



Luiz Felipe Orlando Gama

**Estudo de otimização de energia específica aplicada à
perfuração de rochas a laser na indústria do petróleo**

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
Coorientador: Prof. Giancarlo Vilela de Faria

Rio de Janeiro
Setembro de 2014



Luiz Felipe Orlando Gama

**Estudo de otimização de energia específica aplicada à
perfuração de rochas a laser na indústria do petróleo**

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

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Giancarlo Vilela de Faria

Coorientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luiz Carlos Guedes Valente

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Junior

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Cícero Martelli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de setembro de 2014

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

Luiz Felipe Orlando Gama

Graduou-se em Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (CEFET-RJ), em 2010. Atualmente, tem estudado a viabilidade na utilização de lasers de alta potência para perfurar rochas encontradas na indústria do petróleo.

Ficha Catalográfica

Gama, Luiz Felipe Orlando

Estudo de otimização de energia específica aplicada à perfuração de rochas a laser na indústria do petróleo / Luiz Felipe Orlando Gama; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga; coorientador: Giancarlo Vilela de Faria. – 2014.

96 f. : il. (color) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Perfuração a laser. 3. Corte a laser. 4. Energia específica. 5. Rocha carbonática. 6. Pré-sal. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Faria, Giancarlo Vilela de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Arthur Braga e coorientador Professor Giancarlo de Faria pelo estímulo, dedicação e conhecimentos compartilhados para a realização deste trabalho.

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

À minha família – pais, irmão, padrinhos, avós e tios –, pelo apoio, amor e pela segurança de estarem sempre ao meu lado.

À minha noiva, Maria Carolina, pelo amor e pela inspiração de querer me tornar uma pessoa e um profissional melhor a cada dia.

Aos meus colegas da PUC-Rio – Hugo, Paulo Henrique e Dario –, que foram excelentes companhias durante o Mestrado e que me ajudaram sempre que precisei.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora, pelo tempo dispendido e pela contribuição no aperfeiçoamento deste trabalho.

Resumo

Gama, Luiz Felipe Orlando; Braga, Arthur Martins Barbosa. **Estudo de otimização de energia específica aplicada à perfuração de rochas a laser na indústria do petróleo.** Rio de Janeiro, 2014. 96p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As atividades de perfuração e completção de poços de petróleo são as que mais demandam tempo e dinheiro entre os mais variados processos que compõem os sistemas de exploração e produção de óleo e gás. Por isso, qualquer avanço nessa área poderia representar valores bastante expressivos em uma indústria de bilhões e com investimentos cada vez maiores. Partindo desse princípio, há uma linha de pesquisa, iniciada em 1997 pelo *Gas Technology Institute*, que estuda a aplicação de lasers de alta potência nos processos de construção de poços. Desde então, vários experimentos que destacaram as potenciais vantagens do laser em relação aos sistemas convencionais foram realizados. Tomando como base essa premissa, o objetivo desta dissertação é aprofundar os estudos acerca da interação entre laser e rocha. Existe um interesse especial deste trabalho relacionado ao pré-sal brasileiro, por isso a maioria dos experimentos foi feita com a utilização de rochas carbonáticas. Assim, foram realizadas análises de eficiência por meio dos conceitos de energia específica. Além disso, abordou-se a perfuração também de forma dinâmica, baseado em estudos de energia específica de corte. Essa consideração foi feita com o intuito de se alcançar maiores diâmetros comparados às pequenas dimensões geradas pelo feixe do laser em processos estáticos. A ideia é fornecer maiores informações resultantes desses processos e contribuir para que seja estudada a viabilidade no desenvolvimento de futuras ferramentas a laser.

Palavras-chave

Perfuração a laser; corte a laser; energia específica; rocha carbonática; pré-sal.

Abstract

Gama, Luiz Felipe Orlando; Braga, Arthur Martins Barbosa (Advisor). **Study of specific energy optimization applied to laser rock drilling in petroleum industry**. Rio de Janeiro, 2014. 96p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Within the petroleum exploration and production process, well drilling and completion are the activities that require a greater investment of both time and money. Because of this, any evolution in this area could represent significant values within this billion dollar industry which has continuously growing investments. Thus, the Gas Technology Institute started a line of research in 1997, which studies the high power laser application in the well construction process. Since this study, many experiments have been realized, which have highlighted the laser potential advantages compared to the conventional systems. Accordingly, the intention of this work is to further these studies of the interaction between laser and rock. There is a special interest in Brazilian pre-salt and because of this, most experiments were conducted using carbonate rocks. Therefore, efficiency analysis was made based on the specific energy concept. In addition to this, drilling was also approached as a dynamic process using the specific kerfing energy study. This consideration was made with the objective of achieving higher diameters compared to the small dimensions that are created by the laser beam in static process. These experiments have been conducted with the intention of generating and contributing even more information, thus, we can better study the development feasibility of future laser tools.

Keywords

Laser drilling; laser kerfing; specific energy; carbonate rock; pre-salt.

Sumário

1 Introdução	15
1.1. Objetivo	17
1.2. Motivação	18
1.3. Tecnologia atual	20
1.3.1. Perfuração	20
1.3.2. Completação	23
1.4. LASER	25
1.5. Estrutura da dissertação	28
2 Estado da arte	17
3 Estudo de eficiência	30
3.1. Energia específica	30
3.2. Energia específica de corte	40
3.3. Sistema de corte em túnel	42
4 Experimentos	39
4.1. Ambiente de testes e equipamentos	39
4.2. Rochas utilizadas	49
4.3. Procedimentos experimentais	53
5 Resultados e discussões	45
5.1. Ensaios de perfuração	56
5.1.1. Travertino e Bege Bahia	56
5.1.2. Arenito	67
5.1.3. Folhelho	73
5.2. Ensaios de corte	75
5.3. Ensaios de corte em túnel	81
6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	55

6.1. Conclusões	55
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	92
7 Referências Bibliográficas	91

Lista de tabelas

Tabela 1: Análise semi quantitativa por fluorescência de raio-X do Travertino.	50
Tabela 2: Análise semi quantitativa por fluorescência de raio-X do Bege Bahia.....	52
Tabela 3: análise quantitativa de fases do Bege Bahia pelo método de Rietveld.	52
Tabela 4: Valores de volume removido e de energia específica para o Travertino.	57
Tabela 5: Valores de volume removido e de energia específica para o Bege Bahia.....	57
Tabela 6: Valores de volume removido e de energia específica para o Travertino com a mesma energia.....	60
Tabela 7: Valores de volume removido e de energia específica para o Bege Bahia com a mesma energia.	60
Tabela 8: Resultados de volume removido e de energia específica em diferentes pontos de uma amostra de Bege Bahia.....	62
Tabela 9: Resultados médios de volume removido e de energia específica em uma amostra de Bege Bahia.	63
Tabela 10: Resultados de profundidade média e de taxa de penetração aplicando diferentes potências e tempos ao longo de uma amostra de Bege Bahia.	65
Tabela 11: Valores de volume removido e de energia específica em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3825 pés.	67
Tabela 12: Valores de volume removido e de energia específica, durante quatro segundos em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3825 pés.....	68
Tabela 13: Valores de volume removido e de energia específica, durante dois segundos, em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3833 pés.....	70

Tabela 14: Valores de volume removido e de energia específica, durante 4quatro segundos, em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3833 pés.....	71
Tabela 15: Valores de volume removido e de energia específica, durante dois segundos, em um testemunho de folhelho.	73
Tabela 16: Valores de volume removido e de energia específica, durante 4 segundos em um testemunho de folhelho.....	74
Tabela 17: Resultados de profundidade média e de energia específica de corte para o Bege Bahia, utilizando-se 1000W de potência e diâmetro de feixe de 3,5mm.	76
Tabela 18: Resultados de profundidade média e de energia específica de corte para o Bege Bahia utilizando-se 1400W de potência e diâmetro de feixe de 3,5mm.	77
Tabela 19: Resultados de profundidade média e de energia específica de corte para o Bege Bahia utilizando-se 1000W de potência e diâmetro de feixe de 1,5mm.	78
Tabela 20: Resultados de profundidade média e de energia específica de corte para o Bege Bahia utilizando-se 1400W de potência e diâmetro de feixe de 1,5mm.	79
Tabela 21: Valores de tempo, taxa de penetração e energia específica em função dos espaçamentos entre os cortes.....	88

Lista de figuras

Figura 1: Equipamentos básicos de uma sonda de perfuração.	21
Figura 2: Coluna de perfuração e suas partes.	22
Figura 3: Brocas com cortadores móveis.	23
Figura 4: Etapas do canhoneio na completação de um poço de petróleo.	24
Figura 5: Representação do fraturamento hidráulico na estimulação de reservatórios.	24
Figura 6: Integrantes de um sistema a laser.	25
Figura 7: Experimento de perfuração a laser utilizando múltiplos feixes.	34
Figura 8: Relação entre potência e custo do laser a fibra de 1995 até hoje.	37
Figura 9: Representação dos parâmetros de perfuração.	39
Figura 10: Representação dos parâmetros de corte.	41
Figura 11: Representação de um sistema de corte em túnel.	43
Figura 12: Componentes do laser a fibra embarcados no gabinete.	46
Figura 13: Software de configuração e controle do laser e do chiller.	47
Figura 14: Estrutura de controle de posição do laser.	47
Figura 15: Cabeça de injeção e suas partes.	48
Figura 16: Câmera com tecnologia infravermelha.	49
Figura 17: Perda de massa do Travertino em função da temperatura.	51
Figura 18: Perda de massa do Bege Bahia em função da temperatura. ...	53
Figura 19: Mecanismos de desintegração de rocha.	56
Figura 20: Amostras de Travertino e de Bege Bahia.	57
Figura 21: Comparação entre a energia específica do Bege Bahia e a do Travertino em função da potência.	58
Figura 22: Amostra de Travertino após a aplicação do laser.	59
Figura 23: Bloco de Bege Bahia perfurado em diferentes pontos ao longo da sua superfície.	61

