiplicado por 100 define o que se conhece por transmitância, conforme apresentado na equação 5.2.

$$T(\%) = 100 * \frac{\text{Energia que passa pela amostra}}{\text{Energia que passa pelo percurso óptico}} \quad (5.2)$$

Onde: T = transmitância em %

Por sua vez, a absorbância é calculada pela equação 5.3, a partir do valor da transmitância.

$$A = \log\left(\frac{100}{T(\%)}\right) \quad (5.3)$$

Onde: A = absorbância

5.1. Caracterização dos Fluidos de Perfuração Utilizados

Os fluidos de perfuração escolhidos para os testes de absorção ótica foram àqueles mais empregados na indústria de construção de poço. As propriedades físico-químicas e reológicas desses fluidos podem ser observadas nas Tabelas 8, 9, 10 e 11. Também, é apresentada uma breve explanação sobre o intervalo do poço em que cada fluido é utilizado, no jargão da indústria, a fase do poço. Esta fase está relacionada ao diâmetro do poço e, conseqüentemente, ao diâmetro da broca utilizado pelo sistema de perfuração.

5.1.1. Fluido A

A composição básica do fluido A pode ser resumida da seguinte forma: água industrial, goma xantana com a função de viscosificante, polímero catiônico como encapsulante e cloretos de sódio ou potássio como inibidores de inchamento de argilas e baritina como adensante.

Tabela 8: Caracterização do fluido A.

Fluido A								
Massa Específica:		9,5 ppg	(Libras por galão)					
Filtrado API:		2,1 mL						
Reologia:								
Temperatura:		25°C						
Leituras	rpm	θ	γ (s ⁻¹)	τ (Pa)	μ (Pa.s)	μ (cp)	Parâmetros de Bingham	
	600	87	1021,80	44,41	0,04	43,46	Viscosidade Aparente (L600 / 2) em cp	43,5
	300	60	510,90	30,62	0,06	59,94	Viscosidade Plástica (L600 - L300) em cp	27
	200	49	340,60	25,01	0,07	73,43	Limite de escoamento (L300 - Viscosidade Plástica) em cp	33
	100	34	170,30	17,35	0,10	101,90	Limite de escoamento em Lbf/100.pé ²	
	6	9	10,22	4,59	0,45	449,56		
	3	7	5,11	3,57	0,70	699,32		
	G'	8			4,08			
G''	10			5,10				

O fluido caracterizado na Tabela 8 é mais utilizado nas fases iniciais de um poço. Normalmente as fases iniciais são de grande diâmetro, sendo os diâmetros mais comuns em torno de: 26", 17 ½" e 16".

5.1.2. Fluido B1

O fluido B1 possui como componentes básicos: n-parafina na fase contínua e solução de NaCl para a fase emulsionada, sendo o emulsificante uma mistura de ácidos graxos e baritina como adensante.

Tabela 9: Caracterização do fluido B1.

Fluido B1								
Massa Específica:	10,2 ppg	(Libras por galão)						
Estabilidade Elétrica:	230 V							
Filtrado HPHT:	1,4 mL							
ROA	62/38	(Razão óleo/água)						
Reologia:								
Temperatura:	65°C							
Leituras	rpm	θ	γ (s ⁻¹)	τ (Pa)	μ (Pa.s)	μ (cp)	Parâmetros de Bingham	
	600	88	1021,80	44,92	0,04	43,96	Viscosidade Aparente (L600 / 2) - cp	44
	300	51	510,90	26,03	0,05	50,95	Viscosidade Plástica (L600 - L300) - cp	37
	200	37	340,60	18,88	0,06	55,45	Limite de escoamento (L300 - Viscosidade Plástica)	14
	100	23	170,30	11,74	0,07	68,93	Limite de escoamento em Lbf/100.pé ²	
	6	9	10,22	4,59	0,45	449,56		
	3	8	5,11	4,08	0,80	799,22		
	G'	17				8,68		
G''	35				17,86			

O fluido apresentado na Tabela 9 tem a sua aplicação em poços verticais exploratórios, onde as suas características aumentam muito o desempenho da perfuração e, em poços direcionais, onde o seu menor fator de fricção contribui para a diminuição do atrito da coluna de perfuração com o poço e, por consequência, contribui para a redução de arrastes e torques durante a construção de intervalos inclinados do poço.

5.1.3. Fluido B2

O fluido B2 é uma particularidade do fluido anterior, onde o adensante é constituído por baritina com partículas micronizadas, com a finalidade de melhorar as propriedades reológicas. Composição básica: n-parafina na fase contínua e solução de NaCl para a fase emulsionada, sendo o emulsificante uma mistura de ácidos graxos e baritina micronizada como adensante. As suas propriedades podem ser vistas na Tabela 10.

Tabela 10: Caracterização do fluido B2

Fluido B2								
Massa Específica:	10,2 ppg	(Libras por galão)						
Estabilidade Elétrica:	230 V							
Filtrado HPHT:	2 mL							
ROA	65/35	(Razão óleo/água)						
Reologia:								
Temperatura:	65°C							
Leituras	rpm	θ	γ (s ⁻¹)	τ (Pa)	μ (Pa.s)	μ (cp)	Parâmetros de Bingham	
	600	34	1021,80	17,35	0,02	16,98	Viscosidade Aparente (L600 / 2) em cp	17
	300	23	510,90	11,74	0,02	22,98	Viscosidade Plástica (L600 - L300) em cp	11
	200	19	340,60	9,70	0,03	28,47	Limite de escoamento (L300 - Viscosidade Plástica) em cp	12
	100	14	170,30	7,15	0,04	41,96	Limite de escoamento em Lbf/100.pé ²	
	6	5	10,22	2,55	0,25	249,76		
	3	4	5,11	2,04	0,40	399,61		
	G'	6			3,06			
	G''	7			3,57			

Da mesma forma que o fluido anterior, este fluido tem aplicação em poços verticais exploratórios e direcionais, especialmente nas situações em as propriedades reológicas sejam um fator primordial para o aumento do desempenho da perfuração, como por exemplo, nos cenários onde haja o requerimento de menores perdas de carga no sistema.

5.1.4. Fluido C

Este é um fluido do tipo *drill-in*, aquele utilizado na perfuração da rocha reservatório. A sua composição constitui-se, basicamente de: água industrial, goma xantana com a função de viscosificante, cloretos de sódio ou potássio como inibidores de inchamento de argilas e carbonato de cálcio como obturante/adensante. As suas propriedades são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Caracterização do fluido C.

Fluido C								
Massa Específica:	9,5 ppg	(Libras por galão)						
Filtrado API:	1,6 mL							
Reologia:								
Temperatura:	25°C							
Leituras	rpm	θ	γ (s ⁻¹)	τ (Pa)	μ (Pa.s)	μ (cp)	Parâmetros de Bingham	
	600	135	1021,80	68,90	0,07	67,43	Viscosidade Aparente (L600 / 2) em cp	67,5
	300	95	510,90	48,49	0,09	94,91	Viscosidade Plástica (L600 - L300) em cp	40
	200	77	340,60	39,30	0,12	115,39	Limite de escoamento (L300 - Viscosidade Plástica) em cp	55
	100	53	170,30	27,05	0,16	158,85	Limite de escoamento em Lbf/100.pé ²	
	6	15	10,22	7,66	0,75	749,27		
	3	11	5,11	5,61	1,10	1098,93		
	G'	14			7,15			
	G''	17			8,68			

A composição do fluido C é, especialmente, indicada para a perfuração da rocha reservatório, uma vez que, este fluido apresenta maior facilidade para a remoção do reboco (camada obturante que se forma nas paredes do poço, em razão da diferença entre a pressão hidrostática e a pressão dos fluidos da formação permeável). Esta característica favorece a redução dos danos ocasionados durante a perfuração, principalmente, no que se refere à diminuição da permeabilidade da rocha nas proximidades do poço.

5.2. Equipamentos Utilizados

Para as análises de absorção óptica foram utilizados os equipamentos com as seguintes configurações disponíveis:

1. Fonte:

- Luz branca (quartzo-halogênio): $27000-2000\text{ cm}^{-1}$ (número de onda)
- Infravermelho (Ever Glo): $9600-20\text{ cm}^{-1}$

2. Beamsplitter:

- Quartzo: $27000 - 2800\text{ cm}^{-1}$
- Fluoreto de cálcio: $14500-1200\text{ cm}^{-1}$
- XT-KBr: $11000-375\text{ cm}^{-1}$

3. Detectores:

- Silício: $27000-8600\text{ cm}^{-1}$
- Seleneto de chumbo: $11000-2000\text{ cm}^{-1}$
- DTGS-KBr: $12500-350\text{ cm}^{-1}$

Faixas espectrais avaliadas e técnicas de amostragem:

1. $8500-14000\text{ cm}^{-1}$ – perda de energia em função do fluido

- Nicolet 6700 (Nexus antigo)
- Silício e quartzo

Análise por transmissão de luz em célula de CaF_2 com 0,2 mm de caminho ótico.

2. $4500-10000\text{ cm}^{-1}$ – perda de energia em função do fluido

- Nicolet 6700 (Nexus novo)
- PbSe e CaF₂

Análise por transmissão de luz em célula de CaF₂ com 0,2 mm de caminho ótico.

3. 650-4000 cm⁻¹ – análise composicional

- Nicolet 380
- DTGS-KBr e KBr

Análise por reflexão total atenuada com cristal de diamante de uma reflexão.

Alguns resultados começam a surgir, como se observa nos gráficos apresentados neste trabalho, onde se compara a razão entre a energia que passa pela amostra de fluido e a energia que percorre o mesmo caminho óptico contendo somente ar.

5.3. Espectroscopia dos Fluidos no Infravermelho Médio (MIR)

Dentre as amostras de fluido selecionadas para análise, são apresentados os resultados iniciais obtidos com uma formulação aquosa do tipo *drill-in* e outra não aquosa à base de parafina. Os gráficos devem ser analisados, apenas do ponto de vista qualitativo. O comportamento do espectro em função do número de onda é o que essa análise tem a oferecer, na forma da identificação das frequências em que a absorção da luz ocorre com maior intensidade.

Nos testes realizados na faixa do infravermelho médio (MIR), foi atribuído um valor igual a 100, para o fluido de referência. Dessa forma, os valores das abcissas são tomados em unidades arbitrárias.

A amostra, denominada fluido A, apresentou material sólido precipitado no fundo do frasco que era rapidamente separado, não se mantendo em suspensão após agitação. Devido a sua instabilidade, ela foi agitada e rapidamente analisada por infravermelho médio, onde foi possível observar os sinais de absorção da água (em torno de 3350 e 1630 cm⁻¹) e uma banda em 1415 cm⁻¹, sugerindo a presença de carbonatos (Figura 14). Não foi possível confirmar qual componente está

associado a esta banda de absorção porque a alta concentração de água no fluido provoca grande sobreposição espectral, impedindo a visualização das outras bandas de absorção que poderiam confirmar este grupo funcional. Após a filtração foi obtido um líquido límpido e transparente, que na análise por MIR, mostrou somente a presença de água (Figura 14).

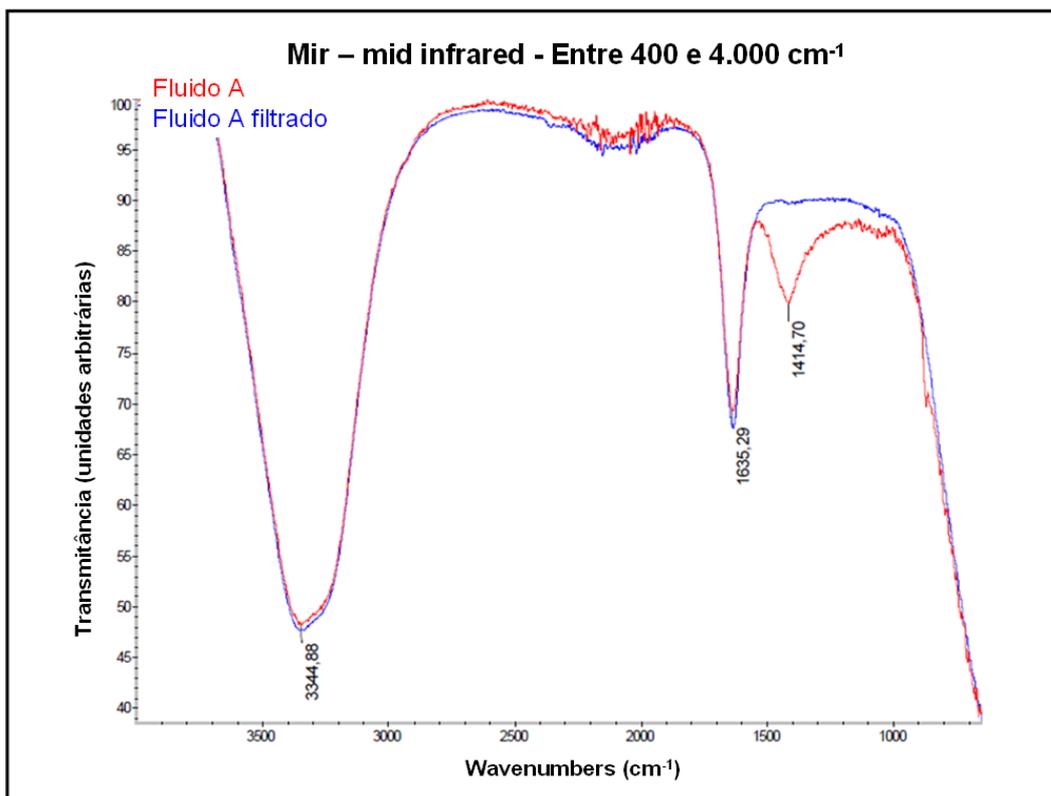


Figura 14: Espectros MIR da amostra fluido A, antes (em vermelho) e após a retirada dos sólidos da suspensão (em azul).

Fonte: Análise de absorção ótica - CENPES.

A Figura 15 apresenta o espectro da amostra fluido B1, nesse teste foram observadas bandas de absorção de ligações simples carbono-hidrogênio em 1458 cm⁻¹, 1378 cm⁻¹ e na região de 3000 a 2800 cm⁻¹ e bandas de sulfato e de água na amostra original. Após a retirada dos sólidos por centrifugação, o espectro MIR apresentou somente absorções características de hidrocarbonetos saturados. Conforme informado anteriormente, um valor igual a 100 é atribuído ao fluido de

referência. É por essa razão, que se observa um valor maior para o fluido B1 centrifugado no teste mostrado na Figura 15.

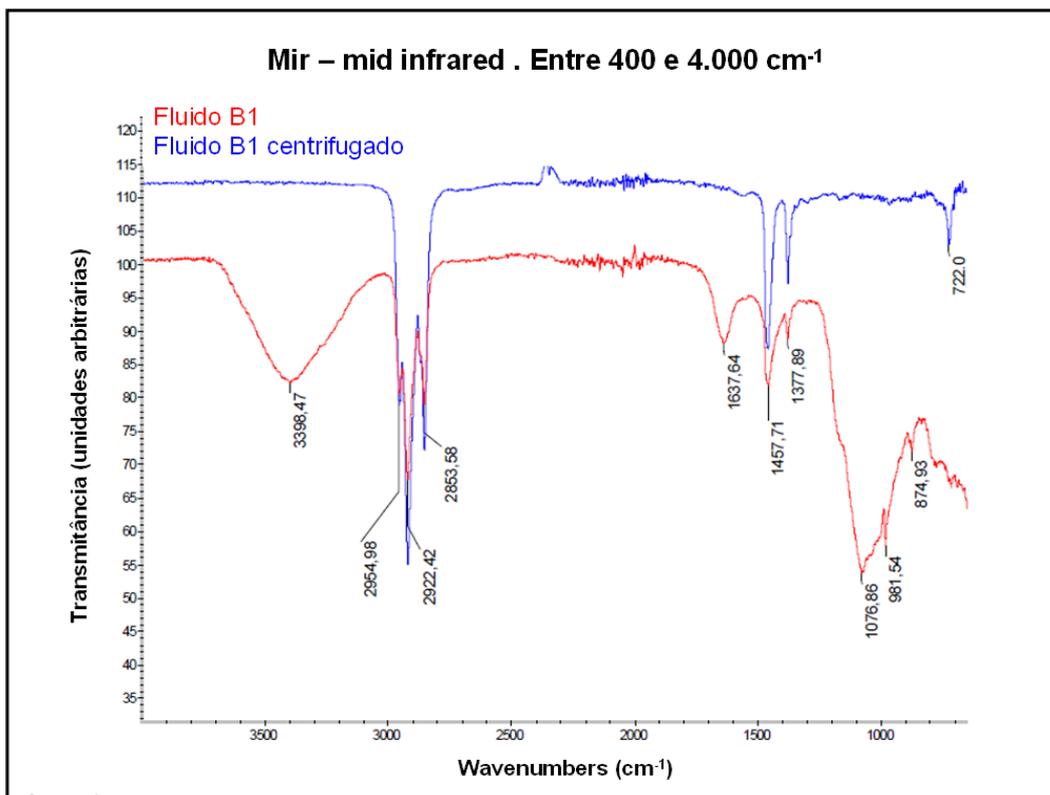


Figura 15: Espectros MIR da amostra fluido B1 antes (em vermelho) e após a retirada dos sólidos da suspensão (em azul).