Figura 24: Valores de energia específica para diferentes potências ao longo de uma amostra de Bege Bahia.	63
Figura 25: Valores médios de energia específica para diferentes potências em uma amostra de Bege Bahia.....	64
Figura 26: Valores de taxa de penetração para diferentes profundidades ao longo de uma amostra de Bege Bahia.....	66
Figura 27: Furos realizados em um bloco de Bege Bahia para medir a taxa de penetração em função da profundidade.	67
Figura 28: Valores de energia específica para diferentes potências, durante dois segundos, em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3825 pés.....	68
Figura 29: Valores de energia específica para diferentes potências, durante quatro segundos em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3825 pés.....	69
Figura 30: Testemunho de arenito retirado de uma profundidade de 3825 pés, antes e depois da aplicação do laser.....	69
Figura 31: Valores de energia específica para diferentes potências, durante dois segundos em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3833 pés.....	70
Figura 32: Valores de energia específica para diferentes potências, durante quatro segundos, em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3833 pés.....	71
Figura 33: Testemunho de arenito retirado de uma profundidade de 3833 pés, antes e depois da aplicação do laser.....	72
Figura 34: Valores de energia específica para diferentes potências, durante dois segundos, em um testemunho de folhelho.	73
Figura 35: Valores de energia específica para diferentes potências, durante quatro segundos, em um testemunho de folhelho.	74
Figura 36: Amostra de folhelho após a aplicação do laser.....	75
Figura 37: Valores de energia específica de corte para diferentes velocidades e densidade de potência de 10,4 kW/cm ²	77
Figura 38: Valores de energia específica de corte para diferentes velocidades e densidade de potência de 14,6 kW/cm ²	78

Figura 39: Valores de energia específica de corte para diferentes velocidades e densidade de potência de 56,5 kW/cm ²	79
Figura 40: Valores de energia específica de corte para diferentes velocidades e densidade de potência de 79,1 kW/cm ²	80
Figura 41: Diferença entre cortes realizados com diâmetros de feixe de 1,5mm e 3,5mm em amostra de Bege Bahia.....	81
Figura 42: Corte em túnel realizado com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 5mm.....	82
Figura 43: Corte em túnel realizado duas vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 5mm.....	83
Figura 44: Corte em túnel realizado três vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 5mm.....	83
Figura 45: Corte em túnel realizado cinco vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 5mm.....	83
Figura 46: Corte em túnel realizado com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 2,5mm.....	84
Figura 47: Corte em túnel realizado 2 vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 2,5mm.	84
Figura 48: Corte em túnel realizado três vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 2,5mm.....	85
Figura 49: Corte em túnel realizado cinco vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 2,5mm.....	85
Figura 50: Corte em túnel realizado com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 1,25mm.....	86
Figura 51: Corte em túnel realizado duas vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 1,25mm.....	86

Figura 52: Corte em túnel realizado três vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 1,25mm.....	86
Figura 53: Corte em túnel realizado cinco vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 1,25mm.....	87
Figura 54: Corte em túnel realizado cinco vezes sobre o mesmo ponto.	87

Nomenclatura

BHA – *Bottom Hole Assembly*

EE – Energia específica

EEC – Energia Específica de Corte

LWD – *Logging While Drilling*

MWD – *Measurement While Drilling*

PDC – *Polycrystalline Diamond Compact*

ROP – *Rate of Penetration*

LASER – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*

λ – Comprimento de onda (m)

E – Energia (J)

h – Constante de Planck (J.s)

c – Velocidade da Luz (m.s-1)

CW – *Continuous Wave*

RP – *Range-gated Pulsed*

MIRACL – *Mid-infrared advanced chemical laser*

COIL – *Chemical Oxygen Iodine Laser*

HF – Fluoreto de hidrogênio

DF – Fluoreto de deutério

HPFL – High Power Fiber Laser

Introdução

Em 1850, na Escócia, o químico britânico James Young descobriu que uma importante fonte de energia podia ser extraída do carvão e do xisto betuminoso. Para transformar aquela substância rica em hidrocarbonetos em algo realmente útil, ele desenvolveu o processo de refinação, viabilizando a utilização do petróleo em diferentes aplicações [1].

A partir daí, a busca pelo petróleo intensificou-se e inúmeros poços foram perfurados na segunda metade do século XIX. Edwin Laurentine Drake foi o responsável pela construção do primeiro poço de petróleo dos Estados Unidos, no estado da Pensilvânia, em 1859. Com uma profundidade de 21 metros, o poço mostrou-se produtor e marcou definitivamente o início da indústria petrolífera moderna [1].

Desde então, o petróleo ganhou força ao redor do mundo e, com o passar do tempo, tornou-se a fonte de energia mais importante do planeta. Isso foi possível em virtude do reconhecimento do potencial dessa substância, resultando em grandes investimentos destinados à indústria de exploração de hidrocarbonetos. Assim, houve uma intensa evolução desde a perfuração do poço liderada por Edwin Drake, para a qual, na época, foi utilizada uma ferramenta que se chocava contra o solo, uma espécie de bate estaca [1].

Devido a toda essa atenção voltada para a indústria do petróleo, foi possível driblar diversas previsões de esgotamento da matéria. Em 1948, a razão entre as reservas de óleo provadas e a produção indicaram um tempo de vida remanescente de 20,5 anos para as reservas existentes. Já em 1973, essa relação aumentou para 32,7 anos e, em 2005, 32 anos mais tarde, a estimativa passou para 38 anos [2]. Toda essa reviravolta comprovou que o tempo de vida do petróleo dependia antes de mais nada do desenvolvimento tecnológico e que o mesmo não poderia estagnar-se caso ainda existisse interesse pela substância.

Atrelado a isso, a perfuração e completação de poços de petróleo são as atividades que mais demandam tempo e dinheiro nesse setor [3] entre as várias

etapas, desde as pesquisas sísmicas para detecção de novos campos até o tratamento do composto já nas refinarias. Por isso, muitos esforços relacionados ao desenvolvimento de novas tecnologias, que aprimorem os métodos atuais, vêm acontecendo. Entre eles, o estudo para a aplicação de lasers de alta potência na indústria de óleo e gás, mais especificamente como agente removedor de rocha. Essa linha de pesquisa tornou-se importante a partir de 1997, quando o *Gas Technology Institute* iniciou seus trabalhos nessa área [4].

A partir desse fato, o laser passou a ter o seu potencial reconhecido na perfuração de rochas e, por isso, acredita-se que, um dia, a sua aplicação, renovando as atuais ferramentas, irá acontecer. Porém, muitos estudos ainda precisam ser conduzidos, de forma que as potenciais vantagens sejam mais desenvolvidas e que sejam capazes de superar os desafios provenientes da inserção dessa nova tecnologia.

1.1. Objetivo

O objetivo desta dissertação é investigar a eficiência do laser como instrumento de perfuração de rochas, principalmente de origem carbonática. Para isso, foram realizados diversos ensaios em laboratório com o intuito de ajustar as variáveis envolvidas no processo de desintegração de rochas e determinar os valores de energia específica. Além disso, o propósito do trabalho foi fornecer dados que possam contribuir com o desenvolvimento das ferramentas a laser que, talvez, um dia, possam viabilizar a substituição dos atuais mecanismos utilizados na perfuração e completação de poços de petróleo.

A fim de se alcançar o objetivo exposto, tornou-se necessário o cumprimento de algumas etapas:

- **Pesquisa bibliográfica**

- Tecnologia a laser;

- Óptica;

- Diferentes tipos de rochas e suas propriedades;

- Perfuração de rochas com a utilização de lasers;

- Técnicas atuais de perfuração e completação de poços de petróleo;

Energia Específica.

- **Preparação e ajustes do ambiente de testes**

Configuração e montagem dos equipamentos e ferramentas em laboratório;
Seleção e aquisição de amostras e testemunhos.

- **Ensaio de perfuração e de corte**

Aplicação de laser em diferentes tipos de rochas.

- **Coleta e análise dos resultados**

Medição dos experimentos realizados;
Cálculo das Energias Específicas nas diferentes aplicações;
Ajuste das variáveis;
Aplicação dos resultados no sistema de corte em túnel.

1.2. Motivação

A motivação para a elaboração desta dissertação está, principalmente, na possibilidade de gerar dados que contribuam para a construção das ferramentas que façam uso do laser para perfurar rochas. O estudo do processo no campo da interação entre laser e rocha fornece dados essenciais ao desenvolvimento desses mecanismos, como a análise de viabilidade por meio do estudo de energia específica. Além disso, é possível determinar as características e configurações dos equipamentos envolvidos que tornam o sistema mais eficiente. Essas pesquisas são realizadas considerando tanto os processos estáticos, como os dinâmicos, ainda pouco estudados quando aplicados em rochas na indústria do petróleo.

Em paralelo a isso, as motivações referentes à introdução da tecnologia a laser na área de óleo e gás baseiam-se, principalmente, nos testes observados a partir de experimentos realizados em laboratório e nas possíveis vantagens sustentadas teoricamente. Assim, os argumentos mais utilizados por especialistas a fim de destacar a importância da utilização do laser na perfuração e completação de poços são:

Maior controle na geometria do furo – no que diz respeito à perfuração do poço, os atuais sistemas mecânicos não possuem precisão, geram furos maiores do que o necessário e repletos de tortuosidades. Isso gera maior gasto com materiais e folgas para a coluna, que pode entrar em estado de flambagem e ser danificada ao se chocar com a parede do poço. Esses danos também estão presentes na formação, podendo comprometer a sua estrutura [21]. Por outro lado, pensando na estimulação de reservatórios, o faturamento hidráulico é difícil de controlar e, muitas vezes, a fratura propaga-se por áreas não desejadas [44], o que poderia ser contornável utilizando-se lasers.

Aprimoramento do controle e rastreamento do poço – o fato de a coluna de perfuração ser rotativa prejudica o funcionamento e a comunicação de equipamentos, como LWD e MWD, os quais estão posicionados no fundo do poço, na extremidade inferior da coluna (BHA). Essas informações são transmitidas até a superfície por pulso de lama, o que gera restrições na quantidade e na velocidade dos dados [21]. O uso de uma ferramenta a laser poderia dispensar a necessidade de rotação da coluna, permitindo a condução de fibra óptica no seu interior e melhorando imensamente a qualidade da comunicação.

Aumento da permeabilidade – os sistemas de canhoneio convencionais danificam a formação, diminuindo a porosidade e a permeabilidade na área atingida. Já o aquecimento gerado pela aplicação do laser causa microfissuras que aumentam a permeabilidade local. Isso ocorre devido à desidratação da argila (transformação de líquido em gás, gerando expansão e aumentando da pressão de poros) e do craqueamento térmico provocado pela indução do laser (o quartzo dilata em até 1,75% do seu tamanho). Alguns estudos registraram um aumento de 500 a 1000% de permeabilidade utilizando-se laser de alta potência para perfuração de arenito [5]. Assim, foi descoberto que a energia térmica transferida para a rocha melhorava as características de escoamento dos fluidos enquanto o material era removido.