Fonte: Análise de absorção ótica - CENPES.

O espectro da amostra fluido B2, visualizado na Figura 16, apresenta o perfil de absorção característico de sulfato de bário, água e éster orgânico. Após a filtração dos sólidos foi obtida uma fase líquida límpida e amarelada, cujo espectro MIR é compatível com a presença de uma mistura de óleo mineral, poliolefinas e ésteres orgânicos. Também, neste caso, importante destacar que, essas medidas devem ser analisadas qualitativamente, ou seja, é válida uma análise comparativa e de tendência do comportamento do espectro.

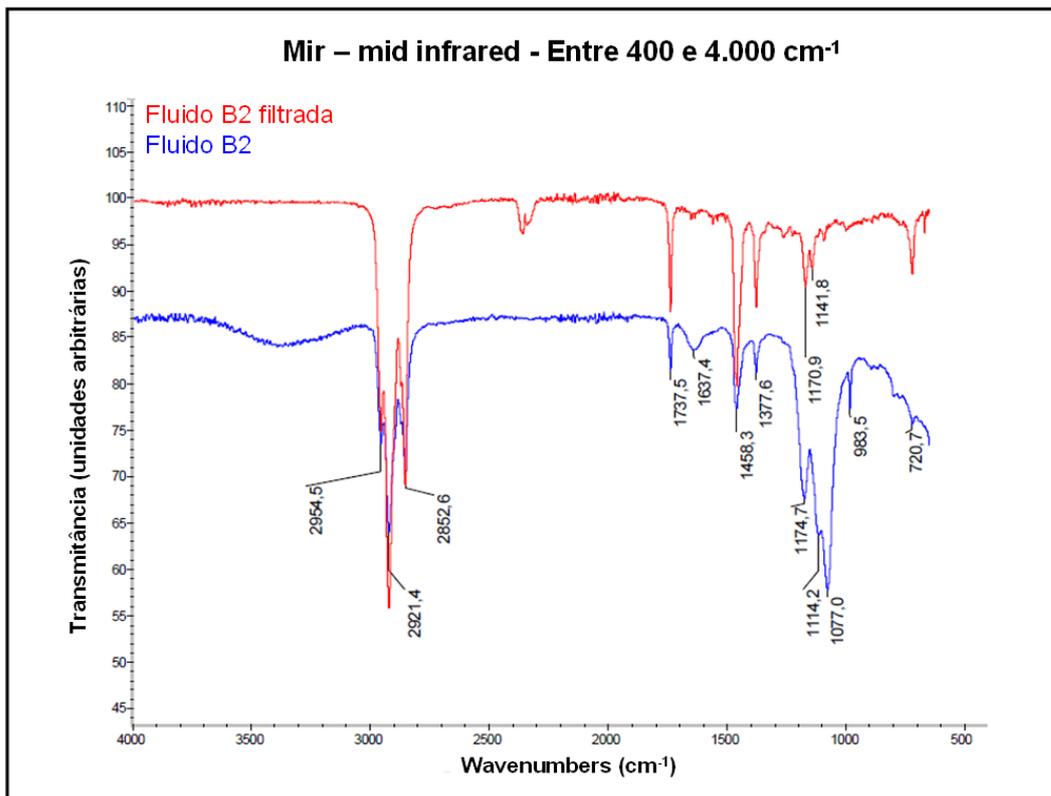


Figura 16: Espectros MIR da amostra fluido B2 antes (em azul) e após (em vermelho) a retirada dos sólidos da suspensão.

Fonte: Análise de absorção ótica - CENPES.

O seu perfil de absorção apresenta grande semelhança com os encontrados em alguns óleos lubrificantes comerciais.

O espectro na região do infravermelho médio, da amostra fluido C, tipo *drill-in*, mostra bandas de absorção largas características da água na região de 3350 e 1631 cm^{-1} (Figura 17). A grande concentração de água neste fluido (80% m/m) e a conseqüente intensidade destas bandas, sobrepondo as demais absorções, impediu a caracterização dos outros componentes nesta mistura. Esta amostra foi analisada somente como recebida porque não foi possível separar os sólidos dessa suspensão.

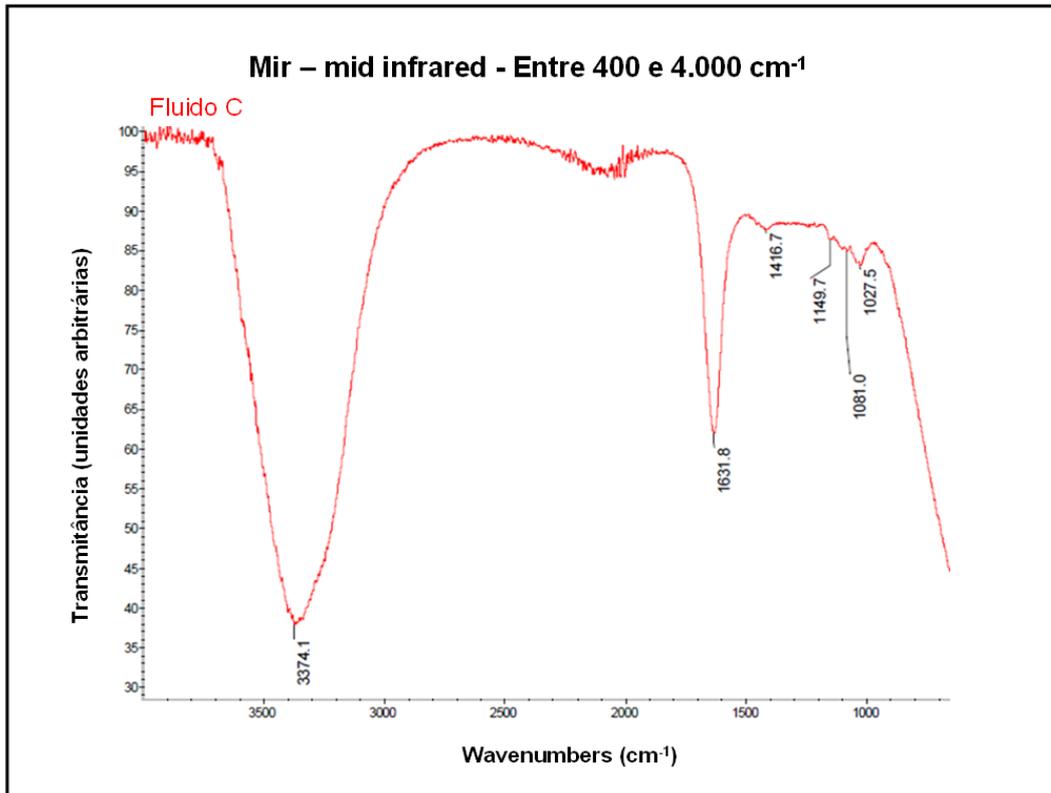


Figura 17: Espectro MIR da amostra fluido C.

Fonte: Análise de absorção ótica - CENPES.

5.4. Espectroscopia dos Fluidos no Infravermelho Próximo (NIR)

Para avaliar a resposta espectral dos fluidos foram utilizadas diferentes configurações ópticas disponíveis no laboratório: de 4500 a 10000 cm⁻¹ [(fonte de quartzo-halogênio, detector de seleneto de chumbo (PbSe) e divisor de feixe de fluoreto de cálcio (CaF₂)] e de 8500 a 14000 cm⁻¹ [fonte de quartzo-halogênio, detector de silício (Si) e divisor de feixe de quartzo]. Esse arranjo foi necessário para se obter a melhor resposta (intensidade de sinal) ao longo de toda região do NIR. A Figura 18 mostra as configurações utilizadas.

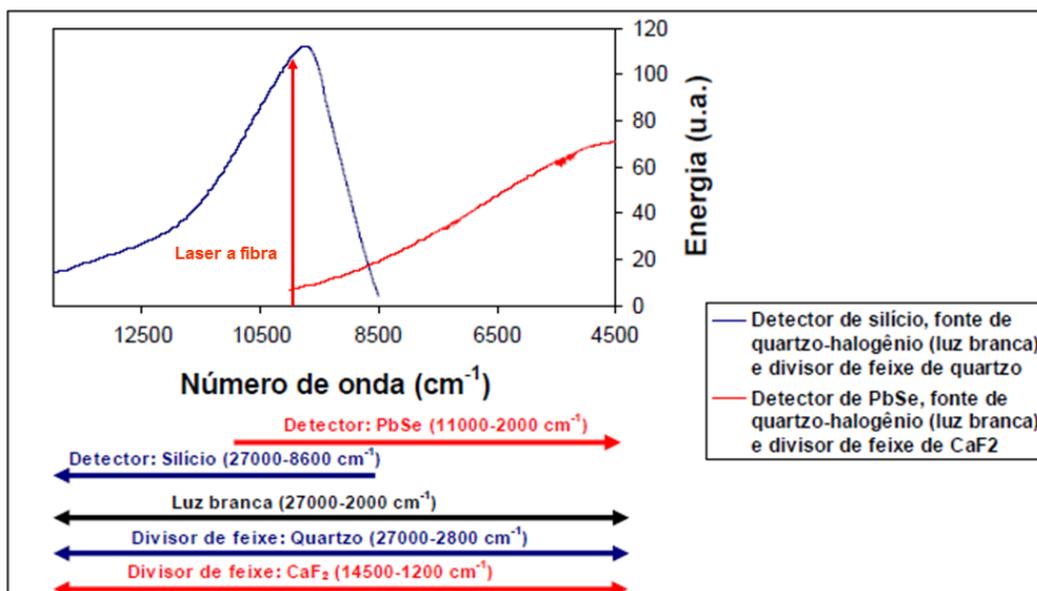


Figura 18: Energia no detector em função do número de onda da radiação infravermelho.

Fonte: Análise de absorção ótica - CENPES.

As Figuras 19 a 23 (Fonte: Análise de absorção ótica – CENPES) apresentam os espectros de infravermelho próximo (NIR) em transmitância das amostras dos fluidos B1, B2 e C, tendo o ar como referência. A linha na cor laranja representa o número de onda (9346 cm^{-1}), correspondente à frequência de 1070 nm, referente ao laser utilizado nos testes de bancada (laser a fibra YLS-1500).

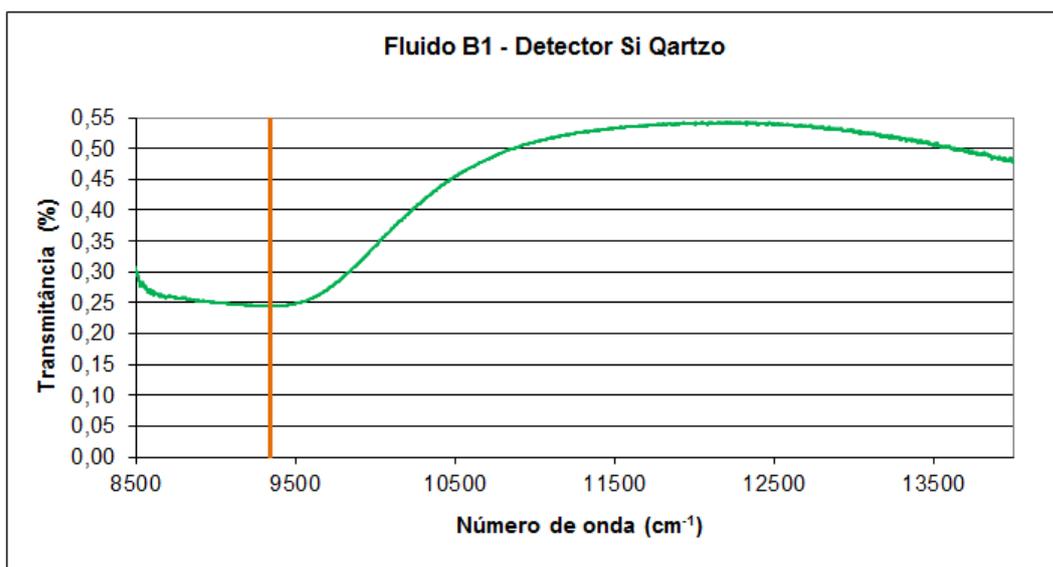


Figura 19: Espectro NIR (8500-14000 cm^{-1}), fluido B1, referência ar.

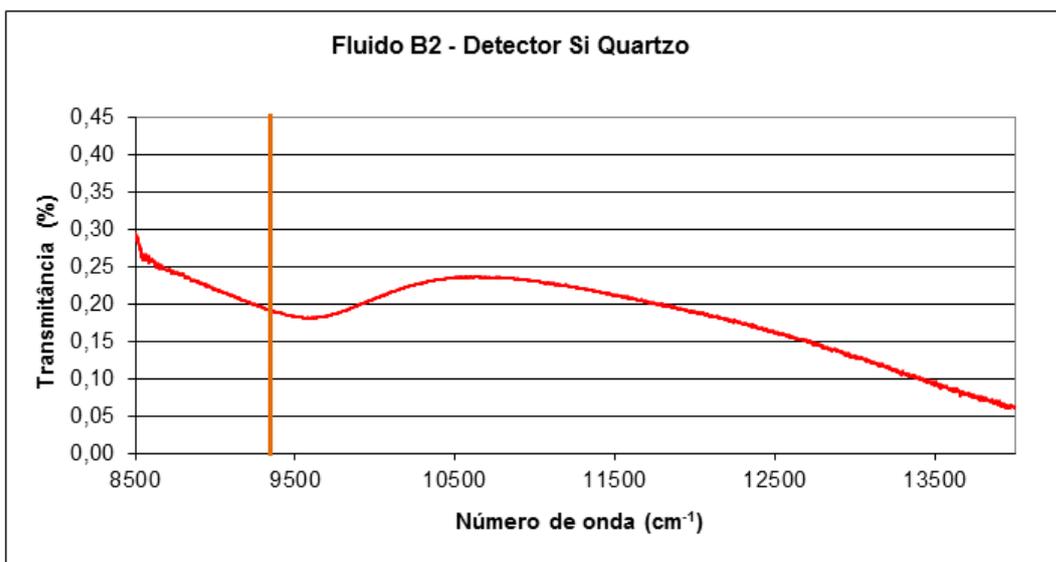


Figura 20: Espectro NIR (8500-14000 cm⁻¹), fluido B2, referência ar.

A comparação entre os espectros NIR (8500-14000 cm⁻¹) das amostras de fluido: B1 (em verde), B2 (em vermelho) e C (em azul), tendo o ar como referência pode ser observada na Figura 22. Esta comparação, entre os espectros NIR das amostras de fluido, comprova que a menor absorção é ocasionada pelo fluido C, enquanto que a maior absorção é provocada pelo fluido B2.

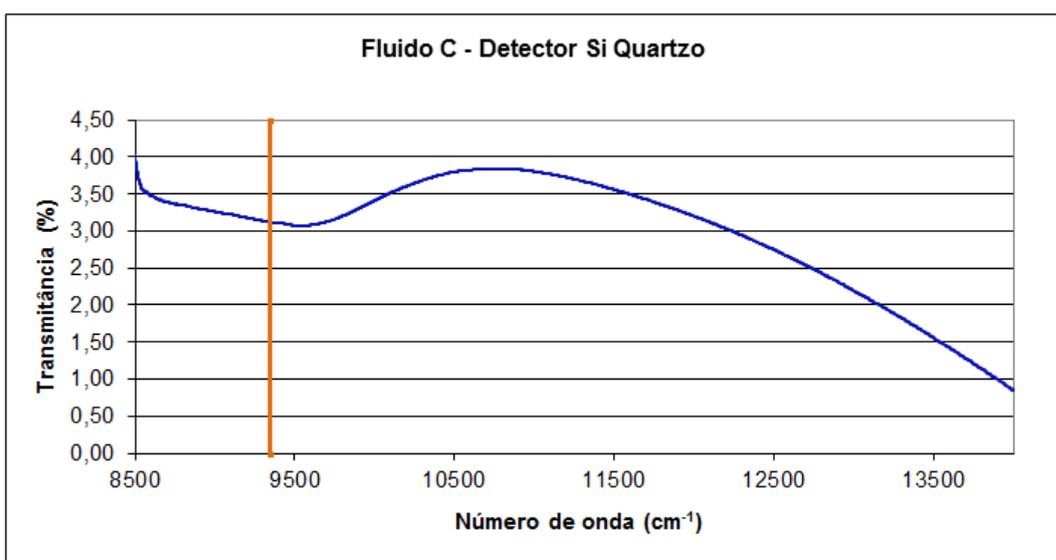


Figura 21: Espectro NIR (8500-14000 cm⁻¹), fluido C, referência ar.