Redução do tempo – acreditava-se já nos primeiros estudos que alguns lasers seriam capazes de obter um desempenho no tempo de perfuração 100 vezes mais rápido do que os sistemas convencionais [4]. Em termos de exemplificação, nas rochas duras, as taxas de penetração obtidas por brocas convencionais com cortadores de PDC ou impregnadas situam-se na faixa de 2,0 a 3,0 m/h [6]. Assim, a utilização de lasers poderia solucionar o problema de taxas tão baixas.

Considerando-se ainda a construção de um poço, estudos mostram que o tempo de perfuração com broca é dividido em 50% para perfurar, 25% para as manobras e 25% para revestir e cimentar [7]. Sendo assim, além da redução de tempo correspondente à perfuração, pelo aumento da taxa de penetração, existiria ainda a eliminação das manobras, já que não seria mais necessária a substituição da broca, seja por desgaste ou por compatibilidade com o solo.

Redução do custo – durante a construção do poço, as brocas e colunas precisam ser trocadas com certa frequência. Já com a utilização de laser, esses gastos poderiam ser diminuídos e ainda seria possível reduzir os materiais destinados à perfuração, uma vez que não é mais necessário tanto peso sobre a broca, e o furo pode ter um diâmetro menor desde a superfície. Algumas teorias mostram que, para alguns tipos de poços com determinadas formações, é possível criar uma espécie de revestimento natural na parede do poço, em função do calor transmitido pelo laser, dispensando os conhecidos tubos de aço [8]. Todos esses fatores levam a um tempo maior de utilização da sonda, que pode custar mais de 1 milhão de dólares por dia [9]. Logo, com a redução desse período, diminui-se o valor gasto. No geral, uma queda nos custos pode transformar reservas não econômicas em comerciais.

1.3. Tecnologia atual

Os equipamentos desenvolvidos até então para serem utilizados na indústria de óleo e gás já evoluíram bastante. Graças a eles, foi possível explorar e produzir petróleo com economicidade. Assim, antes de propor melhoramentos e tomando como referência as atividades de perfuração e completação, é preciso compreender aonde essas tecnologias chegaram e como elas funcionam.

1.3.1. Perfuração

A construção de um poço consiste na interligação entre a superfície e a zona de interesse. Para a realização dessa atividade, atualmente, utilizam-se as sondas de perfuração e seus equipamentos, as colunas, as brocas e os fluidos de perfuração.

Os equipamentos da sonda de perfuração compõem vários sistemas, como o de sustentação de cargas (torre, subestruturas e estaleiros), de geração e transmissão de energia (motores a diesel e turbinas a gás), de movimentação de carga (guincho, bloco de coroamento, catarina e cabos de aço), de rotação (mesa rotativa, top drive e swivel ou cabeça de injeção), de circulação (bomba de lama, tanques e sistemas de tratamento), de segurança do poço (cabeça de poço e preventores) e de monitoração (instrumentos de controle).

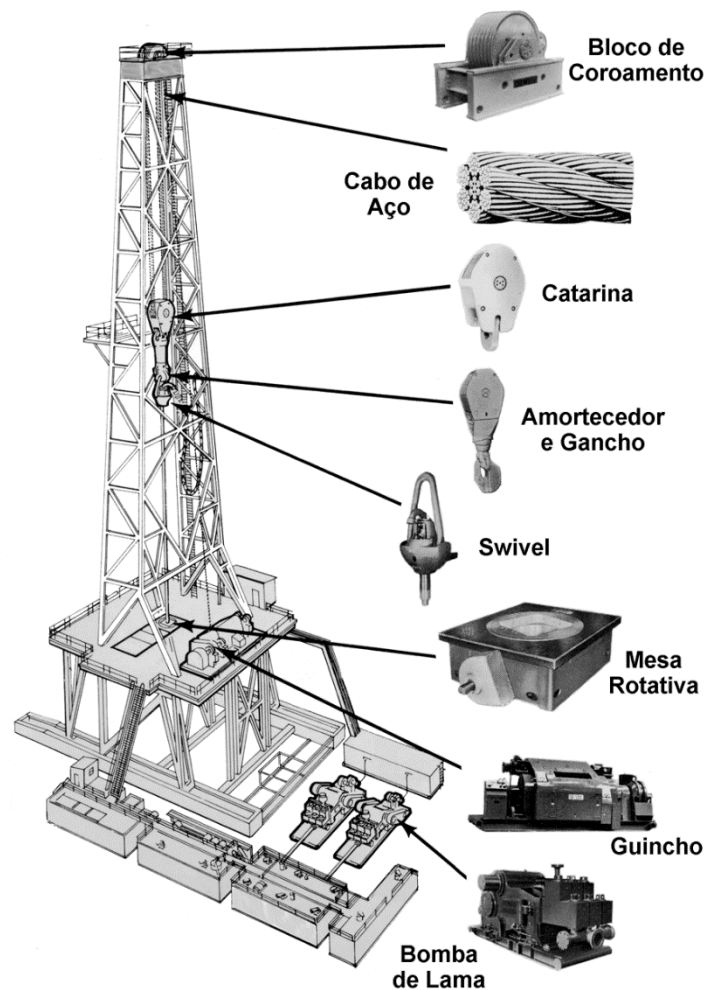


Figura 1: Equipamentos básicos de uma sonda de perfuração [1].

As colunas de perfuração são formadas por partes diferentes, cada uma com sua função. Os tubos de perfuração, ou *Drill Pipes*, representam a maior parcela da coluna e são os componentes que permitem o alongamento da mesma até o objetivo. Os comandos, ou *Drill Collars*, são responsáveis, principalmente, por fornecer peso sobre a broca e prover rigidez à coluna. Por isso, são fabricados com aço e podem

ser lisos ou espiralados. Os tubos pesados, ou *Heavy Weight Drill Pipes*, têm a função de promover uma transição de rigidez mais suave entre os comandos e os tubos de perfuração, dificultando a ocorrência de falhas por fadiga.

Entre os acessórios, estão os substitutos, ou *Subs*, que são responsáveis principalmente pela conexão dos tubos e da broca. Os estabilizadores possuem os mesmos diâmetros das brocas e, por isso, garantem maior rigidez e estabilidade à coluna, reduzindo a sua folga no interior do poço. Os alargadores proporcionam o aumento do diâmetro de um trecho já perfurado, e os amortecedores absorvem as vibrações verticais da coluna de perfuração.



Figura 2: Coluna de perfuração e suas partes [38].

As brocas são, talvez, os equipamentos mais importantes da perfuração de poços. São elas que estarão efetivamente em contato com a formação, promovendo a destruição da rocha até que o objetivo seja alcançado. As brocas podem ser

classificadas por possuírem ou não partes móveis e apresentam jatos que permitem a passagem do fluido de perfuração apenas de dentro da coluna para o poço.



Figura 3: Brocas com cortadores móveis [1].

O fluido de perfuração desempenha também um papel de extrema importância na construção do poço. Entre suas inúmeras funções, pode-se destacar o carregamento dos cascalhos até a superfície, o resfriamento e a lubrificação da broca e da coluna, a estabilização das paredes do poço e o controle das geopressões. Ele é bombeado desde a superfície, passando por toda a coluna de perfuração e broca, e retornando pelo anular até o tanque de tratamento.

1.3.2. Completação

A completção de um poço é o processo pelo qual ele é equipado ou preparado para produzir. Em virtude do foco deste trabalho, serão abordados apenas os métodos de canhoneio e de faturamento hidráulico.

O canhoneio tem a função de conectar o reservatório com o fundo do poço. O mecanismo para tal consiste na descida de um dispositivo, basicamente um cilindro de aço com furos, pelo interior do poço até a região de interesse. Em seguida, por meio de cargas explosivas alojadas nos orifícios do canhão, a formação é atingida, o que permitirá o fluxo do petróleo para dentro do poço. Os canhões com dimensões reduzidas podem ser conduzidos até o fundo do poço pelo interior da coluna de produção, porém possuem cargas menores e, consequentemente, menor poder de penetração. Já os maiores, que dispõem de maior capacidade de perfuração, devem ser descidos por cabo ou fixados na parte inferior da coluna.

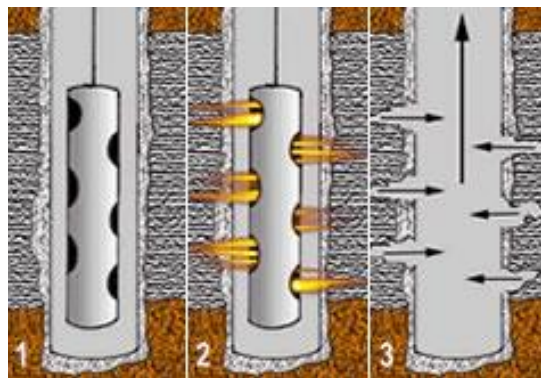


Figura 4: Etapas do canhoneio na completção de um poço de petróleo [39].

O fraturamento hidráulico é uma técnica presente na estimulação de reservatórios, responsável por antecipar a produção ou até mesmo por aumentá-la. Esse processo consiste no bombeio de um fluido especialmente elaborado sob alta pressão para dentro do reservatório. Essa operação resulta no fraturamento da área produtora, que, por sua vez, aumenta a permeabilidade e gera maior superfície de contato entre a rocha que armazena os hidrocarbonetos e o poço.

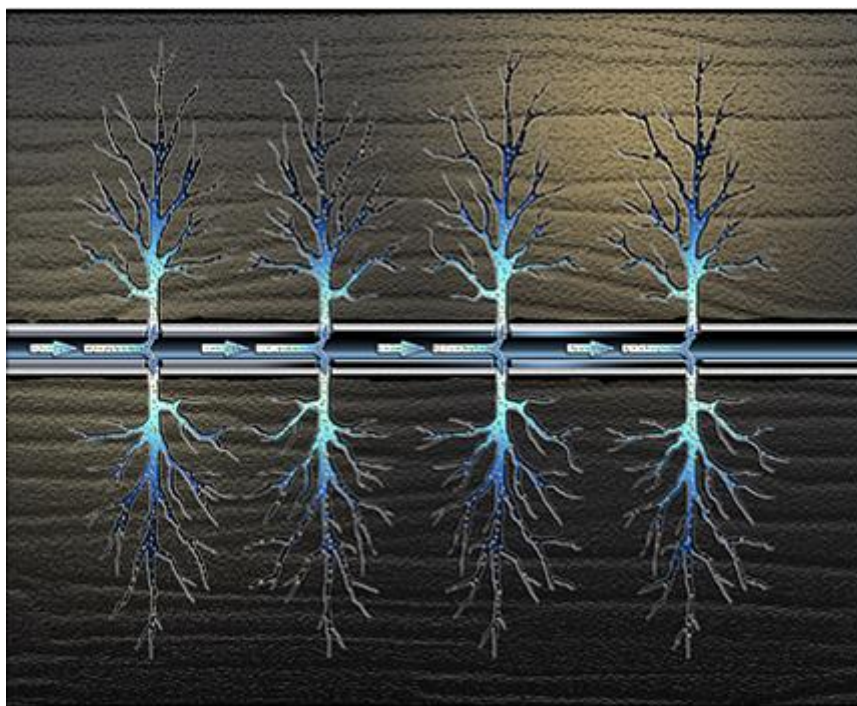


Figura 5: Representação do fraturamento hidráulico na estimulação de reservatórios [40].

1.4. LASER

O LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) é um dispositivo capaz de gerar radiação eletromagnética com algumas peculiaridades. A luz emitida possui um comprimento de onda muito bem definido (monocromática). As ondas propagam-se em fase (coerente), e os feixes são praticamente paralelos (colimados). Sua invenção só foi possível graças à teoria da emissão estimulada, desenvolvida por Albert Einstein, em 1917.

Nesse processo, certa quantidade de energia é fornecida a um átomo de maneira que os seus elétrons, que estão no estado fundamental, passem para estados excitados até ocorrer uma inversão de população (mais elétrons no estado excitado do que no fundamental). A tendência é que esses elétrons voltem naturalmente ao estado fundamental. Dessa forma, eles devolvem a energia fornecida anteriormente na forma de fóton, que pode ser refletido por meio de uma cavidade óptica. Isso faz com que o mesmo sirva para excitar outro elétron e, assim, sucessivamente.

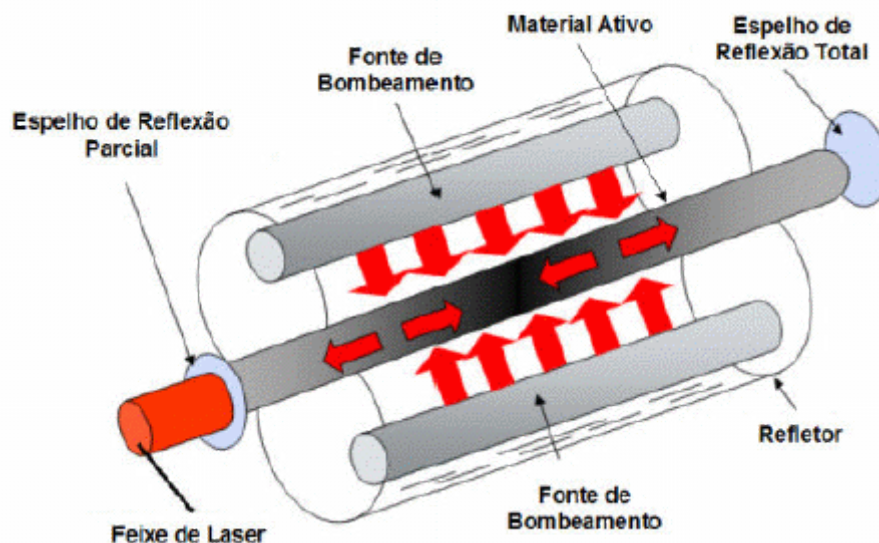


Figura 6: Integrantes de um sistema a laser [41].

O comprimento de onda do laser (λ) é definido pela diferença de energia, já que as espécies excitadas são estimuladas para um nível de energia mais baixo.

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1)$$

Onde,

E = Energia

h (constante de Planck) = $6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}$

c (velocidade da luz) = $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

Em geral, os estados quânticos referem-se aos níveis de vibração molecular para lasers com longo comprimento de onda, aos níveis orbitais de elétrons para radiação de laser visível e aos efeitos de ionização com lasers ultravioletas. A partir daí, vários tipos de lasers foram desenvolvidos com características próprias.

Entre os modelos de lasers mais conhecidos e utilizados na indústria de processamento de materiais, estão:

Lasers a gás: os lasers que utilizam diferentes tipos de gases foram desenvolvidos visando a vários objetivos. O mais conhecido é o laser de dióxido de carbono (CO_2), que pode emitir centenas de Watts em um feixe concentrado de milímetros de diâmetro, com um comprimento de onda de $10,6\mu\text{m}$ na faixa infravermelha. Eles podem operar tanto no modo contínuo (CW) como no modo pulsado (RP). As principais vantagens desse tipo de laser são a durabilidade e confiabilidade. A desvantagem está no grande comprimento de onda, que sofre grande atenuação através de fibra óptica. Eles são muito utilizados industrialmente em operações de corte e de solda.

Lasers químicos: esse tipo de laser funciona por meio de reações químicas que geram grande quantidade de energia a ser liberada de forma rápida. Apesar de terem algumas aplicações industriais, os lasers químicos foram desenvolvidos especialmente com interesse militar. Os mais conhecidos são o MIRACL e o COIL. O MIRACL (Mid-infrared advanced chemical laser) de Fluoreto de hidrogênio (HF) e Fluoreto de deutério (DF) tem comprimento de onda variando entre $2,6$ e $4,2\mu\text{m}$ na ordem de 1200 kW de potência. Ele foi usado na primeira série de testes em rochas reservatório e foi o primeiro na classe de megawatt contínuo. O COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser) opera com um comprimento de onda de $1,315\mu\text{m}$,

com potência na faixa de 100kW, e ganhou notoriedade quando foi instalado a bordo de um Boeing 747 para seguir e destruir mísseis.

Lasers de estado sólido: esses lasers usam uma barra cristalina ou de vidro, a qual é dopada com íons que fornecem os estados de energia requeridos. Esses materiais são opticamente excitados, normalmente por tubos de flash ou por outros lasers, utilizando um comprimento de onda menor do que o emitido. O dopante mais comum para essa categoria de lasers é o Neodímio, incluindo o Ortovanadato Ítrio (Nd:YVO₄), o Fluoreto de Ítrio lítio (Nd:YLF) e a Granada de Ítrio e alumínio (Nd:YAG). Todos esses lasers produzem elevadas potências no espectro infravermelho à 1064nm. Eles são utilizados, normalmente, para cortar, soldar e marcar metais e outros materiais. Outros dopantes comuns em lasers de estado sólido são o Itérbio (Yb:YAG – 2097nm), o Hólmio, o Túlio e o Érbio.

Lasers de semicondutores: trata-se de diodos que são bombeados eletricamente. Ao se aplicar corrente nesse componente, elétrons livres e lacunas combinam-se, gerando fótons. Estes, assim, são refletidos na junção e estimulam a liberação de mais fótons, que formarão o feixe laser. O comprimento de onda deste laser está, tipicamente, na faixa de 375nm à 3500nm. Eles são muito utilizados também como bombeio para outros tipos de lasers com alta eficiência, para lasers pointers, nos dispositivos de leitura e gravação de CD/DVD e, industrialmente, para corte e solda. Eles podem gerar altas potências com boa qualidade de feixe, comprimento de onda ajustável e pulsos ultrarrápidos.

Lasers à fibra: essa tecnologia consiste em guiar a luz gerada por lasers de estado sólido pelo interior de uma fibra óptica monomodo, de forma que ocorra reflexão total. Essa fibra, normalmente dopada com Érbio ou Itérbio, permite altos ganhos, uma vez que os fótons gerados no bombeio estimulam os elétrons presentes nela, que, por sua vez, emitem novos fótons. Os lasers à fibra são conhecidos por sua alta eficiência, por sua grande capacidade de potência, por sua fácil mobilidade, por sua baixa manutenção e por conseguirem levar o feixe a longas distâncias.

1.5. Estrutura da dissertação

Além da introdução, na qual foram apresentados o tema de pesquisa, os objetivos, a motivação e alguns conceitos básicos, esta dissertação está estruturada em mais cinco capítulos.

O capítulo 2 aborda o Estado da Arte, o qual faz referência às últimas pesquisas envolvendo lasers para perfuração de rochas. Como esse é um assunto bastante recente, o Estado da Arte foi organizado desde o primeiro estudo que introduziu a utilização de laser na indústria do petróleo até os dias atuais.

O capítulo 3 apresenta o estudo de Energia Específica, a qual investiga a eficiência do laser como agente removedor, que é o foco deste trabalho. No capítulo 4, são descritos os experimentos realizados em laboratório, que geraram resultados mostrados e discutidos no capítulo 5.

Por fim, no capítulo 6, foi estruturada a conclusão do trabalho, alcançada em função dos diversos experimentos realizados, dos seus resultados e dos estudos desenvolvidos.

Em 1997, o *Gas Technology Institute* (GTI, antigamente *Gas Research Institute*) iniciou os estudos para aplicação de laser em poços de petróleo juntamente com o *Colorado School of Mines*. Desde então, uma equipe constituída de membros do GTI, *Colorado School of Mines*, *Argonne National Laboratory* e *Parker Geoscience Consulting* tem estudado a viabilidade de criar poços de óleo e gás, utilizando lasers infravermelhos de alta potência. O estudo foi baseado em rochas do tipo xisto, arenito e calcário (70% das rochas perfuradas) [4].

Em setembro de 1998, um estudo pioneiro denominado “*StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas Wells*” foi apresentado na conferência técnica anual em Nova Orleans, Louisiana [4]. Ele descreveu os resultados da primeira fase de um programa de pesquisa financiado pelo *Gas Research Institute* (GRI). A proposta era avançar em uma mudança fundamental no método de perfurar e completar poços de gás natural, aplicando a tecnologia a laser *StarWars*, do departamento de defesa dos Estados Unidos.

O teste inicial em rochas reservatório utilizando o *Mid Infrared Advanced Chemical Laser* (MIRACL) mostrou o potencial do laser aplicado à perfuração, o qual indicou que a taxa de penetração poderia superar em até 100 vezes os sistemas convencionais. Os autores destacaram que, quando a antiga ferramenta de perfuração a cabo foi substituída pelo atual sistema de perfuração rotativo, houve grande resistência, mas que a tecnologia precisou evoluir.

Ramona M. Graves concluiu que a escolha do equipamento laser a ser utilizado nesse contexto era restrita a alguns modelos específicos. Afirmou que a radiação infravermelha era mais eficiente na destruição de estruturas rochosas do que a visível, não apenas pela disponibilidade de laser na faixa espectral, mas também como consequência das propriedades desses materiais atingidos. Ela destacou ainda que a física e a química da interação entre rocha e laser eram muito complicadas e que, por isso, vários experimentos com diferentes tipos de equipamentos e materiais deveriam ser realizados para se conhecer melhor esses

efeitos. Por último, comentou que os resultados experimentais poderiam ser usados para se encontrar uma estimativa da energia consumida e da taxa de penetração a partir da utilização de lasers para perfuração de rochas.