A Figura 22 apresenta os valores da transmitância para os fluidos não aquosos, à base de parafina (fluido B1 e B2) e fluido aquoso do tipo *drill-in*, (fluido C). Como se observa, os valores da transmitância para o fluido C são uma ordem de grandeza maior do que os valores para os fluidos não-aquosos. Portanto, indicando uma maior capacidade do fluido aquoso de ser atravessado pela luz do raio incidente.

Embora o fluido aquoso tenha uma transmitância maior do que a transmitância do fluido à base de parafina, ainda assim, a absorção da energia na faixa da frequência do laser utilizado nos testes ($\lambda = 1070$ nm, número de onda equivalente = 9.346 cm^{-1}) é muito elevada, como mostra a Figura 22.

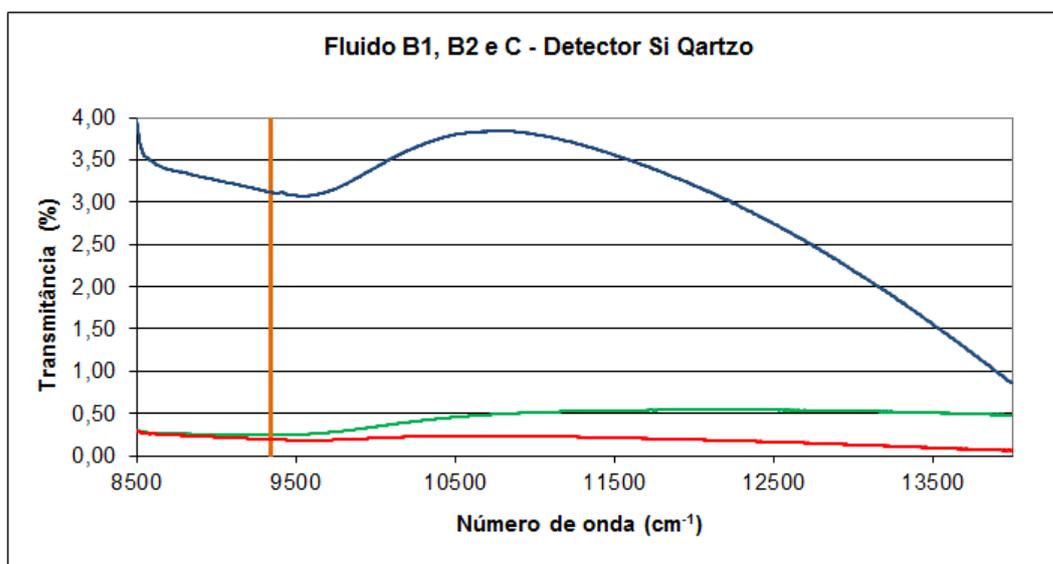


Figura 22: NIR (8500-14000 cm^{-1}), para os fluidos B1, B2 e C, ar como referência.

Fonte: Análise de absorção ótica - CENPES.

Na Figura 23, é possível observar o mesmo gráfico anterior, com a escala ampliada do eixo das coordenadas, destacando os fluidos que apresentaram as menores transmitâncias, os fluidos B1 e B2, que são os fluidos não-aquosos. Estes fluidos são normalmente utilizados na construção da trajetória do poço anterior a fase do reservatório.

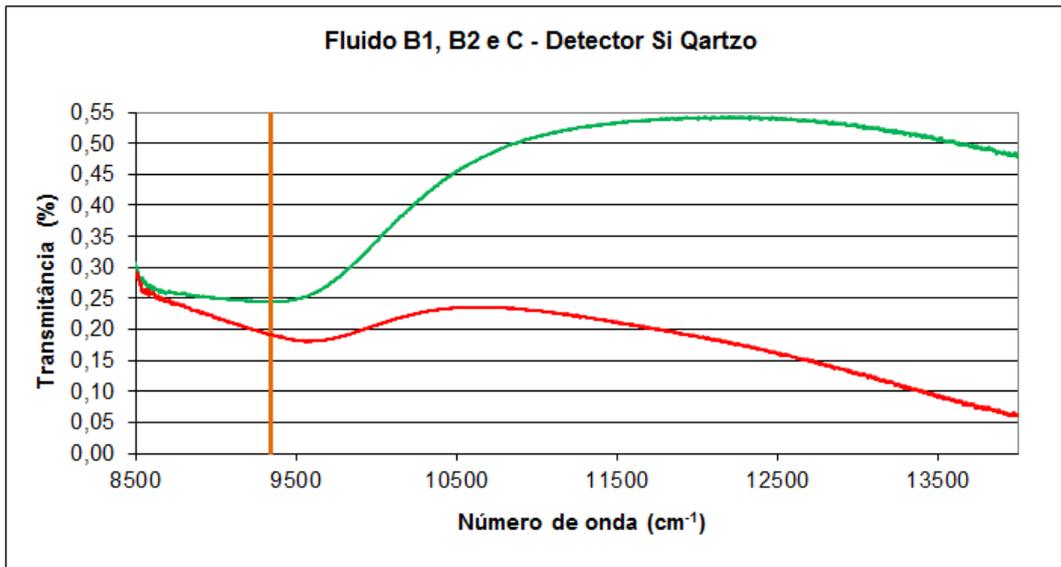


Figura 23: Espectro NIR (8500-14000 cm^{-1}) no detalhe para os fluidos B1 e B2.

Fonte: Análise de absorção ótica - CENPES.

A Figura 24 mostra o espectro de absorção da água, onde é possível concluir que as frequências que são menos absorvidas encontram-se na faixa da luz visível, próximas as frequências da cor azul.

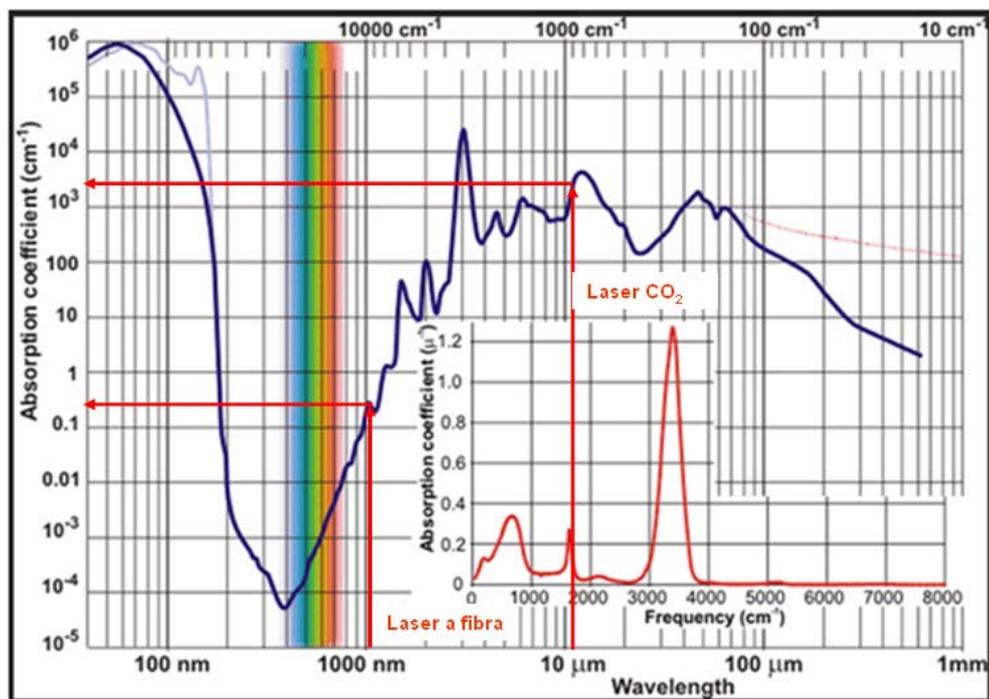


Figura 24: Espectro de absorção ótico da água.

O coeficiente de absorção obtido a partir do gráfico é utilizado na fórmula 5.4, para a determinação da energia que consegue atravessar a lâmina d'água a partir de uma determinada energia incidente.

$$I = I_0 * 10^{-\alpha.x} \quad (5.4)$$

Onde:

I = Energia que atravessa a lâmina d'água em Joules

I₀ = Energia incidente em Joules

α = Coeficiente de absorção em cm⁻¹

x = Espessura da lâmina d'água em cm

Pesquisas com laser na faixa de frequência da luz visível, próximas às frequências da cor azul, e com potências suficientemente elevadas, terão resultados melhores na fragilização e corte de rochas submersas em fluidos, onde a água seja o componente principal.

6 Análise Fotoacústica

A análise fotoacústica apresentada, a seguir, deve ser interpretada sob o enfoque qualitativo, ou semi-quantitativo. Assim sendo, os valores obtidos para a absorção estão relacionados aos valores obtidos para o carvão, devido a uma facilidade operacional. Portanto, os valores da relação fluido/carvão podem ser usados para identificar qual fluido absorve mais a luz do que outro. Em outras palavras, esses mesmos valores não devem ser tomados como medidas absolutas da absorção.

6.1. Técnica Fotoacústica

A técnica fotoacústica, ou espectroscopia fotoacústica é um método que permite a obtenção de espectros de absorção de qualquer tipo de material, desde amostras opacas até as transparentes. Na técnica fotoacústica, apenas a energia da luz absorvida pela amostra é convertida em sinal elétrico. A conversão da energia absorvida em sinal elétrico ocorre por intermédio de um microfone, em seguida, este sinal passa por um sistema de amplificação. Dessa forma, o espalhamento da luz, que se apresenta como um problema para outros métodos de determinação do espectro, não interfere no método fotoacústico. Esta é uma técnica não destrutiva, que permite a determinação da difusividade térmica, um parâmetro que indica como o calor se propaga em uma amostra.

De uma forma resumida, esta técnica consiste de uma fonte de luz policromática que é modulada por um sincronizador de frequência (*chopper*), o qual envia um sinal de referência para um amplificador síncrono (chamado de *lock-in*). Esta luz passa por um monocromador que separa a luz branca em suas diversas componentes, obtendo-se então luz monocromática. A luz monocromática chega até a amostra e é absorvida, gerando o sinal fotoacústico, que é captado por um microfone no interior da célula. Este sinal é enviado para o

amplificador, para que as componentes do sinal que possuem a mesma frequência de modulação do sinal de referência sejam amplificadas. Dessa forma, os ruídos indesejáveis são eliminados. A seguir, o sinal amplificado é enviado para um microcomputador, onde poderá ser analisado.

6.2. Análise Fotoacústica da Água

Os principais tipos de fluido utilizados na indústria do petróleo foram analisados através do uso da técnica fotoacústica. Para fins de comparação, o primeiro fluido analisado foi a água potável, cujo resultado pode ser observado na Figura 25. Posteriormente, os demais fluidos, devidamente, caracterizados no capítulo anterior, passaram pelo processo de análise fotoacústica, tendo como referência o carvão.

A linha na cor laranja, que aparece nos gráficos, indica o comprimento de onda correspondente ao laser utilizado no teste de bancada ($\lambda = 1070$ nm, número de onda equivalente = 9.346 cm^{-1}).

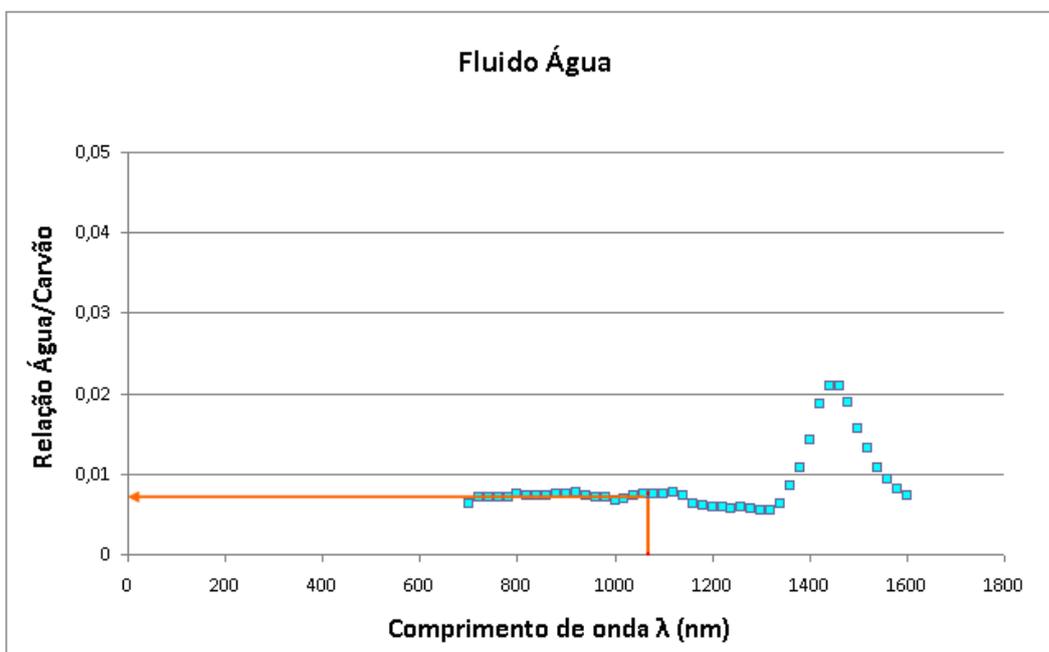


Figura 25: Espectro de absorção da água pela técnica fotoacústica.

6.3. Análise Fotoacústica do Fluido A

A Figura 26 mostra o gráfico de absorção fotoacústica obtido para o fluido A, que é um fluido aquoso com polímeros, utilizado em fases iniciais de poço. Estas fases são, normalmente, de diâmetros maiores, acima de 16 polegadas. Devido às características construtivas de um poço de petróleo, as fases de maior diâmetro, em geral, em profundidades mais rasas, não encontram rochas duras na grande maioria das locações. Portanto, não sendo, a princípio, um cenário para a utilização do laser ou outro sistema desenhado para a perfuração de rochas duras.

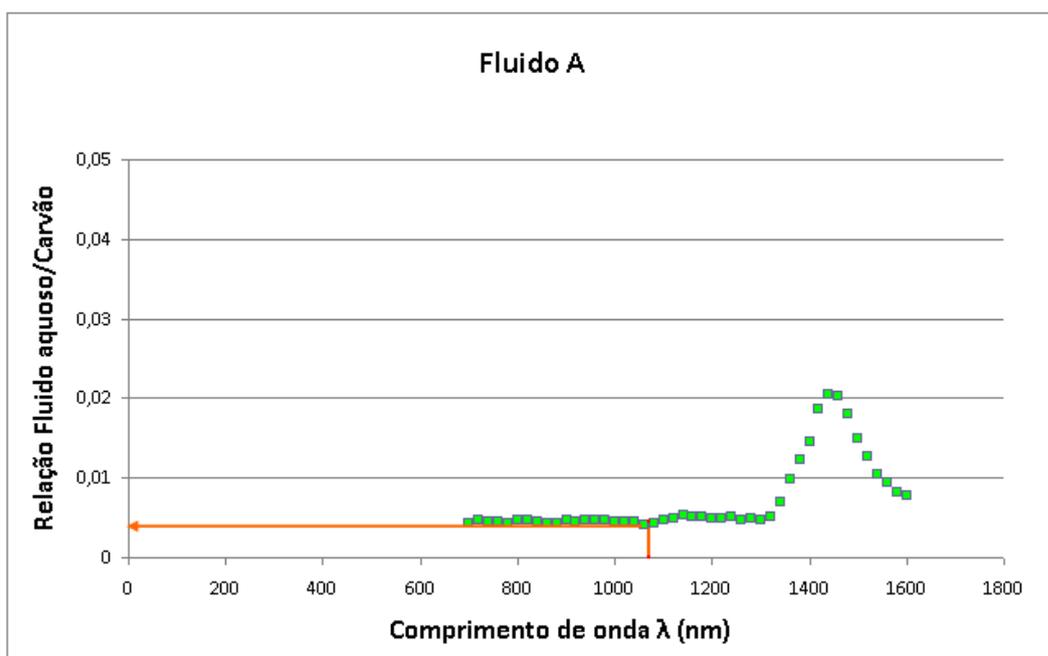


Figura 26: Espectro de absorção do fluido A pela técnica fotoacústica.