Já em outubro de 2001, o estudo *“Specific Energy for laser removal of rock”* foi submetido ao vigésimo congresso nacional em aplicação de lasers e eletro-ópticos, em Jacksonville, Flórida [10]. Zhiyue Xu ressaltou que a utilização de lasers de alta potência aplicados à perfuração de poços de óleo e gás estava ganhando força entre institutos de pesquisas, universidades e entre a própria indústria do petróleo. Citou ainda as vantagens em relação aos sistemas convencionais, como a alta taxa de penetração, a redução ou eliminação de manobras, a economia com revestimentos e brocas e o aprimoramento do controle de poço. Destacou ainda o termo denominado energia específica, que poderia representar a viabilidade técnica e econômica da perfuração de poços utilizando-se lasers. Assim, afirmou que o mecanismo mais eficiente na remoção de material rochoso seria aquele com o menor valor de energia específica.

Naquele estudo, um laser Nd:YAG pulsado de 1,6 kW foi utilizado para realizar testes de aplicação de feixe nas rochas e estabelecer correlações de energia específica. Os efeitos dos parâmetros de processamento do laser, como irradiação do feixe, energia por pulso, tempo de exposição e taxa de repetição de pulsos foram investigados. Dessa forma, descobriram-se diferentes zonas de interação entre laser e rocha desde o derretimento intenso até a incandescência. O mecanismo mais eficiente foi o de espalação térmica, no qual a rocha foi termicamente fraturada e removida do furo antes de qualquer derretimento ou vaporização, os quais requerem muito mais energia.

O estudo também demonstrou que o aumento na taxa de repetição do feixe, com o mesmo mecanismo removedor, elevaria a taxa de remoção de material devido ao aumento da temperatura máxima, à frequência cíclica térmica e à intensidade da onda laser conduzida até a rocha. A densidade de potência do feixe requerida para produzir as zonas de espalação térmica ficou em torno de 920 W/cm² para o arenito e 784 W/cm² para o xisto.

No mesmo mês do ano seguinte, Ramona M. Graves apresentou o trabalho *“Comparison of Specific Energy Between Drilling With High Power Lasers and Other Drilling Methods”* na Conferência e Exibição Técnica anual da SPE, em Santo Antônio, Texas [11]. O estudo baseou-se na comparação de energia

específica para perfuração utilizando-se lasers de alta potência e outros métodos como sistemas rotativos e jatos de água.

As energias específicas calculadas nesse trabalho foram comparadas com as encontradas anteriormente em laboratório, fazendo uso de quatro tipos de lasers de alta potência. Todas as comparações foram feitas com arenito, uma vez que essa é a rocha mais experimentada. Assim, foram incluídos na discussão o tipo de amostra, o formato e as condições experimentais que afetam os cálculos e resultados de energia específica.

A autora destacou que muita confusão é feita em virtude de como a energia específica é calculada e ainda fez comparações com energia específica de corte. Por isso, lembrou que deve existir o cuidado ao comparar diferentes tipos de energia específica e diferentes tipos de ferramentas utilizadas. Também foi comentado que, devido ao grande número de variáveis, mais simulações deveriam ser feitas, a fim de se determinar os parâmetros mais importantes do laser e das propriedades das rochas que influenciam nessa interação.

Em outubro de 2003, o estudo *“Well Perforation Using High Power Laser”* foi apresentado na conferência anual da SPE, em Denver, Colorado, por Batarseh, S. [12]. Nesse trabalho, o autor fez referência ao processo de completação denominado canhoneio, o qual interliga o reservatório com o fundo do poço, permitindo o fluxo de hidrocarbonetos.

Nesse contexto, explicou que o jato criado pelo dispositivo por meio de cargas explosivas penetra no revestimento e no cimento em direção ao reservatório. Ele destacou que esse processo danifica a formação atingida, reduzindo a permeabilidade e a porosidade da rocha, uma vez que detritos de metal e carbono são forçados para o interior do túnel perfurado, enquanto que partículas de grãos muito finos reduzem a capacidade de circulação pelos poros. Como resultado, faz-se necessário um consumo de tempo e dinheiro em operação de pós-perfuração, para minimizar as restrições de fluidez no poço. Assim, afirmou que o desenvolvimento de métodos de perfuração alternativa para reduzir ou eliminar os danos à formação, poderia impulsionar a taxa de produção, a produção acumulada e os retornos econômicos.

A partir daí, foi citado que as pesquisas desenvolvidas pelo *Gas Technology Institute* (GTI) demonstravam, através de aplicação de lasers de alta energia em amostras de rochas, que os danos à porosidade e à permeabilidade não eram apenas

evitados, mas também poderiam melhorar essas características quando próximos ao furo. Utilizando-se os arenitos como referência, houve uma melhora de até 171%. Antes de chegar a esse resultado, ele realizou experimentos que expuseram amostras de arenito, carbonato e xisto ao laser de alta potência e realizou medidas de velocidade acústica e de permeabilidade próximo do túnel perfurado.

Também foram analisadas a mineralogia e as propriedades das rochas antes e depois dos testes. Foi constatado que maiores condutividades térmicas, por parte das rochas, resultam em maior distribuição de temperatura nas amostras e que, portanto, haveria maior porosidade e permeabilidade. O experimento mostrou que o laser pode gerar um furo limpo, sem detritos e partículas finas, dispensando, assim, a limpeza do mesmo após a perfuração.

No mesmo período, foi iniciado um estudo denominado “*Laser Drilling – Drilling with the Power of Light*”, reportado por Brian C. Gahan [13]. Através desse material, o GTI continuou a sua investigação com o recém adquirido laser à fibra de alta potência dopado com Itérbio (HPFL) de 5,34 kW. Comparado com os outros lasers, esse modelo, desenvolvido naquele período, já apresentava vantagens em relação aos seus concorrentes, como menor custo efetivo de operação, capacidade de controle remoto e consideravelmente menos manutenção e reparo.

Com o intuito de provar o quanto a nova tecnologia era promissora, o GTI realizou uma série de experimentos cujos resultados eram comparáveis com os obtidos pelos lasers anteriores. O foco dos experimentos foi nas aplicações de perfuração e completação baseados em amostras de arenitos e carbonatos. Diversas variáveis foram investigadas, como a potência do laser, a intensidade do feixe, o sistema de limpeza, a orientação da amostra, a duração, o formato e a frequência do feixe.

Também foram estudados os efeitos térmicos nos dois tipos de amostras e os seus métodos de destruição. Assim, as condições de operação ótimas foram identificadas para cada tipo. Como resultado desse trabalho, foi demonstrado que o HPFL (*high power fiber laser*) apresentou melhor capacidade de cortar e perfurar carbonatos e arenitos, quando comparado com os lasers militares e industriais testados anteriormente. Desde então, o laser à fibra passou a ser o principal candidato para as futuras aplicações de perfuração e completação de poços de petróleo com a utilização de lasers.

Em setembro de 2004, Brian C. Gahan apresentou, na Conferência e Exibição Técnica anual da SPE, o estudo “*Analysis of Efficient High-Power Fiber Lasers for Well Perforation*”, em Huston, Texas [14]. O trabalho começou reforçando a importância do recém desenvolvido laser à fibra como alternativa aos outros modelos para a aplicação no processamento de materiais. Esse novo modelo de laser tornou-se comercialmente disponível e teve sua capacidade de potência aumentada da ordem de watts para quilowatts.

O laser à fibra já era capaz de conduzir eficientemente, por meio de fibra óptica, a potência necessária até o fundo do poço, o que o colocou mais uma vez como favorito nas possíveis atividades de construção e completação de poços. Além disso, outras vantagens eram observadas, quando comparado aos lasers industriais convencionais, como maior eficiência energética, melhor qualidade do feixe, maior mobilidade em virtude do seu menor tamanho e o fato de ficar praticamente livre de manutenção durante seu tempo de vida.

Assim, foram conduzidos vários procedimentos experimentais e análises de dados em um cubo de arenito de aproximadamente 30 cm. Com isso, foi constatado que, para se obter melhores permeabilidades nas regiões próximas à exposição do feixe, não era preciso a utilização de lasers militares de classe megawatt. Também foi encontrada a menor energia específica até então, não alcançada nem mesmo com os lasers “*StarWars*”.

No mesmo ano, Zhiyue Xu apresentou o estudo “*Laser Spallation of Rocks for Oil Well Drilling*” no Congresso Internacional de Aplicações de Lasers e Eletro-ópticos [15]. Esse trabalho concentrou-se na ocorrência de espalação em rocha, definido como o processo de remoção que utiliza o stress gerado pela indução térmica do laser para fraturar o material em pequenos fragmentos, antes de acontecer o derretimento da rocha.

Dessa forma, frisou que a alta intensidade de energia aplicada pelo laser em uma rocha com baixa condutividade térmica aumenta instantaneamente a temperatura local em virtude da concentração da mesma em um determinado ponto. Logo, para não possibilitar o aparecimento de material derretido e alcançar a máxima temperatura abaixo desse estado, era preciso controlar cuidadosamente os parâmetros do laser. Nos experimentos em questão, foi utilizado um sistema de limpeza de gás a alta pressão que permitiu a remoção dos fragmentos gerados pela espalação. Também foi introduzida a ideia de múltiplos feixes e realizado o

experimento com vários pontos de laser atingindo uma superfície rochosa, a fim de se obter furos com diâmetros maiores.

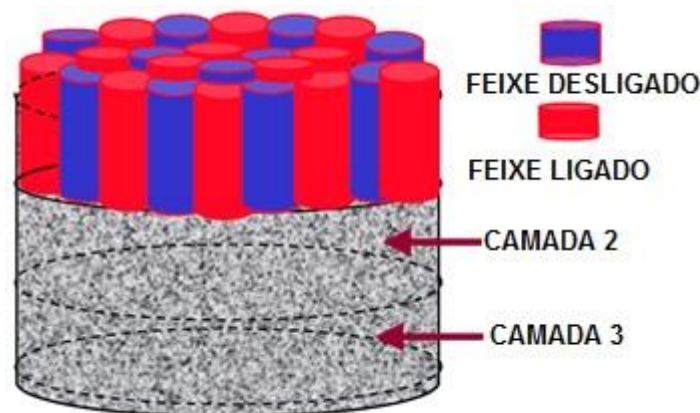


Figura 7: Experimento de perfuração a laser utilizando múltiplos feixes [15].

Já em maio de 2007, foi emitido o estudo “*Laser Drilling – Drilling of the Power of Light*”, reportado por Iraj A. Salehi, que teve início em setembro de 2000 [13]. Através desse material, o GTI continuou a sua investigação com o laser à fibra de alta potência dopado com Itérbio (HPFL) de 5,34 kW. Nessa segunda etapa, novos experimentos foram realizados e, para isso, utilizaram-se amostras de rochas cimentadas em aço a fim de simular o material a ser perfurado no fundo do poço.

Além disso, foi montado um ambiente de testes, incluído um sofisticado sistema móvel tri-axial, para verificar o comportamento da interação entre laser e rocha sob uma pressão confinante, reproduzindo as condições *in situ*. O laser à fibra foi capaz de penetrar nas amostras testadas sob diversas condições, alcançando profundidades apropriadas com requerimentos de energia razoáveis. Assim, foi constatado que o laser à fibra poderia não apenas cortar rocha sem causar danos à porosidade e à permeabilidade das mesmas, mas ainda seria capaz de melhorar essas características, reafirmando os estudos anteriores.

Em junho de 2011, Keshavarzi R. apresentou o trabalho “*Laser Perforation for Hydraulic Fracturing in Oil and Gas Wells*” no Simpósio Geomecânico, em São Francisco, Califórnia [16]. Nesse caso, o autor não só reafirmou a importância da utilização de lasers na perfuração de rochas, mas também direcionou o estudo para o fraturamento hidráulico. Ele citou novamente as vantagens do laser à fibra em relação às outras tecnologias. Relembrou que o mecanismo de remoção de rocha

mais eficiente para o arenito é a espalação térmica, e para o carbonato, a dissociação térmica, gerando aumento da permeabilidade sem nenhum dano. Destacou ainda que, durante a exposição do laser, são formadas micro e macro fraturas que facilitam a operação de fraturamento hidráulico nas próximas etapas.

No mês de outubro do mesmo ano, Behzad Elahifar apresentou na Conferência e Exibição Tecnológica de Perfuração do Oriente Médio, em Muscat, Oman, o estudo “*An Energy Based Comparison of Alternative Drilling Methods*” [17]. O autor novamente comprovou, através de experimentos, que a espalação é o melhor método do ponto de vista energético e que também resulta em maiores taxas de penetração (ROP). Identificou que, após alguns segundos, os lasers de onda contínua criam plasma e que o gás de limpeza presente na estrutura de testes não é capaz de remover esse material derretido. Isso torna o processo menos eficiente, uma vez que o plasma estacionado consome a energia do laser e não permite que o feixe atinja a próxima camada rochosa.

Foi observado comportamento similar tanto para as amostras de arenito quanto para as de granito. Ele destacou que o laser funciona bem quando aplicado em um fluido ideal, como água pura. Entretanto, considerando condições reais de perfuração, onde sólidos estão presentes no fluido, uma enorme quantidade de energia seria absorvida ou espalhada e menos energia seria utilizada para cortar a rocha.

O autor levantou também a questão da vantagem de proteção gerada pelo material derretido na parede do poço, que serviria como possível substituto para o revestimento, porém isso não pôde ser confirmado em função das características quebradiças do material. Por último, lembrou que o conceito de energia específica pode ser usado para uma comparação qualitativa para os mesmos métodos de perfuração. Por outro lado, não é usual para comparar métodos convencionais com alternativos.

Em março de 2013, foi apresentado o estudo “*Feasibility of Using Laser Bit Besides of Common Bits to Drilling Slim Holes*” por M. Bazargan, na Conferência Tecnológica Internacional de Petróleo, em Beijing, China [18]. Nesse caso, o autor relatou uma importante questão envolvendo a economia que poderia ser alcançada pela construção de um poço com menor diâmetro. Essa redução nos custos seria proporcionada pela diminuição dos requerimentos de um poço mais largo, como o

tamanho do revestimento e os materiais utilizados para preencher um determinado volume.

Além disso, ele destacou que a utilização de lasers atuando em conjunto com os atuais sistemas rotativos de perfuração representariam ainda mais vantagens. Entre as mais importantes está o fato de não precisar mais colocar tanto peso sobre a broca, economizando com materiais e evitando as falhas mecânicas da coluna e das ferramentas. A coluna também teria maior estabilidade em função de um poço mais fino e homogêneo. Também foi mencionado que o plasma gerado pela indução do laser forneceria muito mais estabilidade às paredes do poço do que anteriormente e que os efeitos *Skin* seriam reduzidos, diminuindo a quantidade de materiais químicos utilizados na operação.

Nessa mesma conferência, o autor apresentou outro estudo denominado “*Utilization of Lasers in Petroleum Drilling Industry*” [19], no qual ele conclui que até o momento a condução do feixe por fibra óptica é a única tecnologia que tem o potencial e a flexibilidade de entregar alta potência através de grandes distâncias com pequenas perdas. Ele também observou que longos períodos de exposição do feixe entregam mais energia à rocha do que ela precisa para a espalação local. O excesso de calor produz uma grande zona afetada causando tanto o craqueamento quanto o derretimento da rocha. Por outro lado, os mais novos lasers de estado sólido bombeados com diodo produzem pulsos de curta duração até mesmo na escala de *femto* segundos. Essa pulsação proporciona maior pico de densidade de potência e reduz a zona afetada.

Atualmente, uma empresa denominada FORO Energy, em parceria com o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE/USA) e com o Colorado School of Mines, afirma possuir a tecnologia capaz de conduzir alta potência a laser por longas distâncias [20]. Para isso, a FORO Energy recebeu um financiamento de \$9,2 milhões de dólares do DOE/USA.

A companhia alega que esse é o momento ideal para se investir nessa nova forma de perfuração de rochas. Isso em função da disponibilidade de potência dos lasers à fibra que passou de menos de 1kW para mais de 50kW. Aliado a isso, a grande redução nos custos da tecnologia de \$1000/W para \$50/W foi um fator fundamental para tornar o processo viável. Apesar de toda essa evolução, ainda não existe uma ferramenta capaz de construir um poço de petróleo utilizando apenas o laser. A FORO Energy trabalha com sistemas conjugados que integram processos

mecânicos utilizando ferramentas rotativas, como brocas e a energia fornecida pelo laser.

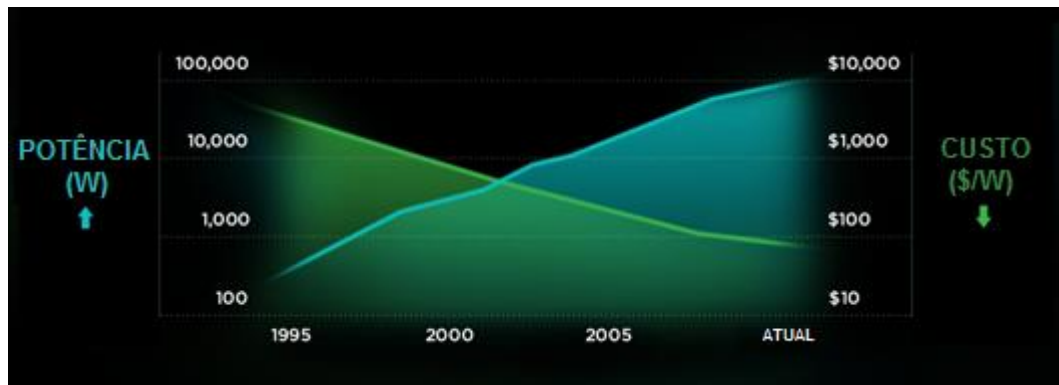


Figura 8: Relação entre potência e custo do laser a fibra de 1995 até hoje [20].

Outros fatores que sugerem uma nova tendência relacionada à utilização de lasers na indústria do petróleo são a intensa pesquisa e os depósitos de pedidos de patentes, realizados por grandes empresas e centros científicos, de dispositivos que utilizem o laser como mecanismo de remoção de rochas [33, 34, 35, 36, 37]. Tudo indica que essas instituições estejam se antecipando ao surgimento dessa nova tecnologia, que parece ser inevitável.

Visando tornar os processos de perfuração e completção de poços mais eficientes, a tecnologia a laser tem se mostrado uma alternativa interessante. Porém, muitos degraus precisam ser vencidos a fim de possibilitar a sua real aplicação. Assim, uma das mais importantes etapas, por disponibilizar dados aos processos seguintes, é o entendimento da interação entre laser e rocha. É preciso investigar os resultados e as consequências da utilização do laser como ferramenta de destruição de rocha.

Dessa forma, modelos matemáticos foram desenvolvidos a fim de caracterizar o processo, e os conceitos de energia específica passaram a ser utilizados. Vale ressaltar que muitos equívocos aconteceram envolvendo esse termo, inclusive descritos em alguns estudos. Isso ocorre quando Energias Específicas são comparadas entre diferentes ferramentas ou materiais atingidos. O conceito deve ser aplicado a fim de encontrar os melhores parâmetros aplicados a um determinado mecanismo de remoção atuante em um tipo específico de material. Por isso, esse termo deve ser muito bem entendido, para que sejam evitadas comparações distorcidas.

3.1. Energia específica

O termo Energia Específica foi descrito por Willian C. Maurrer em seu livro “*Advanced Drilling Techniques*” [22], publicado no ano de 1980. Ele traduz a eficiência na remoção de um determinado material e é descrito da seguinte maneira:

Energia específica (EE) é o valor de energia requerido para remover uma unidade de volume de rocha e pode ser representado matematicamente como:

$$EE = \frac{\text{Energia aplicada}}{\text{Volume removido}} = \frac{P}{dV/dt} \left(\frac{J}{cm^3} \right) \quad (2)$$

P = Potência aplicada (Watts)

dV/dt = Derivação do volume em relação ao tempo (cm^3/s)

Esse conceito é bastante interessante por não quantificar apenas o material removido, mas por também considerar a energia utilizada naquela operação, ou seja, nem sempre adianta alcançar ótimos resultados de remoção se a energia demandada for extremamente elevada. Dessa forma, através da melhor ou menor energia específica, pode-se encontrar os parâmetros previamente configurados, que foram responsáveis por esse resultado. A ideia é que a otimização do processo esteja definida nesses ajustes, seja em função da potência do laser, do tempo de exposição do feixe ou do volume removido.