6.4. Análise Fotoacústica do Fluido B1

A Figura 27 mostra o espectro de absorção fotoacústica para o fluido B1, que é um fluido não-aquoso, a base de parafina. Trata-se de uma emulsão inversa onde a porcentagem de parafina, normalmente, é maior que 50%. Este fluido é utilizado em projetos de poço onde é necessário um fator de fricção menor entre a coluna de perfuração e as paredes do poço. É um fluido que contribui para o

aumento do rendimento da perfuração, em razão da sua inibição frente a folhelhos e sua alta lubricidade.

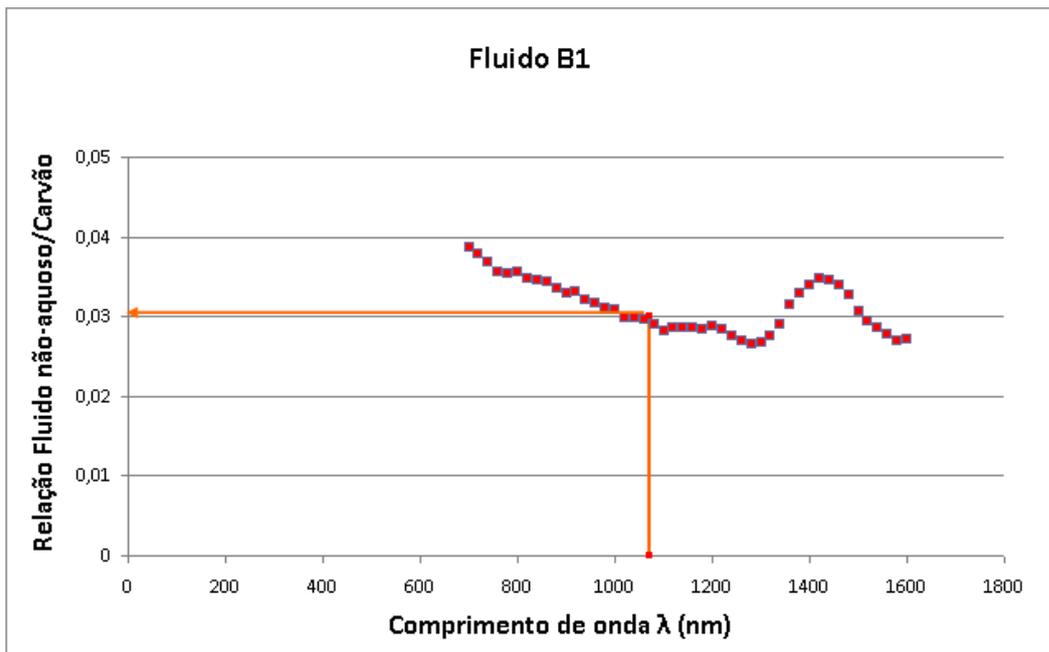


Figura 27: Espectro de absorção do fluido B1 pela técnica fotoacústica.

A pequena reatividade do fluido com as argilas da formação e as rochas evaporíticas é outro fator de alta relevância para a seleção desse fluido para a perfuração de um poço.

6.5. Análise Fotoacústica do Fluido B2

A Figura 28 mostra o espectro de absorção para o fluido B2, um fluido não-aquoso à base de parafina, semelhante ao descrito no parágrafo anterior. Porém, neste caso, o elemento adensante do fluido é uma partícula de dimensão uniforme, uma partícula micronizada. Esta característica da partícula confere propriedades reológicas importantes para o fluido, como por exemplo, uma menor perda de carga ao longo da coluna de perfuração.

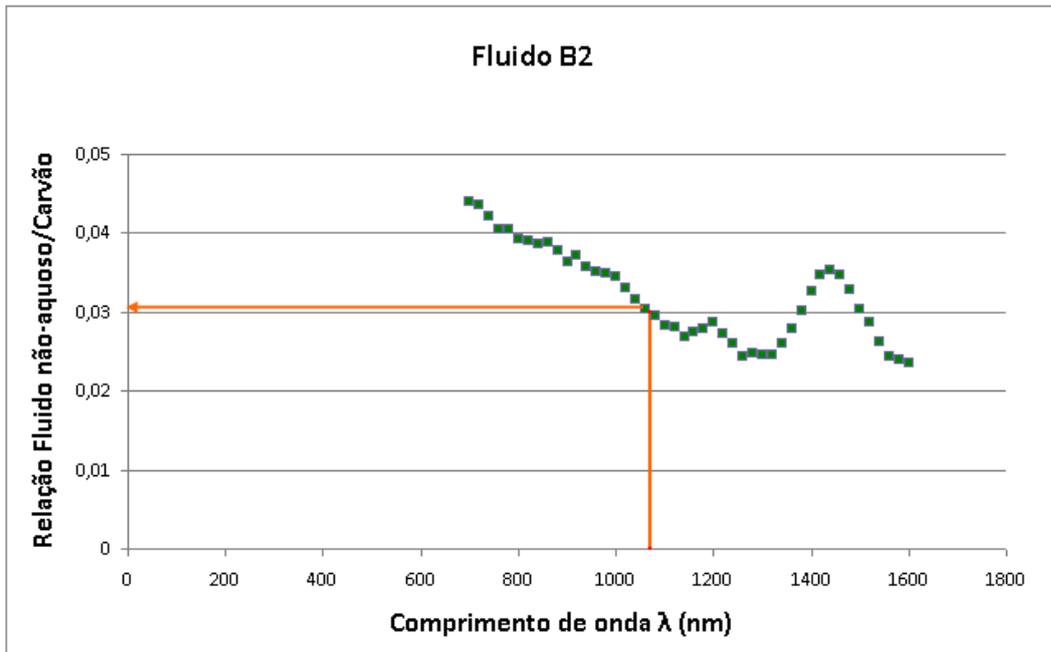


Figura 28: Espectro de absorção do fluido B2 pela técnica fotoacústica.

6.6. Análise Fotoacústica do Fluido C

Para concluir os testes sobre análise fotoacústica dos fluidos de perfuração, a Figura 29 apresenta o espectro de absorção do fluido C, um fluido aquoso, do tipo *drill-in*. Este fluido é utilizado para perfurar a rocha reservatório, que tanto pode ser um arenito ou uma rocha carbonática. Esta preferência de utilização, nesse cenário, se deve, principalmente, a maior facilidade de remoção do reboco (camada que se forma nas paredes do poço devido à diferença entre a pressão hidrostática e a pressão de poros da formação).

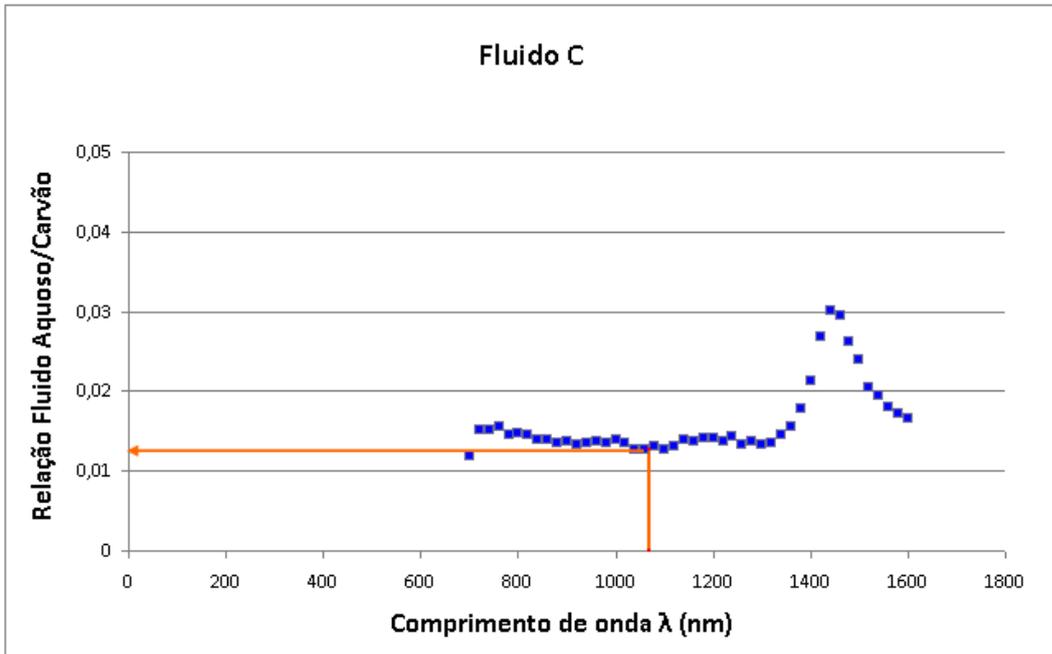


Figura 29: Espectro de absorção do fluido C pela técnica fotoacústica.

6.7. Comparação de Resultados da Análise Fotoacústica

Na Figura 30, podemos observar o espectro de absorção de todos os fluidos analisados. A linha na cor laranja representa a frequência de 1070 nm.

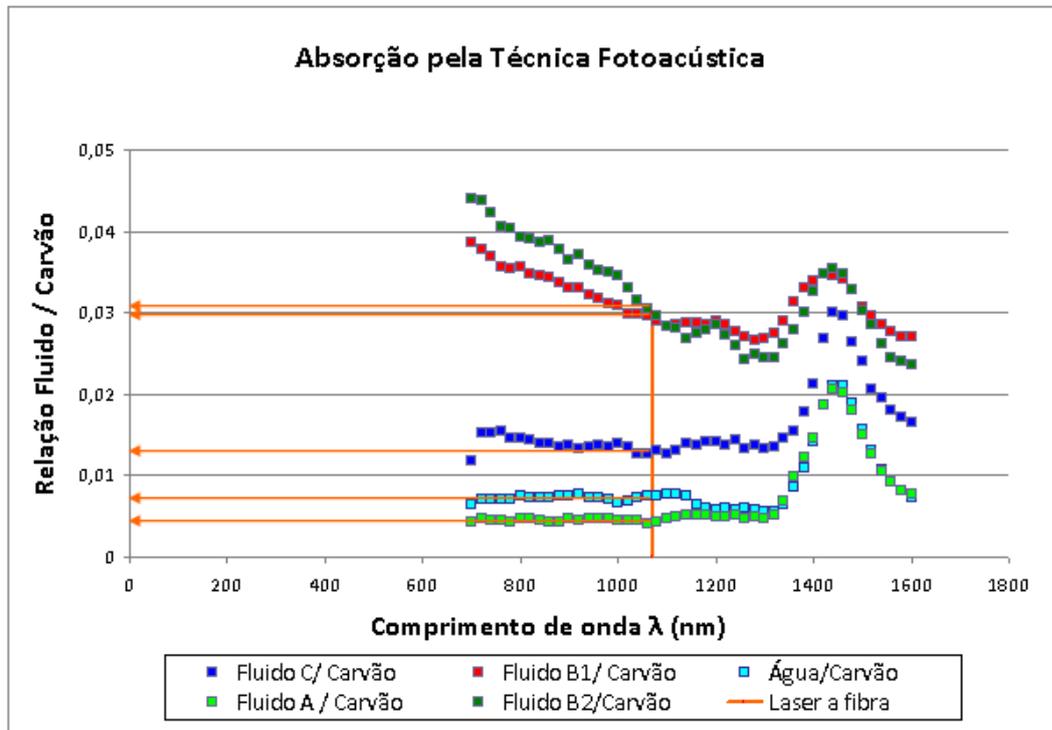


Figura 30: Espectro de absorção para a água e fluidos de perfuração.

No gráfico apresentado, é possível concluir que os fluidos aquosos apresentam um nível de absorção mais baixo do que o que foi obtido para os fluidos não-aquosos. Conclusão semelhante foi obtida no capítulo anterior com a análise de absorção ótica utilizando-se de equipamentos que medem a transmitância.

De um modo geral, o tipo de fluido utilizado na perfuração da rocha reservatório é do tipo *drill-in*, ou seja, o tipo aquoso que apresenta facilidades de remoção do reboco formado durante a perfuração, através de um tratamento com ácido. O fato de o fluido aquoso ser mais transparente à passagem da luz do que o tipo não-aquoso é um dado importante, e promissor, a ser considerado em pesquisas futuras.

7 Dispositivo para Teste de Bancada

Para possibilitar uma análise mais objetiva sobre a capacidade do laser de realizar o corte de rochas carbonáticas, em um processo que se assemelhasse ao desenvolvido por cortadores das brocas do sistema convencional de perfuração, foi concebido um dispositivo eletro-mecânico para ser utilizado no teste de bancada. A Figura 31 mostra o dispositivo especialmente desenvolvido para a realização do teste de bancada.



Figura 31: Dispositivo eletro-mecânico desenvolvido para o teste.

Este dispositivo tem por finalidade conferir um movimento circular à amostra de rocha, em um ambiente onde seja possível a imersão da amostra e o

controle de parâmetros, como a distância de aplicação do laser e a ação do método de remoção do material fragilizado. A amostra de rocha pode ser deslocada transversalmente, em relação ao raio incidente do laser, após a conclusão do percurso circular. Dessa forma, é possível a perfuração da amostra em rotação, formando pistas em círculos de diversos diâmetros. A velocidade de rotação da amostra é programável. Este mecanismo permite o ajuste da velocidade tangencial para as pistas de diferentes diâmetros do círculo.

7.1.

Motivação para o Teste de Bancada

O teste de bancada foi idealizado para dar suporte às conclusões e recomendações propostas por este estudo, ao mesmo tempo em que, com um mecanismo para realização de ensaios sobre amostras de rochas, será possível validar algumas conclusões encontradas na pesquisa bibliográfica e avaliar a viabilidade de recomendações propostas.

7.1.1.

Laser YLS-1500

O laser a fibra YLS-1500 foi utilizado nos experimentos realizados sobre a interação da energia radiante com amostras de rocha, como mostra a Figura 32. As principais características desse equipamento são apresentadas na Tabela 12.



Figura 32: Laser a fibra YLS-1500 com potência de 1500 W.

Tabela 12: Comprimentos de onda do laser YLS - de 1500 Watts.

Característica	Mínimo	Máximo	Resultado do teste	Unidade
Modo de operação	Onda contínua			
Sintonia da potência de saída	10	100	10-100	%
Potência de saída	1500		1619	Watts
Comprimento de onda da emissão (λ)	1065,0	1080,0	1070,4	nm
Largura da banda ($\Delta\lambda$)		6,0	4,8	nm
Tempo para ligar		100,0	26,8	μ s
Tempo para desligar		100,0	21,6	μ s
Máxima taxa de modulação digital		5,0	5,0	kHz
Máxima taxa de modulação analógica		5,0	5,0	kHz
Instabilidade da potência de saída		2,0	0,2	%
Potência de saída do guia do feixe			937	μ W

Uma representação gráfica do espectro obtido para a máxima potência de saída do laser a fibra YLS-1500 pode ser observada na Figura 33, conforme informação do manual do fabricante do equipamento.

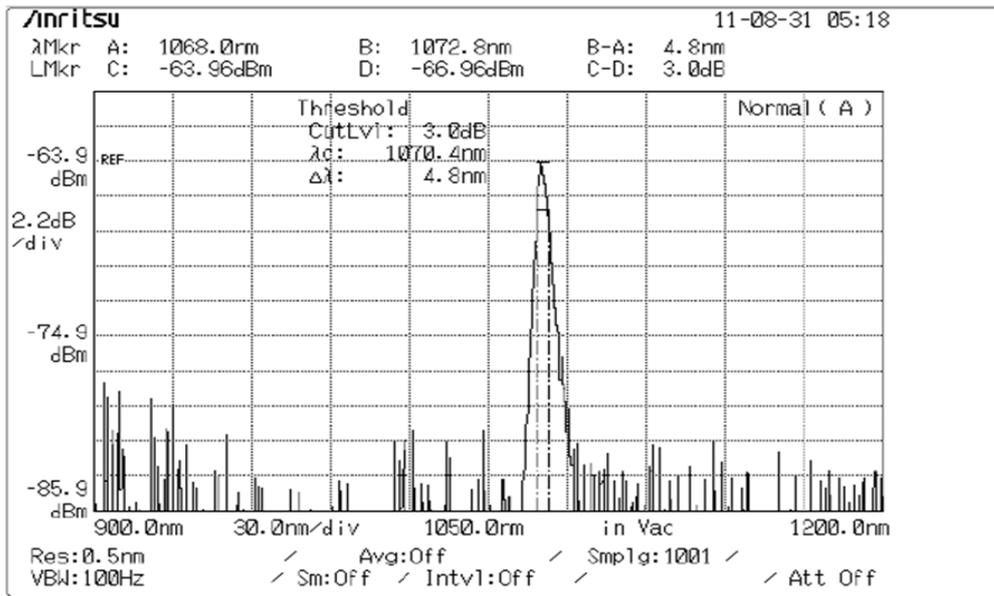


Figura 33: Espectro para máxima potência de saída referente ao laser.

Na Figura 34, é apresentado um desenho com detalhe da ponteira do laser que será acoplado ao dispositivo eletro-mecânico, onde será realizada a experiência referente à metodologia descrita para o teste de bancada.

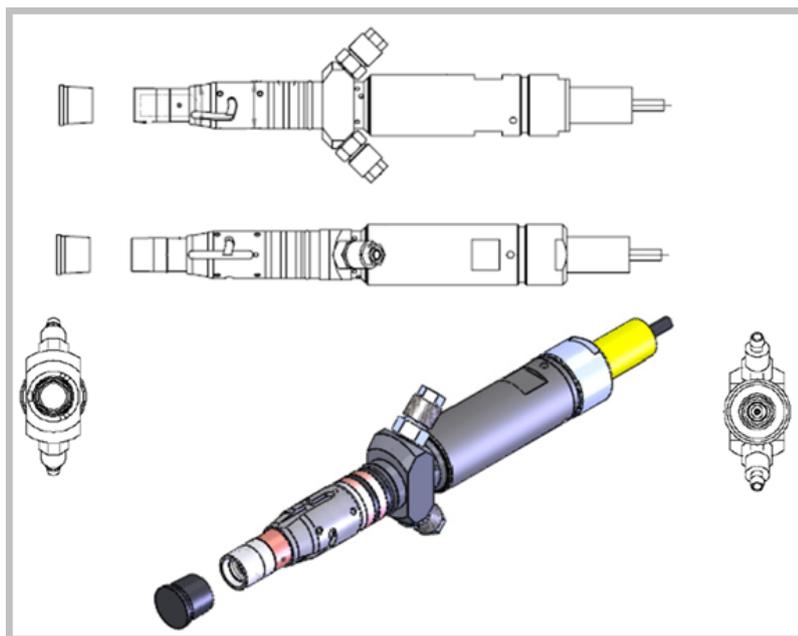


Figura 34: Ponteira do laser a fibra.

7.2.

Componentes do Dispositivo para Teste de Bancada

O dispositivo idealizado é constituído por um conjunto de peças construídas com o propósito específico de analisar alguns parâmetros considerados críticos e validar algumas interpretações obtidas junto à literatura relacionada à aplicação do laser na indústria e, em especial, à perfuração de rochas. Assim sendo, o teste procurou analisar os seguintes aspectos: a interação do laser com o fluido, os efeitos da absorção da energia incidente e a confiabilidade do sistema ótico, cuja composição simplificada é a seguinte: ponteira do laser, lente de convergência e janela de proteção da lente. Uma descrição resumida de cada componente é apresentada na seqüência.

7.2.1.

Tubo Protetor

Tubo confeccionado em nylon resistente à temperatura de 100 °C, com a finalidade de alojar e proteger a lente da ponteira do laser de 1500 W. Logo nos primeiros testes, foi observado que o aquecimento da lente superava a temperatura limite para o nylon. Em função dessa constatação, foi necessário alterar o material do tubo protetor para aço inox. O tubo de nylon apresentava externamente uma rosca fina (maior número de fios de rosca por centímetro) para permitir aproximar e medir com precisão a distância entre a janela de cristal e a face da amostra. Esta distância preenchida por fluido representa uma barreira a ser vencida pela energia do laser até chegar à rocha. Na parte interna do tubo há um espaço para alojar um anel de vedação, justaposto à janela de cristal, sendo o conjunto fixado por tampa vazada com rosca interna, que se conecta a rosca externa do tubo protetor. O desenho dos componentes pode ser observado no Apêndice A.

7.2.2.

Estrutura de Assentamento do Tubo Protetor

Trata-se de uma porca confeccionada em nylon que mantém o tubo protetor assentado na trave de sustentação, e permite o ajuste fino da distância entre a lente

de borosilicato e a superfície da amostra. Todos os componentes podem ser visualizados, através dos desenhos utilizados para a fabricação, no Apêndice A.

7.2.3.

Lente de Borosilicato

Trata-se de uma lente com alto índice de transmissibilidade para o comprimento de onda da luz do laser. Esta lente permite a focalização da luz do laser e, juntamente com o anel de vedação, protege a ponteira do laser do contato com o fluido. Para a realização da experiência, foi definida a compra de dois pares de lentes com distância focal de 10 e 20 mm, que foram utilizadas conforme o protocolo de teste estabelecido.

7.2.4.

Trave de Sustentação

Estrutura confeccionada em alumínio, com a finalidade de suportar o tubo protetor, o duto de sucção do material pulverizado pelo laser e o duto de injeção de ar direcionado para o ponto de incidência. A injeção de ar foi utilizada para remover parcialmente o material fragilizado pela ação do laser.

7.2.5.

Cuba Giratória

Trata-se de um recipiente para alojar a amostra de rocha, que em alguns testes ficará imersa em um fluido. Na base da cuba, há uma engrenagem usinada que deverá ser acoplada ao motor de passo com drive integrado, de modo que, o conjunto possa ser rotacionado com uma velocidade constante. Na base da cuba giratória são encontrados os seguintes componentes:

- Rolamento para sustentação. Abaixo da engrenagem, encontra-se acoplado um rolamento para permitir que o conjunto possa girar de uma maneira uniforme, sem trepidações.

- Base de sustentação. Trata-se de uma estrutura onde é assentado o rolamento que sustenta e permite o giro da cuba. Nesta base, está instalado o motor elétrico e o sistema que permite alteração da distância do ponto de ação do laser em relação ao centro da amostra, permitindo, assim, a mudança de trilha.

7.2.6. Motor de Passo com Drive Integrado

Para possibilitar o controle de rotação da amostra por intermédio de software, um motor de passo com drive integrado foi adicionado ao dispositivo, permitindo o controle preciso da velocidade angular da amostra.

7.3. Proposta para Teste de Bancada

Uma das propostas para o teste de bancada é comparar a energia específica requerida pelo laser para o corte da rocha carbonática com a energia específica encontrada na literatura para testes similares. A intenção é comparar a energia específica para os diferentes procedimentos de testes e, analisar as limitações impostas pelas condições do teste, de modo a inferir as possíveis dificuldades na transposição das conclusões obtidas em laboratório para as condições de aplicação da tecnologia.

8 Metodologia

A metodologia desenvolvida para a realização do teste de bancada visa, principalmente, avaliar a viabilidade do processo da utilização do laser na fragmentação da rocha e o mecanismo de remoção destes fragmentos, tendo como parâmetro a determinação da energia específica envolvida. Para permitir simular as interfaces foi projetado um dispositivo eletro-mecânico que permite controlar melhor os parâmetros críticos envolvidos no processo.

Com esse objetivo, foi elaborada uma metodologia que consiste na aplicação do laser em diferentes níveis de potência, iniciando pelas potências mais baixas, alternando a distância focal e o número de aplicações.

A aplicação consecutiva do laser sobre o mesmo ponto foi possível através da repetição do número de voltas aplicadas pelo dispositivo giratório. Para as potências mais elevadas, era necessária uma parada entre as voltas para resfriamento da lente de convergência. O tempo de aplicação do laser era monitorado através de um cronômetro manual e através do tempo de filmagem do experimento, com uma *web cam*.

As amostras de rocha, após o teste, foram fotografadas e catalogadas.

Como consequência da metodologia adotada, o teste de bancada foi segmentado da seguinte forma:

- Teste dinâmico sem repetição. Nesse teste aplicaram-se vários níveis de potência sobre a amostra de rocha, com a amostra em movimento circular uniforme.
- Teste dinâmico com repetição. Nesse teste aplicou-se um único nível de potência, porém com a repetição do número de voltas. Dessa forma, o mesmo ponto da rocha recebeu uma incidência de luz cumulativa, correspondente ao número de voltas aplicado.
- Teste estático. Nesse teste foram aplicados dois níveis de potência em pontos diferentes com a amostra de rocha estática.

- Teste através da água. Foi realizado teste dinâmico e estático através da água, como meio de propagação da luz incidente.

8.1.

Protocolo de Teste com Laser YSL-1500

Dispositivo eletro-mecânico composto de:

- Motor de passo com drive integrado com rotação controlada;
- Lentes com distância focal de 10 mm e 20 mm;
- Amostra forma quadrada 13 cm x 13 cm x 2 cm, correspondendo a uma diagonal de 18,4 cm (o diâmetro interno da cuba é de 20 cm) ;
- 02 meios: ar e água;
- 02 distâncias focais: 10 e 20 mm;
- Níveis de potência: 200 W, 300 W, 500 W, 1000 W e 1500 W;
- Método de remoção de resíduos: jato de ar;
- Repetição do experimento em outra pista circular com diferente nível de potência.

8.1.1.

Meio Ar

Realização de teste de fragilização de rocha em pistas circulares, com diâmetros variados, alternando a distância focal.

- 02 distâncias focais: 10 e 20 mm;
- Níveis de potência: 300 W, 500 W, 1000 W e 1500 W;
- Método de remoção de resíduos: jato de ar;
- Documentação através de fotos, filmes e gráficos representando a energia aplicada versus o volume removido.

8.1.2. Meio Água

- Realização de teste de remoção de rocha em pistas circulares, com diâmetros variados, alternando a distância focal;
- 02 distâncias focais: 10 e 20 mm;
- Níveis de potência entre: 500 W e 1500 W;
- Documentação através de fotos, filmes e gráficos representando a energia aplicada versus o volume removido.

8.1.3. Medição do Volume Removido

Os dados de volume de rocha removido foram obtidos conforme a seguinte metodologia:

- Para a medição do volume removido foi aplicado um óleo vegetal sobre o sulco para facilitar a retirada da massa de modelar;
- O óleo aplicado em excesso foi removido por absorção;
- O volume do sulco foi preenchido por massa de modelar, sendo esse volume de massa de modelar pesado em uma balança de precisão;
- Uma vez conhecido o peso específico da massa de modelar, o volume removido foi calculado, através da equação 8.1.

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (8.1)$$

- Com a determinação do volume removido, e conhecendo-se a potência do laser aplicada sobre a amostra, foi possível calcular a energia específica, obtida pela razão entre o volume removido e a energia aplicada pelo laser.

Para potências maiores que 600 W foram observados eventos de superaquecimento da lente de convergência. Nos experimentos com repetição de volta, aguardava-se, entre as voltas, o tempo necessário para o resfriamento da lente de convergência.

9 Resultados e Discussões

Os testes de bancada estão divididos em três partes: a primeira rodada constituiu-se de testes realizados com a amostra imersa no ar, a segunda rodada foi realizada com a amostra de rocha imersa em três milímetros de água e, finalmente, na terceira rodada, foi realizado um teste de corte da amostra de mármore Travertino no ar.

9.1. Teste Realizado com a Amostra no Ar

Os resultados, apresentados na Tabela 13, foram obtidos na primeira rodada de testes, onde já foi possível identificar os fatores limitantes para a aplicação do laser na perfuração de rochas.

Tabela 13: Resultados da primeira rodada de testes de bancada.

Potência (W)	Dist. Focal (mm)	Vel. Angular (voltas/min)	Tipo do meio Ar/Água	Nº voltas	Tempo (minutos)	Observações
200	20	2	Ar	1	0,5	
500	20	2	Ar			
1000	20	2	Ar			
1500	20	2	Ar			
200	20	2	Ar	1	0,5	Filme 200 w T1
200	20	2	Ar	1	0,5	Filme 200 w T2
200	20	2	Ar	1	0,5	Filme 200 w T3 não foi filmado
200	20	2	Ar	3	1,5	Filme 200 w T4 sem paradas para refrigeração
300	20	2	Ar	1	0,5	Filme 300 w T1
300	20	2	Ar	3	1,5	Filme 300 w T2, não foi filmado
300	20	2	Ar	5	2,5	Filme 300 w T3, após cada volta parada para esfriar a lente
500	20	2	Ar	1	0,5	Filme 500 w T1
500	20	2	Ar	1	0,5	Filme 500 w T2 - não filmado, projetado 3 voltas em 1,5 min

Em função da dificuldade de trabalhar com potências mais elevadas do laser a fibra de 1500 W, devido ao superaquecimento, foi evidenciada a necessidade da adoção de medidas para mitigar o problema. Após a primeira rodada de testes, ficou claro que a grande limitação para o pleno desenvolvimento dos

experimentos, residia no superaquecimento da lente convergente, através da qual a radiação do laser deve passar até atingir a amostra de rocha. Esse problema é diretamente proporcional ao tempo de aplicação da energia incidente através da lente e sobre a amostra de rocha.

Como resposta a esta dificuldade identificada, um sistema de arrefecimento, que possibilite manter a temperatura dentro dos limites de resistência do material, apresenta-se como item essencial para o funcionamento do sistema. Em uma avaliação preliminar, podemos sugerir um equipamento com as seguintes melhorias:

- Um sistema de arrefecimento. Basicamente, um aspirador com movimento reverso, deverá ser direcionado para a lente, de forma que permita envolvê-la pelas linhas de corrente do fluxo de ar.
- Um sensor de temperatura instalado na lente, de maneira a facilitar o monitoramento da evolução da temperatura da lente de modo eficaz.

As melhorias sugeridas deverão permitir a realização de testes futuros de corte e fragilização de rochas com a utilização da potência máxima do laser, sem a necessidade de paradas para resfriamento da lente e, também, possibilitar o prolongamento da sua vida útil.

Uma primeira batelada de testes realizados com o dispositivo apresentou os dados compilados na Tabela 14. O objetivo do teste era o de avaliar a viabilidade da aplicação do laser para a fragilização da rocha e realizar o cálculo da energia necessária para a remoção de uma unidade de volume de rocha, o que é conhecido como energia específica.

Tabela 14: Valores obtidos em teste de bancada na primeira rodada.

Descrição do teste	Potência (W)	Tempo em 1/4 de volta (s)	Número de voltas	Volume (cm ³)	Energia (kJ)	Energia Específica (kJ/cm ³)
Pré 550 W	550	7,5	1	0,0715	4,1	57,71
Pré 1000 W	1000	7,5	1	0,1639	7,5	45,77
Pré 1500 W	1500	7,5	1	0,2600	11,3	43,27
300 W T1	300	7,5	1	0,0354	2,3	63,48
300 W T2	300	22,5	3	0,1066	6,8	63,33
300 W T3	300	37,5	5	0,1664	11,3	67,59
500 W - pista interna	500	7,5	1	0,0598	3,8	62,74
500 W - pista externa	500	7,5	1	0,0507	3,8	74,02

Na Figura 35, é apresentado um gráfico que relaciona o volume removido com a energia aplicada do laser. Os pontos de cor vermelha representam os testes realizados com a potência de 550 W, 1000 W e 1500 W, sendo que, para o teste da potência de 1500 W foi realizado apenas um quarto de volta, com a finalidade de preservar a lente de convergência. Na Figura 36, pode ser observada a amostra de mármore Travertino, que foi utilizada no teste de bancada para a obtenção dos valores da energia específica. Para o teste realizado com a potência de 200 W, não foi feito a quantificação do volume removido, em razão da dificuldade de medição de um volume muito pequeno.

Os testes para a potência de 500 W, que aparecem no gráfico representado na Figura 35 por pontos na cor amarela, foram realizados na amostra de rocha mostrada na Figura 40.

Os valores da energia específica obtidos nos testes de bancada para as amostras de mármore Travertino, estão compatíveis com os dados obtidos anteriormente para este tipo de rocha, conforme pode ser observado no trabalho desenvolvido por Valente *et al*, 2012.