Partindo do mesmo princípio, é possível ainda encontrar a taxa de penetração (ROP). Esse valor expressa a velocidade de avanço do agente removedor em direção ao objetivo. Considerando a forma geométrica aproximada da perfuração como um cilindro, temos que:

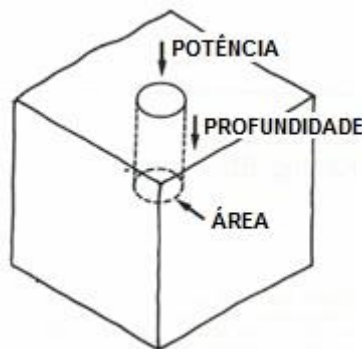


Figura 9: Representação dos parâmetros de perfuração [22].

$$EE = \frac{E}{V_r} = \frac{P \cdot t}{A \cdot h} \quad (3)$$

Onde,

E = Energia aplicada

V_r = Volume removido

P = Potência do laser

t = Tempo de exposição do feixe

A = Área atingida

h = profundidade atingida

Isolando-se “ h ” e “ t ”, chegamos à velocidade de penetração na direção vertical, também chamada de taxa de penetração (ROP):

$$\frac{h}{t} = \frac{P}{A \cdot EE} \quad (4)$$

$$ROP = \frac{P}{A \cdot EE} \quad (5)$$

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

3.2. Energia específica de corte

Maurrer foi além do estudo citado anteriormente: ele chegou ao conceito de Energia Específica de Corte. Esse termo é menos abordado do que Energia Específica simplesmente. Poucos estudos foram encontrados relacionando Energia Específica de Corte e perfuração a laser. Foi possível ter acesso a trabalhos que estabelecem essa relação com foco na remoção de rochas originadas de deslizamentos ou de abalos sísmicos [29]. A ideia é que o laser tenha vantagem em relação aos métodos tradicionais de perfuração que geram vibrações, podendo ocasionar novos desmoronamentos ou que não sejam suficientes sem a utilização de métodos explosivos.

Outras relações foram estabelecidas entre laser e energia específica de corte no campo da mineração, onde a remoção de um determinado volume rochoso seria facilitada. Nesse caso, a intenção não é a destruição da rocha, e sim a sua extração, o que é muito interessante em termos de corte a laser. Esse termo também é bastante utilizado no processo de corte de chapas metálicas, principalmente aplicado na indústria automobilística. Entretanto, nenhum material foi encontrado aplicando Energia Específica de Corte a laser na indústria do Petróleo. Por isso, esse conceito

será mais estudado nesta dissertação, a fim de entender melhor a importância que pode representar na construção de poços.

Muitos ensaios são realizados utilizando o conceito de energia específica a fim conhecer melhor a interação entre laser e rocha. Entretanto, esse modelo representa uma situação estática, na qual o feixe do laser incide na superfície da formação sem movimentar-se. Sabe-se ainda que o diâmetro do feixe incidente, para que apresente bons resultados, deve possuir poucos milímetros. Isso inviabiliza a construção de furos suficientemente grandes a fim de possibilitar o escoamento dos fluidos oriundos do reservatório.

Com base nesse pensamento, foi escolhido o modelo de energia específica de corte. Esse, por sua vez, classifica a remoção de materiais como um processo dinâmico e pode ser representado da seguinte maneira:

Energia específica de corte (EEC) é o valor de energia requerido para produzir uma unidade de área de corte e pode ser representado matematicamente como:

$$EEC = \frac{\text{Energia}}{\text{Área de corte}} = \frac{P}{d \cdot w} \left(\frac{J}{cm^2} \right) \quad (6)$$

P = Potência (Watts)

d = Profundidade do Corte (cm)

w = Velocidade Transversal (cm/s)

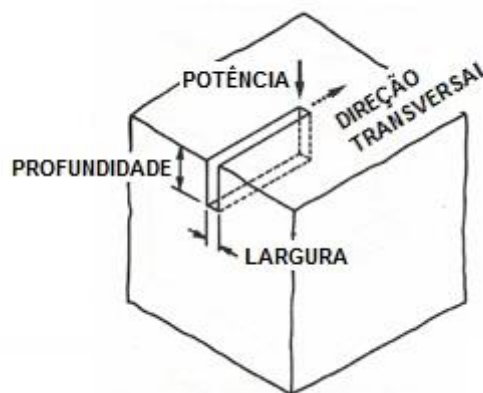


Figura 10: Representação dos parâmetros de corte [22].

Desenvolvendo a equação obtemos:

$$EEC = \frac{P \cdot t}{d \cdot L} \quad (7)$$

t = Tempo de exposição do feixe (s)

L = Comprimento do corte (cm)

Como o próprio autor relata, a função do corte é promover uma face livre para que as fraturas possam se propagar. Em termos de eficiência de corte, os profundos e estreitos são mais desejados do que cortes rasos e largos. Dessa forma, o diâmetro do feixe tem grande influência na otimização do processo, pois está diretamente ligado a largura do corte.

Com isso, outro fator importante, além da densidade de potência (DP), representada pela razão entre a potência e a área do feixe, seria a velocidade de corte. A profundidade é consequência da densidade de potência aplicada e da taxa de deslocamento do laser sobre a superfície do material a ser cortado. Quanto maior a densidade de potência, maior será a profundidade do corte que, por sua vez, diminuirá na medida em que a velocidade aumentar. Isso se deve ao fato de que quanto maior a velocidade, menor será o tempo de incidência do feixe em um determinado ponto, resultando em um corte menos profundo. Sendo assim, as variáveis devem ser bem ajustadas de maneira a encontrar a menor energia específica de corte.

3.3.

Sistema de corte em túnel

Willian C. Maurrer também apresentou o conceito de Sistema de corte em túnel, que nada mais é do que aplicar o termo de energia específica de corte em um processo circular. Assim, seria possível alcançar um diâmetro suficientemente grande a fim de permitir o escoamento de petróleo por meio de cortes subsequentes de maneira a fragilizar a região atingida. Esses fragmentos, por sua vez, seriam removidos pelo mesmo princípio utilizado atualmente: carregamento por meio de um fluido removedor.

Fazendo uso da energia específica de corte, a intenção é criar cortes circulares e próximos entre si, de maneira que o diâmetro da maior circunferência tenha a dimensão do furo desejado. A ideia é que quanto menor a distância entre os cortes, mais fácil será para retirar os detritos gerados. Porém, deve existir um limite que determine não apenas o menor espaçamento, e sim a melhor distância responsável pela maximização da eficiência no ponto de vista da energia específica de corte.

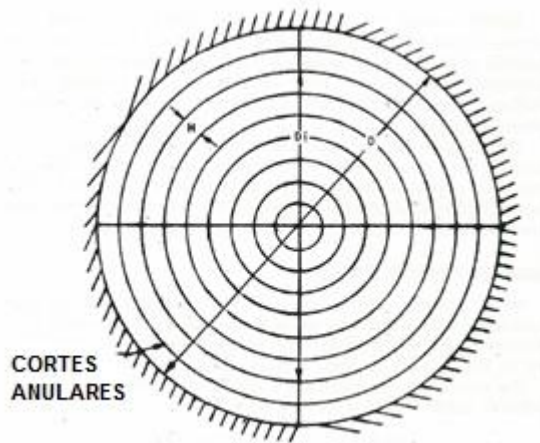


Figura 11: Representação de um sistema de corte em túnel [22].

Assim, é possível chegar a uma nova equação que relaciona Energia Específica de Corte e Sistema de Corte em Túnel. Substituindo-se o comprimento de corte (L) pelo comprimento da circunferência (πD), temos que:

$$EEC = \frac{P \cdot t}{\pi \cdot d \cdot D} \quad (8)$$

Onde,

D = Diâmetro da maior circunferência

Essa equação é a representação de apenas um corte. Dessa forma, realizando-se o somatório de todos os diâmetros, tem-se:

$$EEC = \frac{P \cdot t}{\pi \cdot d \cdot \sum_{i=1}^n D} \quad (9)$$

Onde,

$$n = \frac{D}{2H} \quad (10)$$

Realizando-se a série e substituindo “n” na equação, temos que:

$$EEC = \frac{4 P H t}{\pi d D (D + 2H)} \quad (11)$$

H = Espaçamento entre os cortes

Por meio dessa equação, utilizando a energia específica de corte, é possível ajustar o valor de H, de maneira que seja encontrada a fragilização ideal que possibilite a remoção dos fragmentos, tentando evitar ao máximo o aumento da energia específica de corte.

Como a proposta desta dissertação é o estudo da eficiência do laser como agente removedor, diversos experimentos foram realizados a fim de se obter resultados concretos e de sustentar os embasamentos teóricos. Para isso, foi necessário um planejamento de testes e a preparação do laboratório para a realização dos ensaios. Além disso, foram adquiridas várias amostras de tipos diferentes de rochas, com o intuito de simular as formações encontradas.

4.1.

Ambiente de testes e equipamentos

A realização dos experimentos descritos a seguir só foi possível graças à aquisição dos equipamentos, financiada pelo CNPQ, e à disponibilização e montagem do laboratório no departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sem dúvida, o principal componente desse sistema é o laser à fibra dopado com Itérbio, da empresa IPG Photonics, modelo YLS-1500, com comprimento de onda de 1,064 μm . A estrutura do equipamento em questão é basicamente um gabinete que abriga os módulos lasers, diodos eletricamente bombeados responsáveis pela geração dos fótons e os módulos à fibra, onde ocorre o ganho por meio dos dopantes. Também vale a pena destacar a presença da fonte de alimentação, a qual gera toda a energia requerida pelo sistema e os componentes de refrigeração, responsáveis pelo armazenamento, manutenção e bombeio de fluido refrigerante.