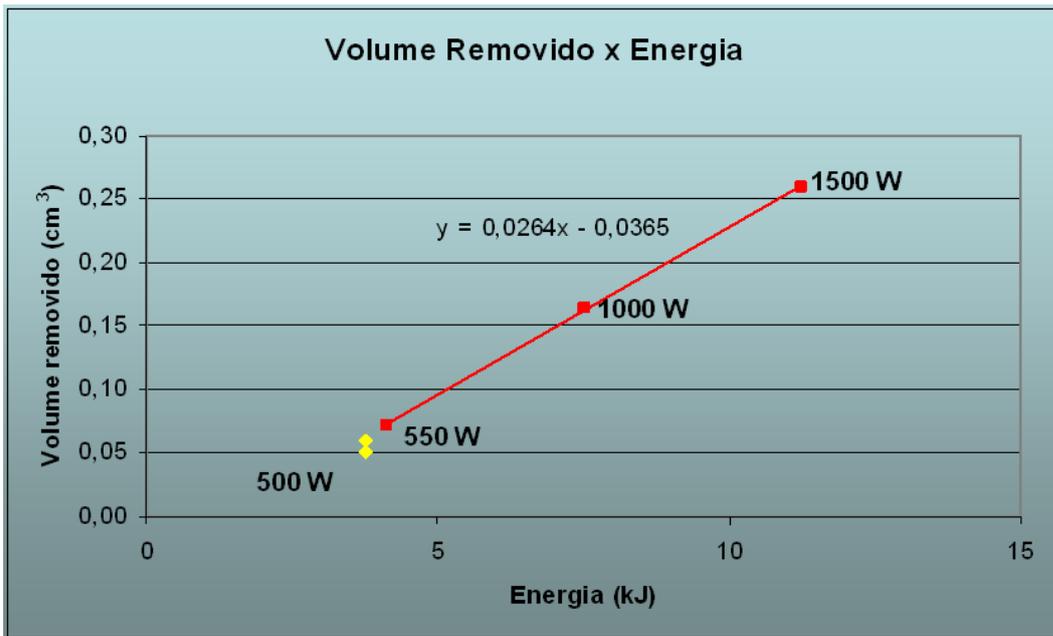


Figura 35: Potências aplicadas de 500, 550, 1000 e 1500 W.

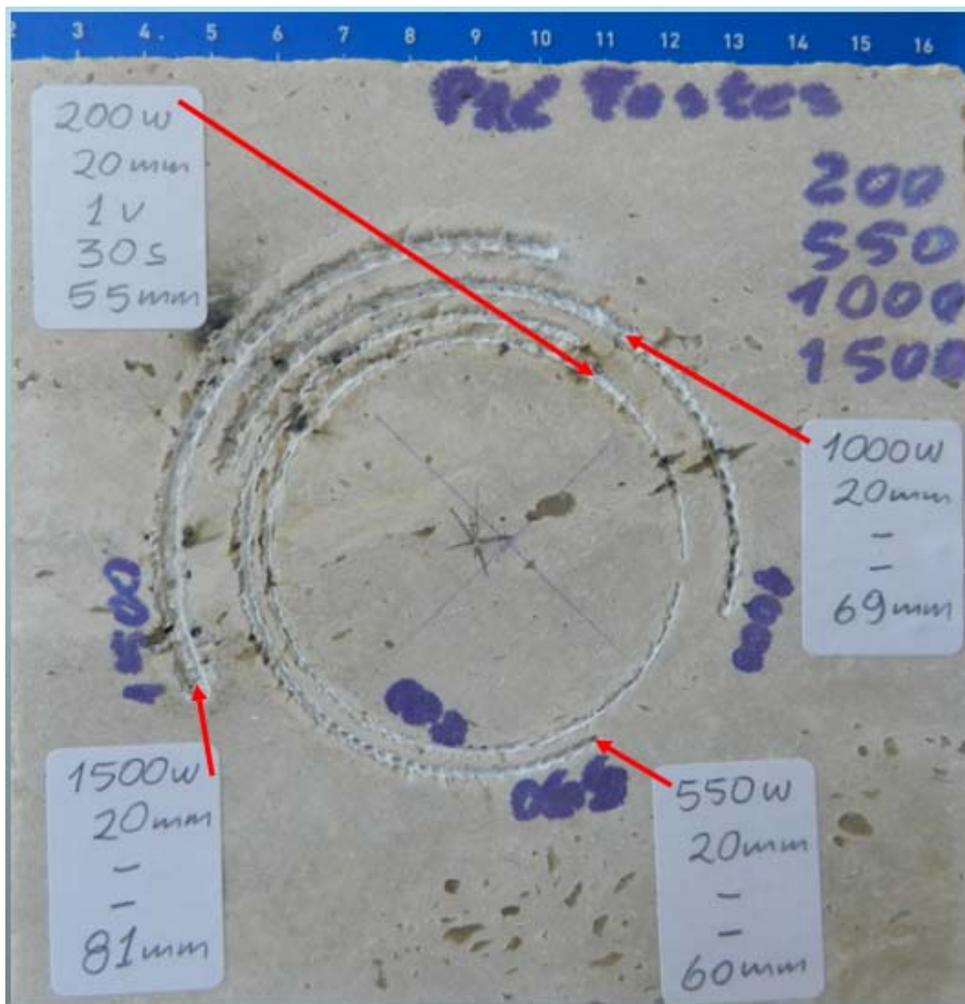


Figura 36: Amostra referente aos testes com 550, 1000 e 1500 W.

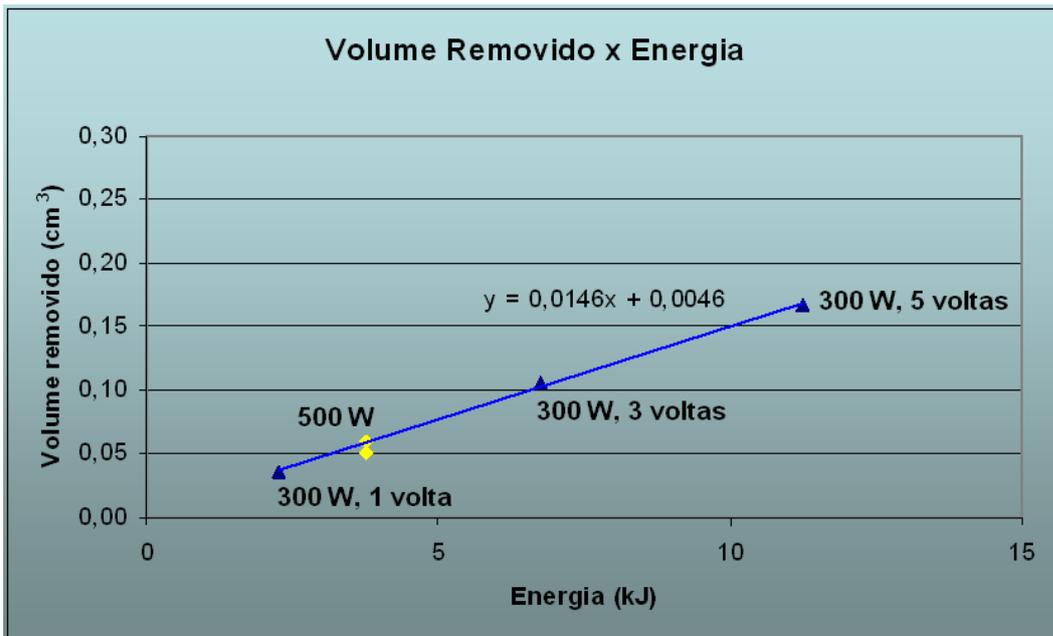


Figura 37: Aplicação do laser com uma sequência de voltas.

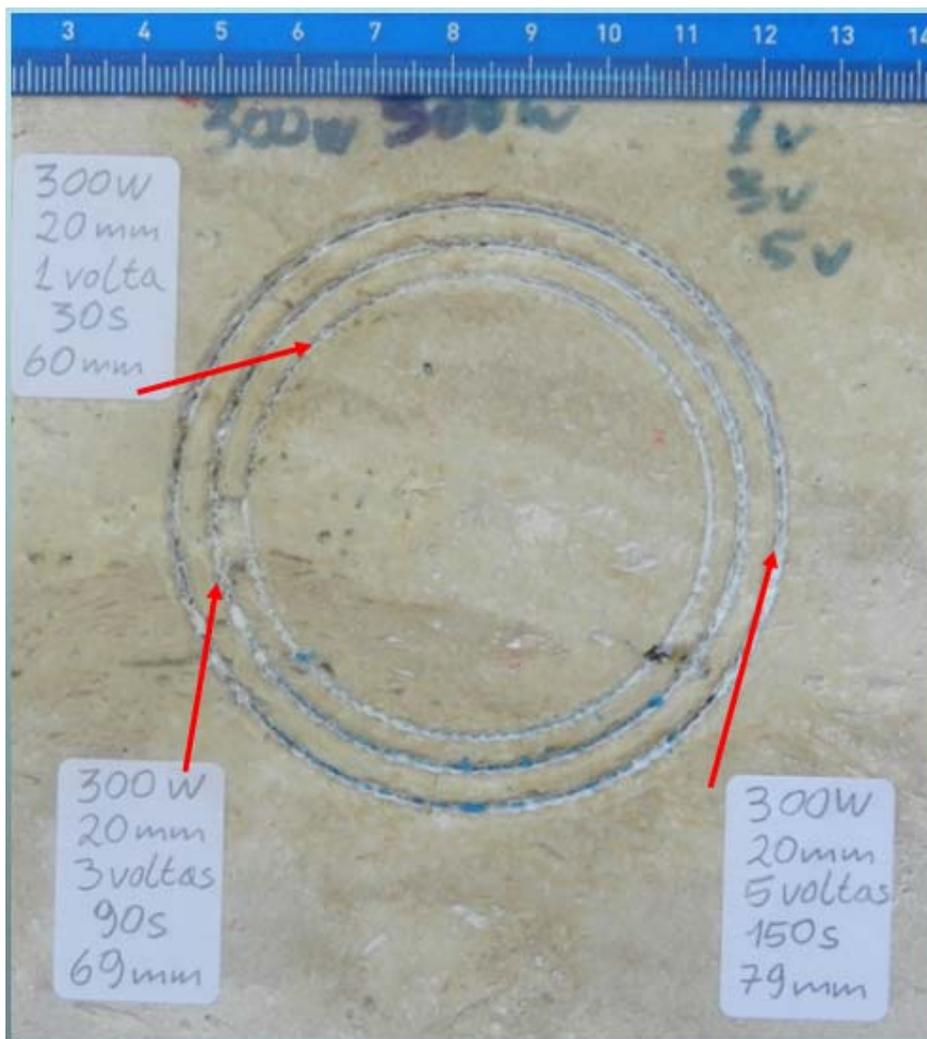


Figura 38: Amostra utilizada na sequência de voltas.

Na Figura 37, os pontos na cor azul representam o experimento onde se aplicou a potência de 300 W, da seguinte forma:

No primeiro teste, apenas uma volta do dispositivo foi realizada, no segundo teste duas voltas e, no terceiro teste cinco voltas. Entre cada volta era dedicado um tempo para o resfriamento da lente. Os pontos na cor amarela representam testes realizados com a potência de 500 W. Todos os testes foram realizados com a velocidade angular de duas voltas por minuto. Na Figura 38, pode ser observada a amostra de rocha utilizada no teste de bancada. Na pista de menor diâmetro, foi realizada a aplicação do laser durante somente uma volta. Na pista de diâmetro intermediário, foram realizadas três aplicações do laser, com intervalo de tempo entre as aplicações para resfriamento da lente de convergência. Finalmente, na pista externa, foram realizadas aplicações do laser durante cinco voltas completas, também, com intervalos entre as aplicações para resfriamento da lente de convergência.

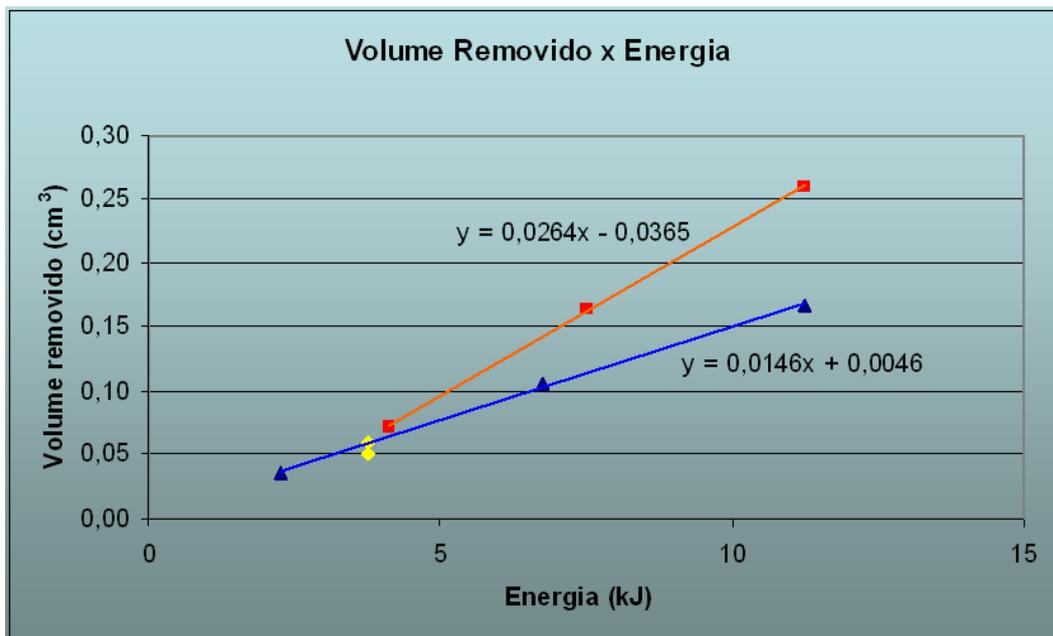


Figura 39: Volume removido em função da energia aplicada do laser.

O gráfico apresentado na Figura 39 indica que a repetição do número de voltas de aplicação do laser reduz a eficiência de remoção da rocha, o que se evidencia pelo menor coeficiente angular da reta de cor azul. Mesmo considerando que a somatória da energia aplicada tenha sido a mesma, (no caso de

cinco voltas com 300 W é o equivalente a uma volta com 1500 W) a eficiência de remoção da rocha é maior em uma única aplicação. Provavelmente, a incidência do laser sobre o material pulverizado na volta anterior reduz a eficiência do processo. Isto se reflete na diferença de inclinação das retas de tendência.

A Figura 40 apresenta a foto da amostra utilizada em outro teste de bancada, com aplicação do laser com uma potência de 500 W. Nesse teste, duas voltas completas foram realizadas, e o volume removido está representado pelos pontos amarelos mostrados nos gráficos das Figuras 35, 37 e 39.



Figura 40: Teste realizado com potência de 500 W em pistas distintas.

9.2.

Teste Realizado com a Amostra Imersa na Água

Para a segunda rodada de testes, com a amostra imersa em três milímetros de água, foram obtidos poucos resultados. Em razão da necessidade de aplicação de potências maiores para superar a elevada absorção provocada pela camada de

água sobre a amostra, ocorria o fenômeno do superaquecimento da lente de convergência. Essa ocorrência foi um fator altamente limitante no desenvolvimento dos testes com a amostra imersa na água.

Na Tabela 15, podem ser observados os dados obtidos na segunda rodada de testes. Nessa rodada, a terceira modificação no dispositivo foi introduzida. O tubo protetor, que no início era feito de nylon, foi redesenhado e confeccionado, com pequenas alterações dimensionais, em aço inox. A razão da mudança é devido à deformação do tubo de nylon, como conseqüência do superaquecimento da lente de convergência.

Tabela 15: Dados obtidos na segunda rodada de testes.

Potência (W)	Dist. Focal (mm)	Vel. Angular (voltas/min)	Tipo do meio Ar/Água	Voltas	Tempo (minutos)	Observações
300	10	2	Água	1	0,5	Sem efeito
500	10	2	Água	1	0,5	Sem efeito, lente quebra com efeito do calor
500	20	2	Ar	1		
500	20	2	Água	1		Lâmina d'água = 3 mm
500	20	Estático	Água	NA	0,5	Lâmina d'água = 3 mm
600	20	Estático	Água	NA	0,5	Lâmina d'água = 3 mm

Os testes realizados com as amostras imersas na água não apresentaram resultados satisfatórios. Como anteriormente mencionado, em razão da limitação de potência do laser (em torno de 600 W) para evitar o superaquecimento e ruptura das lentes, não foi possível obter resultados significativos no experimento através da água, em razão da elevada absorção da energia incidente para o comprimento de onda do laser utilizado.

Para efeito de comparação, inicialmente, foi realizado um teste no ar, como pode ser observado na Figura 41, onde foi aplicada uma potência de 500 W, em uma volta completa (raio de 26,5 mm em 34 s).

Na sequência, foi realizada uma volta completa com amostra imersa em 3 mm de água (raio de 33,5 mm em 39 s). Como pode ser observado, o efeito de absorção da energia pela água, reduz bastante a ação sobre a amostra do laser utilizado, cujo comprimento de onda era de 1070,4 nm.

Um teste estático, com dois níveis de potência e amostra imersa em 3 mm de água, também, foi realizado. Sendo o primeiro, com potência de 500 W, durante 31 s e o segundo, com 600 W, durante 32 s. A amostra utilizada e o resultado dessa aplicação podem ser vistos na Figura 41.

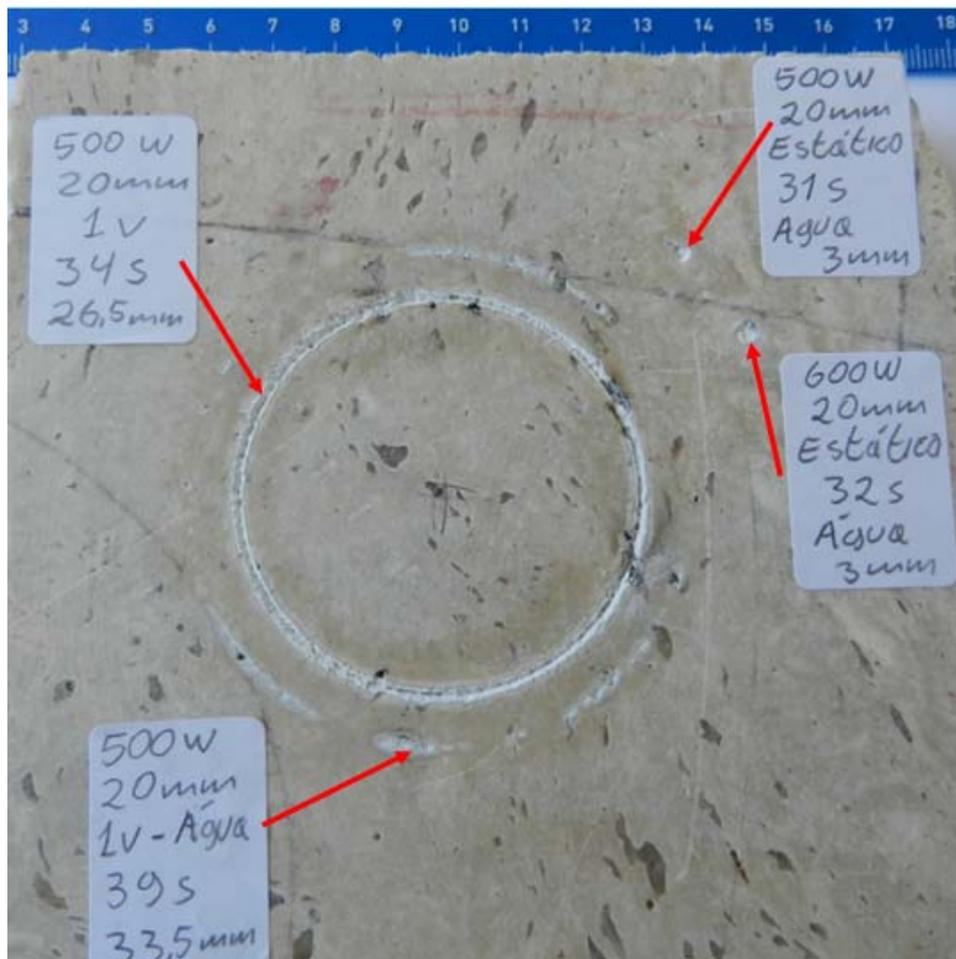


Figura 41: Teste no ar e na água com 500 W, estático 600 W.

9.3. Teste Cortando a Amostra

Uma segunda aplicação de testes no ar, agora com o objetivo de cortar a amostra, foi realizada. A diferença nessa segunda batelada de testes no ar reside no tipo de lente utilizada, uma lente com maior robustez. Essas lentes se apresentaram mais adequadas, conseqüentemente, foi possível aplicar uma

potência maior sobre as amostras por um período de tempo suficiente, até que se conseguisse cortar a amostra de 13 mm de espessura.

Na Figura 42, é possível observar as facilidades adicionais acrescentadas ao dispositivo, para permitir remover parcialmente o material pulverizado do sulco onde se aloja e, ao mesmo tempo, aspirar este material. O material pulverizado se apresenta como um complicador nos testes. Por esta razão, é necessário um sistema de aspiração eficiente, de modo a manter as condições adequadas de trabalho dentro do laboratório.



Figura 42: Dispositivo com soprador e aspirador instalados.

Na Figura 43 pode ser observado o experimento onde foi possível manter a ação do laser até se conseguir cortar a amostra de rocha. Com uma rotação de duas RPM (rotações por minuto) e tempo de exposição de aproximadamente 180 segundos foi possível cortar um disco da amostra de rocha com espessura de 20 mm.



Figura 43: Corte em anel realizado.



Figura 44: Corte pelo laser em amostra de 20 mm de espessura.

Com este ensaio, foi possível simular a perfuração com movimento de rotação e verificar a viabilidade do corte no ar. O resultado da aplicação do laser sobre o mármore Travertino pode ser observado na Figura 44.

10 Conclusões

Viabilidade da perfuração no ar. A perfuração com a utilização de laser, onde o caminho ótico é transparente para a radiação incidente é, perfeitamente, viável e representa um ganho de desempenho, uma vez que, permite fragilizar a rocha com facilidade. Este fato é comprovado pelo experimento de bancada, onde mesmo com potências relativamente baixas, a partir de 200 W, é possível fragilizar a rocha ao ponto de contribuir para a taxa de avanço. Nos testes realizados, o laser a fibra utilizado possuía um comprimento de onda de 1.070,4 nm.

Viabilidade da perfuração em meio aquoso. A perfuração com laser através de um fluido permanece um grande desafio, pois a depender do comprimento de onda da luz incidente, a elevada taxa de absorção ou, de outra forma, a baixa transmitância, chega a inviabilizar o processo. O comprimento de onda do laser a fibra empregado nos testes implicou na alta absorção da radiação incidente pelo meio aquoso. Uma opção a ser avaliada é a de utilizar um laser com comprimento de onda em que o meio aquoso seja transparente ou, que tenha uma pequena absorção, como, por exemplo, o laser na faixa de frequência da cor azul.

Valores obtidos para a energia específica. Os resultados obtidos para a energia específica, nas amostras de mármore Travertino, foram coerentes com os encontrados na literatura.

Superaquecimento da lente. O superaquecimento das lentes foi o maior problema identificado no teste de bancada. Este problema limitou a aplicação de potências maiores nas lentes de borosilicato de 20 mm de diâmetro e, limitou o tempo de aplicação da potência máxima do laser nas lentes de maior dimensão. Para resolver esta questão, será necessário um sistema de arrefecimento para as lentes de convergência. O sistema poderá utilizar um fluido para refrigeração, o que seria mais eficiente, desde que este fluido não intercepte o caminho ótico da radiação incidente. Outra opção seria utilizar a refrigeração a ar. Nesse caso, não haveria problemas de se interceptar o caminho ótico da radiação.

Deposição de partículas sobre a lente. A utilização do laser sobre as amostras no ar leva a pulverização de parte do material que fica em suspensão e pode se depositar sobre a lente de convergência ou sobre a ponteira do laser. Isto acaba provocando um aumento pontual da temperatura da lente ou da janela que compõem a ponteira e pode provocar danos ao equipamento. Para resolver este problema, será necessário providenciar um sistema de aspiração eficiente das partículas pulverizadas da amostra. A aplicação de um jato de ar sobre a lente de convergência, além de contribuir para a refrigeração, também evitaria a deposição de partículas.

Ruptura a janela de proteção. Outro problema recorrente nos testes de bancada foi a ruptura da janela protetora da lente, sendo esta janela, também fabricada em borossilicato e, segundo o fabricante, capaz de resistir a temperatura de 400 °C. Como a função da janela é proteger a lente e, por esta razão, a janela se encontra muito próximo do ponto de incidência do laser, a melhor solução é confeccionar a janela em um material que possa resistir ao superaquecimento.

Ruptura da lente. A ruptura da lente foi consequência do superaquecimento. Por essa razão, a confecção de lentes que resistam a temperaturas mais elevadas e, principalmente, o desenvolvimento de um sistema de arrefecimento, que possibilite manter a temperatura dentro de limites aceitáveis, pode vir a ser a solução para este problema.

Dano à ponteira do laser. Para este problema, duas medidas podem ser implementadas: a primeira é a eliminação das partículas em suspensão por um sistema de aspiração eficiente e a segunda é manter a ponteira protegida, de modo, a não ter contato com eventuais partículas em suspensão.

Dificuldade de remoção do material fragmentado. Nos testes de bancada, ficou evidenciada a queda de rendimento do processo de aprofundamento do sulco provocado pelo laser, em razão da presença de material fragilizado, porém, não removido. Esta dificuldade de remoção do material, maior em potências do laser mais baixas, pode ser mitigada por um processo mecânico ou pneumático. A aplicação de jato de ar ou nitrogênio direcionado para o ponto de incidência do laser, como mostra a literatura, pode vir a ser a solução para esta questão.

Grau de pureza das lentes de convergência. A adequação da pureza do material de confecção das lentes é um fator primordial para a durabilidade do sistema. A baixa confiabilidade das lentes confeccionadas em borossilicato é

atribuída, em grande parte, a esta questão da qualidade do material usado na fabricação.

Medição do volume removido. Apesar da dificuldade de medição do volume de rocha fragilizado, foi possível comparar tendências. Como por exemplo, no procedimento de repetição da aplicação do laser sobre o mesmo caminho circular (aumento do número de voltas). Dessa forma, foi possível fazer a comparação dos volumes removidos com a aplicação direta do laser sem repetição do número de voltas e tirar conclusões sobre a eficiência do processo.

Amostragem reduzida. A quantidade de testes realizados ficou limitada às condições de confiabilidade das lentes e janela protetora. Mesmo assim, os resultados obtidos foram suficientes para identificar as condições limitantes do sistema e para avaliar as condições de viabilidade. No capítulo seguinte, sobre as recomendações, são feitas algumas sugestões para a continuidade das pesquisas, de maneira a aumentar a duração e o número de testes, em função do aumento de confiabilidade do sistema.

11 Recomendações

Para a continuidade das pesquisas, recomenda-se a utilização de um laser cujo fator de absorção pela água seja o menor possível, provavelmente na faixa do azul ou verde (luz visível). Outro ponto importante é o desenvolvimento continuado de um dispositivo que simule, tanto quanto possível, as condições de perfuração. Assim sendo, recomenda-se fazer melhorias no dispositivo atual para dotar o mesmo de alguns requisitos, tais como:

- Um mecanismo de avanço na direção do corte.
- Um sistema eficiente de limpeza e absorção do material fragilizado pelo laser.
- Um sistema laser na faixa do azul ou verde com potência suficiente para corte de rocha submersa.
- Um sistema que permita a refrigeração da lente de convergência e da janela de proteção.
- Monitoramento e controle da temperatura da lente de convergência e da janela de proteção, de modo a aumentar a confiabilidade do sistema.

Algumas idéias interessantes que, futuramente, poderão vir a ser utilizadas em um possível protótipo:

- Geração de energia por turbina junto ao BHA (*Bottom hole assembly*), semelhante aos sistemas de LWD (*Logging while drilling*), utilizados atualmente;
- Formação de um caminho ótico livre de fluido e seus sólidos, através da injeção de gás a frente da lente.

12 Referências Bibliográficas

Amaro R.; Moreira J. B. F.; Forza F. T.; **Salt Steerability and Hard Rock Drilling Performance in Santos Basin** trabalho apresentado na Offshore Technology Conference em Houston, Texas, USA, 1-4 May 2012.

Amaro R.; Pérez A. A. M.; Valente C. G. L.; Braga M. B. A.; Lomba F. T. R.; **Drilling in Hard Rocks: From Conventional Technology to the Potential Use of Laser** trabalho apresentado na Rio Oil & Gás em 2012, Rio de Janeiro - Brasil.

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**, Ph. D. Thesis, Colorado School of Mines, 2001.

Gahan B. C.; Parker R. A.; Batarseh S.; et al **Laser Drilling: Determination of Energy Required to Remove Rock** trabalho apresentado no SPE 2001 em New Orleans.

Gahan B.; Batarseh S.; Sharma B.; Gowelly S.; **Analysis of Efficient High-Power Fiber Laser for Well Perforation**, trabalho apresentado no SPE 2004 em Houston.

Graves R.; Araya A.; Gahan B. C.; Parker R.; **Comparison of Specific Energy Between Drilling with High Power Lasers and Other Drilling Methods**, San Antonio, 2002.

Guedes, L. C.; **Perfuração de Poços com Lasers de Alta Potência**. Seminário: Departamento de Engenharia Mecânica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 20/04/11.

Jain R. K.; Agrawal D. K.; Vishwakarma S. C.; Choubey A. K.; Upadhyaya B. N.; Oak S. M.; **Development of Underwater Laser Cutting Technique for Stel and Zircaloy for Nuclear Applications**, Indian Academy of Science 2010.

Kobayashi T.; Nakamura M.; Kubo S.; Ichikawa M.; **Drilling a 2-inch in Diameter Hole in Granites Submerged in Water by CO2 Lasers**, trabalho apresentado no SPE 2009 em Amsterdam.

Kobayashi T.; Nakamura M.; Okatsu K.; Ohtani K.; Takayama K.; **Underwater Laser Drilling: Drilling Underwater Granite by CO2 Laser** trabalho apresentado no SPE 2008 em Mumbai.

Leal, K. Z. Material didático - Departamento de Físico-Química - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2009.

Okuchaba B. J.; **Development of a Model to Calculate Mechanical Specific Energy**, 2008.

Parker R.; Gahan B. C.; Graves R.; Batarseh S.; Xu Z.; Reed C. B.; **Laser Drilling: Effects of Beam Application Methods on Improving Rock Removal**, SPE em Denver, 2003.

Parker R.; Xu Z.; Reed C. B.; Grave R.; Gahan B.; Batarseh S.; **Drilling Large Diameter Holes in Rocks Using Multiple laser Beams**.

Pooniwala S.; **Lasers: The Next Bit** trabalho apresentado no SPE 2006 em Canton, Ohio.

Relatório CENPES - PETROBRAS sobre a **Análise de Absorção Ótica**, Rio de Janeiro, 2012.

Sinha P.; Gour A.; **Laser Drilling Research and Application: An Update**, apresentado no SPE 2006 em Mumbai.

Teale R.; **The Concept of Specific Energy in Rock Drilling"**, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1965, volume 2, 711-725.

Valente L. C. G.; Pérez M. A. A.; Gouvêa P. M. P.; Martelli C.; Avillez R. R.; Braga A. M. B.; **Energy Efficiency of Drilling Granite and Travertine with CO₂ Laser and 980 nm Diode Laser** , 2012.

Xu Z.; Reed C. B.; Leong K. H. **Applications of High Powered Lasers to Perforated Completions**, Jacksonville, 2003.

Xu Z.; Reed C. B.; Leong K. H.; Parker R.; Graves R.; **Application of High Powered Lasers to Perforated Completions**, Jacksonville, 2003.

Xu Z.; Reed C. B.; Graves R.; Parker R.; **Rock Perforation by Pulsed ND:Yag Laser**, 2004.

Xu Z.; Reed C. B.; Parker R.; Graves R.; **Laser Spallation of Rocks for Oil Well Drilling**, 2004.

Xu Z.; Yamashita Y.; Reed C. B.; **Modeling of Spallation Drilling Rocks for Gas and Oilwell Drilling**, Dallas, 2005.

Xu Z.; Yamashita Y.; Reed C. B.; **Two-dimensional Modeling of Laser Spallation of Rocks**, Kyushu University, Japão.

13 Apêndice A: Dispositivo Para Teste de Bancada

Esta seção apresenta uma visualização dos componentes do dispositivo do teste de bancada, em uma das primeiras versões do projeto.

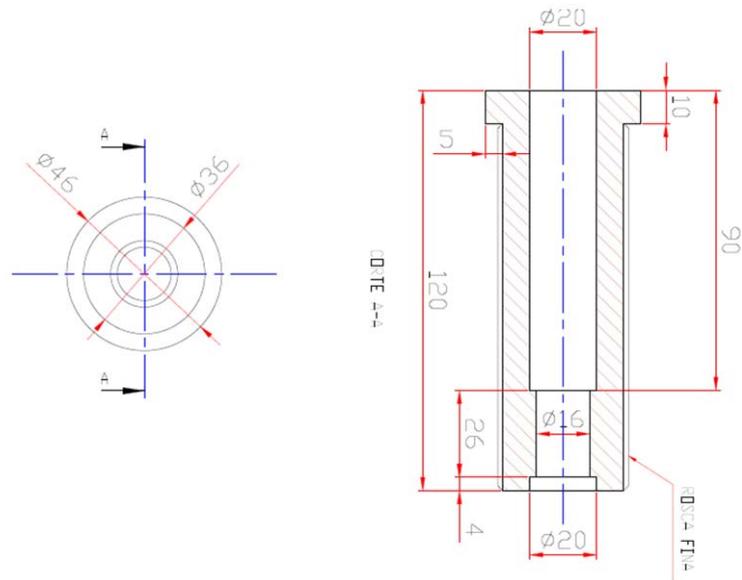


Figura 45: Estrutura de proteção da ponteira do laser.

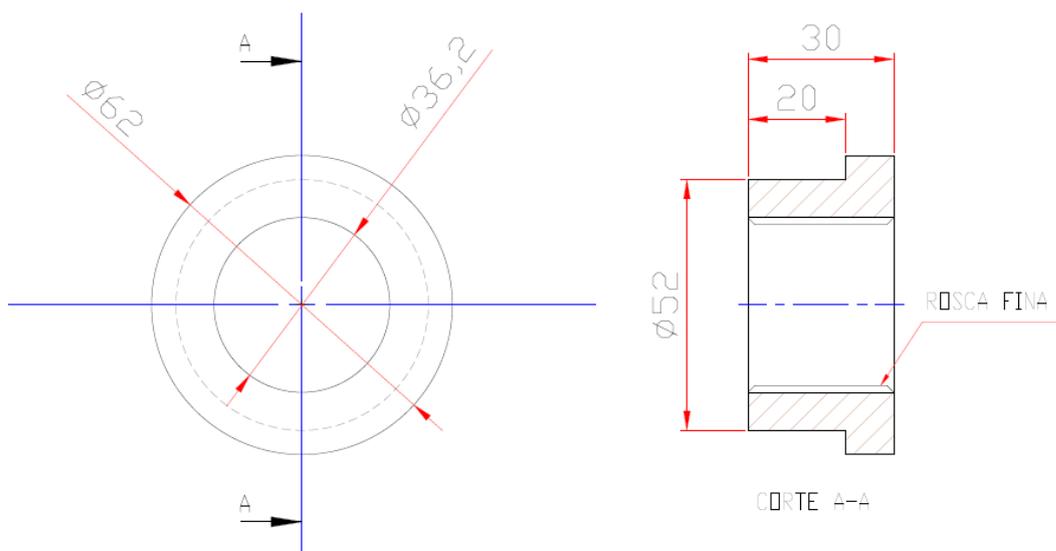


Figura 46: Peça de apoio da estrutura de proteção.

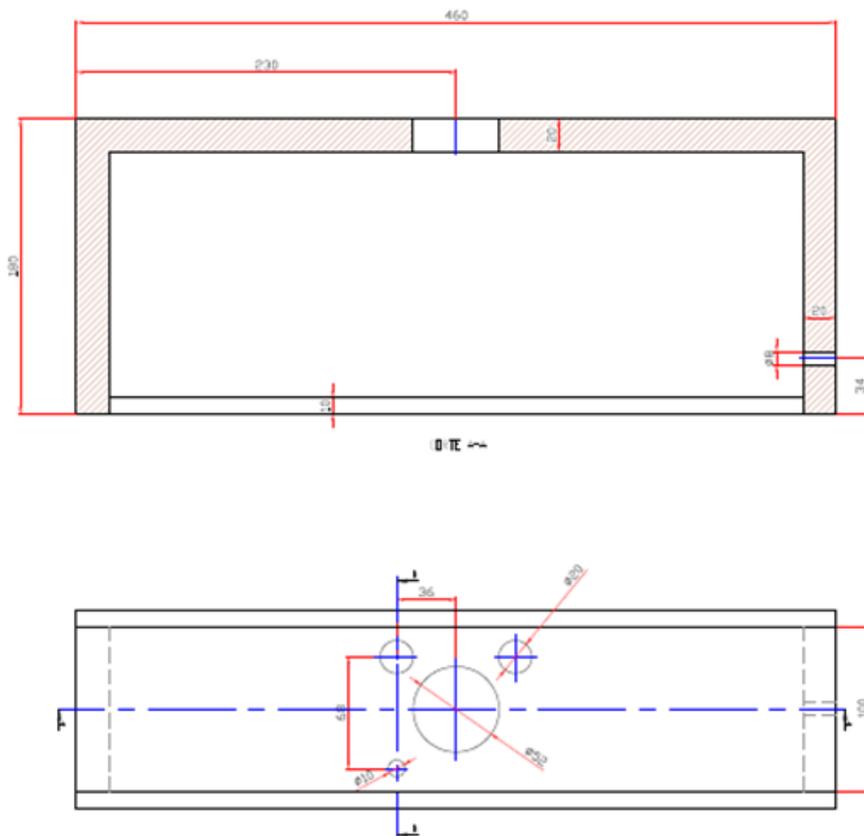


Figura 47: Trave de sustentação do tubo de proteção.

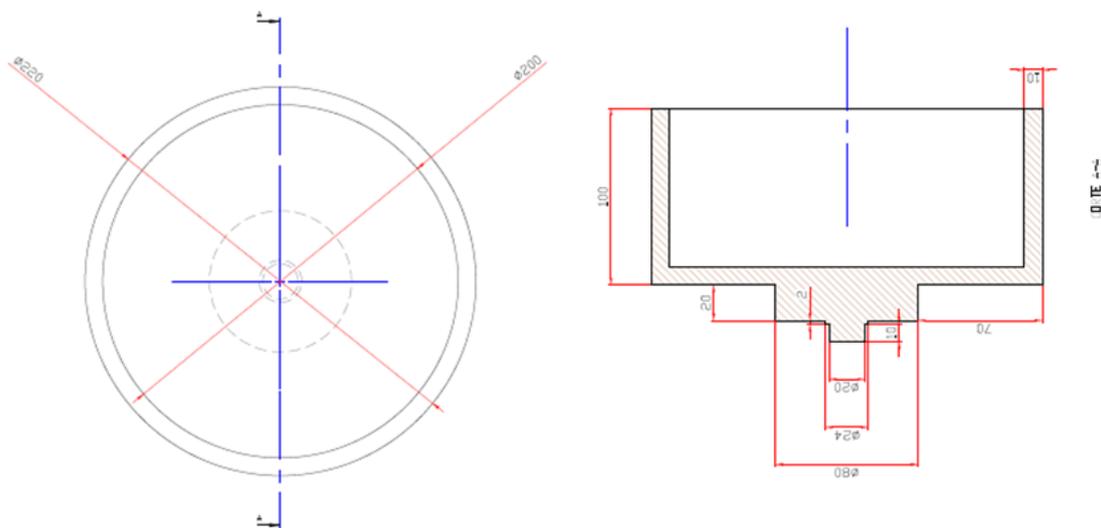


Figura 48: Cuba para colocação do fluido e da amostra de rocha.

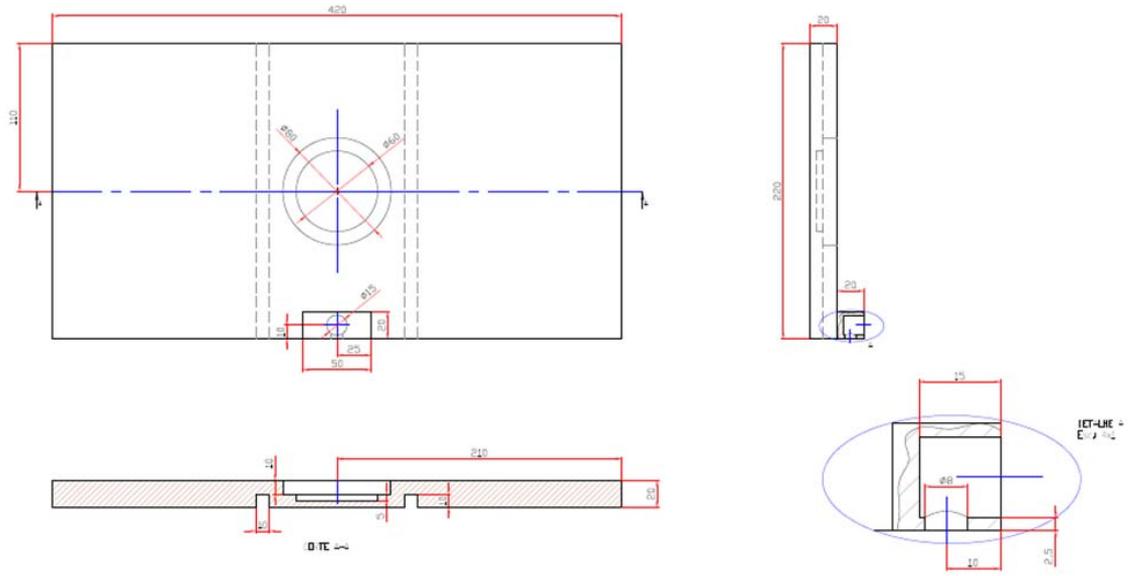


Figura 49: Base de apoio para o motor de passo integrado.

14

Anexo A: Cálculo da Energia Específica

A energia específica é constantemente utilizada para comparar o desempenho dos diversos métodos de perfuração e, segundo a definição corrente, é a da quantidade de energia necessária para remover um determinado volume de rocha (energia/volume). Sendo assim, um método normalizado para comparar a eficiência de uma técnica de destruição da rocha com as demais. Vários trabalhos comparam a energia específica demandada pelo laser e outras técnicas como a perfuração rotativa convencional.

Cálculos da energia específica obtidos a partir de experimentos de laboratório realizados por Graves *et al.*, (2002) com quatro tipos de laser de alta energia foram comparados com valores de energia específica obtidos da literatura. As comparações foram feitas com amostras do arenito Berea e, segundo os autores, a forma da amostra e as condições do teste influenciam os resultados. Além desta questão, foi identificada alguma imprecisão na maneira pela qual a energia específica é calculada. No trabalho apresentado pelos autores a energia específica conforme definida no trabalho foi comparada com a energia específica *Kerfing*, que é definida como sendo a potência pela profundidade *kerf* multiplicada pela velocidade com que o mecanismo de corte atravessa a rocha. Na literatura consultada, as comparações apresentadas não consideravam o tipo de rocha ou a dimensão da amostra em relação à densidade de potência aplicada pelo laser.

Tabela 16: Definições para o cálculo da energia específica.

Nome	Dimensões	Variáveis	Definições
1. Energia específica Perfuração rotativa (Simon, 1963)	$\frac{M}{L^2}$	$Ev = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{P}{D^2 \cdot R} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot N}{D^2 \cdot R}$	Ev = Energia P = Potência (Watts) D = Diâmetro (m) R = Taxa de penetração (m/s) L = Torque (kg.m) N = RPM (1/s)
2. Energia específica Perfuração percussiva (Simon, 1963)	$\frac{M}{L * t^2}$	$Ev = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{P}{D^2 \cdot R} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{f \cdot E}{D^2 \cdot R}$	Ev = Energia P = Potência (Watts) D = Diâmetro (m) R = Taxa de penetração (m/s) f = frequência percussão (1/s) E = Trabalho por impacto (J)
3. Energia específica (Teale, 1965)	$\frac{M}{L^2}$	$e = \left(\frac{F}{A} \right) + \left(\frac{2 \cdot \pi}{A} \right) * \left(\frac{N \cdot T}{\mu} \right)$	E = Energia F = Peso (Kg) A = Área do furo (m ²) N = RPM (1/s) T = Torque (Kg.m) M = taxa de penetração (m/s)
4. Energia específica (Maurer, 1980)	$\frac{M}{L * t^2}$	$SEv = \frac{P}{dV / dt}$	SEv = Energia específica P = Potência (Watts) dV/dt = derivada do volume em relação ao tempo (m ³ /s)
5. Energia específica Kerfing (Maurer, 1980)	$\frac{M}{t^2}$	$SEv = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot R}$	SEv = Energia específica Kerfing (J/cm ²) P = Potência (Watts) D = Diâmetro do furo (m) R = Taxa de penetração (cm/s)
6. Energia específica (Rabia, 1982)	$\frac{M}{L * t^2}$	$SEv = \frac{w \cdot N}{d \cdot PR}$	SEv = Energia específica w = Peso sobre broca (Kg) N = RPM (1/s) D = Diâmetro (m) PR = Taxa de penetração (m/s)
7. Energia específica (Rabia, 1982)	$\frac{M}{L^2}$	$SEv = \frac{4 \cdot Tr \cdot PO}{\pi \cdot d^2 \cdot PR}$	SEv = Energia específica Tr = Taxa de transferência PO = Potência de saída (Watts) d = Diâmetro (m) PR = Taxa de penetração (m/s)

Fonte: Graves R., et al, 2002

A energia específica segundo a definição de Maurer é a quantidade de energia específica requerida para remover uma unidade de volume de rocha e, esta é a definição utilizada para as comparações apresentadas na Tabela 16, onde a unidade utilizada é kJ/cm^3 .

$$SE = \frac{\text{Energia aplicada}}{\text{Volume Removido}} = \frac{P}{dV / dt} \quad (\text{A.1})$$

É definido, também, o termo energia específica Kerfing (SKE), sendo este um termo utilizado para descrever o processo de corte e fragmentação da rocha.

$$SKE = \frac{\text{Energia aplicada}}{\text{Kerf área}} = \frac{\text{Potência}}{\text{Profundidade Kerf} * \text{velocidade}} \quad (\text{A.2})$$

Maurer afirma que, uma vez determinada em laboratório ou em teste de campo, o valor da SKE, a potência *Kerfing*, pode ser calculada e as comparações podem ser feitas com outros sistemas.

A Tabela 17 mostra a energia específica demandada por alguns métodos de fragmentação e remoção de rocha. Por sua vez, a Tabela 18 mostra a energia específica obtida para o arenito Berea, considerando diferentes tipos de laser.

Tabela 17: Energia específica dos métodos de perfuração.

Método de perfuração	Energia específica (kJ/cm³)	Referências
Jato cavitante	2,9	Conn & Radtke, 1977
Jato de água de alta pressão	134,7	Mellor, 1972
Jato de água de alta pressão	0,9	Summer & Henry, 1972
Jato de água de alta pressão	0,3	Summer & Henry, 1972
Perf. rotativa adiamantada	1,4	Maurer, 1968
Perf. Rotativa - broca draga	0,4	Maurer, 1968
Perf. rotativa - broca cones	0,8	Maurer, 1968
Laser CO ₂	37,4	Graves, <i>et al.</i> , 2002
Laser CO	22,8	Graves, <i>et al.</i> , 2002
Laser COIL	7,2	Graves & Batarseh, 2001
ND:YAG	5,9	Figuerola, <i>et al.</i> , 2002

Fonte: Graves R., *et al*, 2002

Tabela 18: Energia específica de diferentes tipos de Laser para o arenito Berea.

<u>Laser</u>	<u>Potência (kW)</u>	<u>Densidade de potência (kW/cm²)</u>	<u>Energia específica (kJ/cm³)</u>
CO ₂ *	10,0	26,0	37,4
CO ₂ *	5,0	13,0	50,4
CO ₂ **	N/A	-1000	34,1
CO	N/A	-1000	22,8
COIL	6,3	123,6	31,8
COIL	5,3	139,6	26,5
COIL	2,8	35,2	6,8
COIL	1,5	16,4	7,2
Nd:YAG	1,2	1,7	31,0
Nd:YAG	1,2	0,9	16,2
Nd:YAG	0,5	0,3	17,5
Nd:YAG	0,5	0,4	22,2

* Fonte: Wright – Base Aérea Patterson, Ohio, USA.

** Fonte: Instituto de Radiofísica Lebedev, Moscou, Rússia.