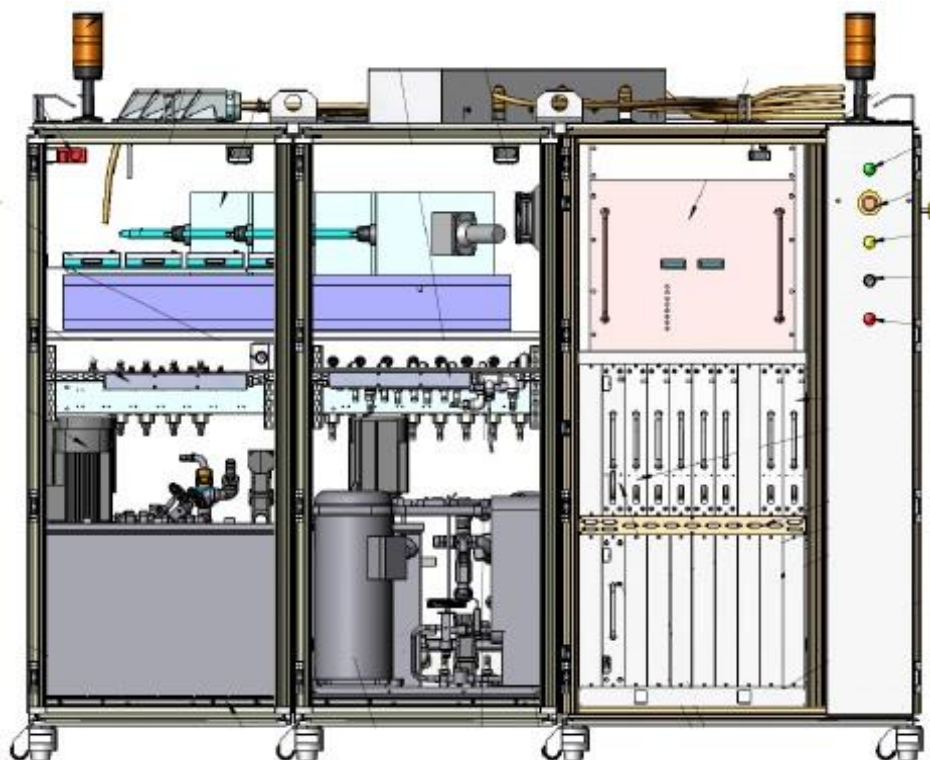


Figura 12: Componentes do laser a fibra embarcados no gabinete [42].

Em virtude das altas potências alcançadas pelo equipamento, faz-se necessária a utilização de um Chiller externo, que garante a manutenção da temperatura ideal do laser. Sua capacidade de refrigeração é de 21°C, sua vazão, de 60 l/min e sua pressão é de 2 bar.

A configuração e o monitoramento do laser e do chiller são realizados basicamente através de um software de controle da IPG Photonics, no qual os diversos parâmetros de operação e controle são ajustados e acompanhados. Por meio desse programa, é possível, por exemplo, configurar a potência desejada e monitorar a temperatura do equipamento.

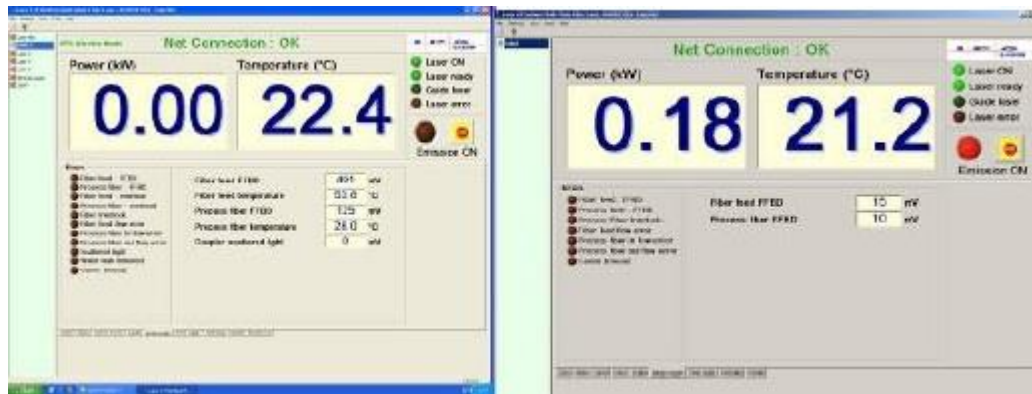


Figura 13: Software de configuração e controle do laser e do chiller [42].

Com o intuito de automatizar o sistema, foi desenvolvida uma estrutura tri-axial com a finalidade de sustentar o laser e de deslocá-lo de acordo com a posição desejada por meio de servo motores. Esse mecanismo possui uma placa eletrônica com entradas e saídas de controle que se comunicam tanto com o laser como com os outros dispositivos que fazem parte do conjunto. Assim, é possível definir o tempo de exposição do feixe e ativar a liberação do fluido para a limpeza do furo.

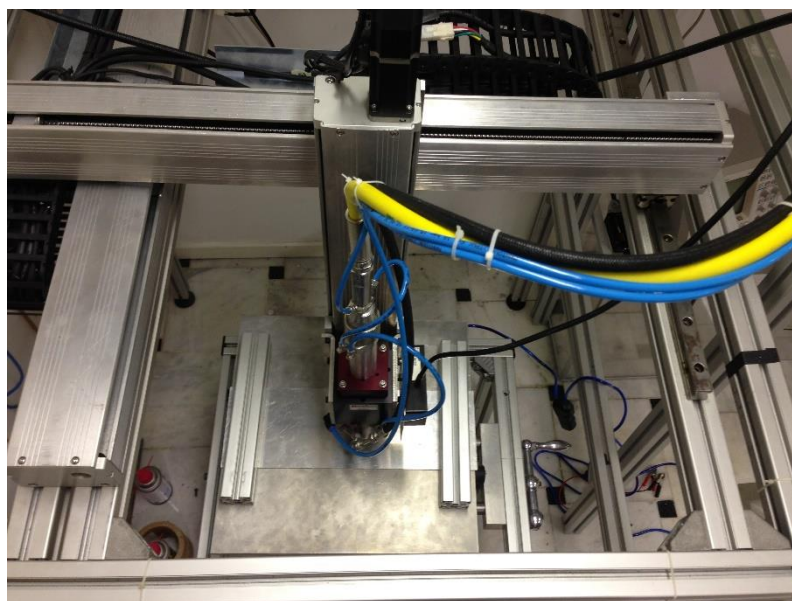


Figura 14: Estrutura de controle de posição do laser.

O gás nitrogênio foi escolhido para atuar como fluido de limpeza, a uma pressão de 7 bar, em virtude de ser transparente ao comprimento de onda do laser, ou seja, não impede que o feixe atinja o objetivo.

Uma cabeça de injeção foi integrada ao sistema com a função de focalizar o feixe entregue pelo laser. Esse dispositivo possui uma lente focalizadora especial no seu interior, capaz de suportar altas temperaturas. Assim, o lançador do laser é encaixado em uma das extremidades da cabeça e o feixe sai focalizado pelo bico injetor na outra extremidade. Também é preciso manter a temperatura do equipamento em condições apropriadas durante a operação e, para isso, existe um canal de circulação para o fluido refrigerante. Além disso, há uma entrada para o fluido de limpeza, gás nitrogênio no caso em questão, o qual é expelido de forma concentrada no bico, próximo ao canal de saída do feixe do laser. Isso permite que os detritos gerados durante a exposição do laser sejam removidos simultaneamente durante o processo.



Figura 15: Cabeça de injeção e suas partes [45].

Alguns experimentos tiveram a presença de uma câmera com tecnologia infravermelha a fim de monitorar o perfil de temperatura das amostras de rochas durante a exposição do laser.

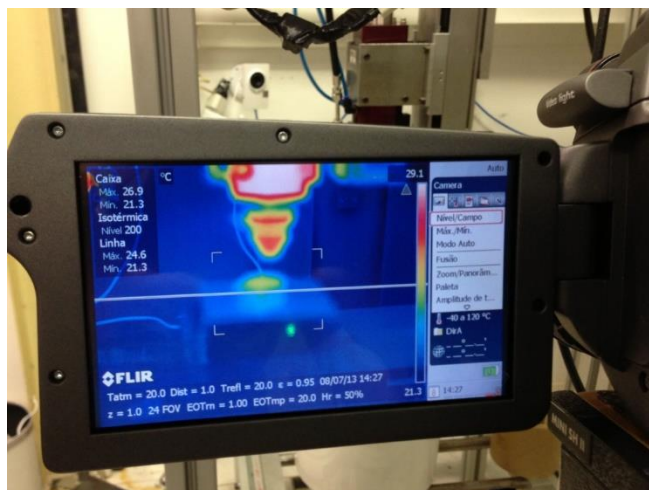


Figura 16: Câmera com tecnologia infravermelha.

4.2. Rochas utilizadas

O trabalho em questão tem um interesse especial pelo estudo da aplicação de lasers de alta potência em rochas encontradas nos reservatórios do pré-sal brasileiro, ainda pouco estudadas. Recentemente descoberta, essa localidade tem o potencial de armazenar um grande volume de óleo. Diferente da Bacia de Campos, na qual o reservatório é composto de rochas do tipo arenito, com predomínio de silício e de característica homogênea, a camada pré-sal é formada por rochas carbonáticas, cujos constituintes predominantes são o carbonato de cálcio e de magnésio [32]. Assim, os experimentos foram conduzidos em rochas basicamente formadas por carbonatos, mais especificamente a calcita (CaCO_3) e a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

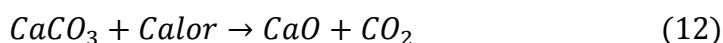
Devido à dificuldade de se conseguirem testemunhos oriundos da camada pré-sal, por serem materiais de pesquisa sigilosa de propriedade das empresas exploradoras, optamos por buscar materiais com as características mais parecidas possíveis. Assim, chegamos inicialmente a um tipo de rocha denominado Travertino, o qual foi utilizado nos primeiros experimentos.

A confirmação em relação à similaridade do Travertino com as rochas encontradas nos reservatórios da camada pré-sal apareceu na análise semi quantitativa por fluorescência de raio-X. Esse ensaio comprovou a alta concentração de Cálcio, quase 58%, provavelmente advindo do Carbonato de Cálcio.

Elemento	Concentração (%)
Ca	57,8
O	29,3
Na	6,17
Si	1,5
Mg	1,36
Cl	0,979
Fe	0,648
K	0,633
Al	0,449
S	0,29

Tabela 1: Análise semi quantitativa por fluorescência de raio-X do Travertino.

Também foi realizada a análise termogravimétrica (TG) do Travertino, que mensurou a perda de massa da amostra testada em função da temperatura à qual ela foi exposta. Assim, pôde ser observado a taxa na qual o material perde volume, na medida em que a temperatura aumenta. Isso está relacionado com a aplicação do laser na rocha, uma vez que a incidência do feixe na amostra eleva a temperatura local. Esse aumento de temperatura resulta no processo de calcinação, no qual há a decomposição térmica do carbonato de cálcio em óxido de cálcio e dióxido de carbono (CO₂), e a rocha perde boa parte do seu volume.



Percebe-se ainda, de acordo com os resultados obtidos, que a maior perda de massa para o Travertino, dentro dos limites do ensaio realizado, está na faixa de 600°C até 900°C.

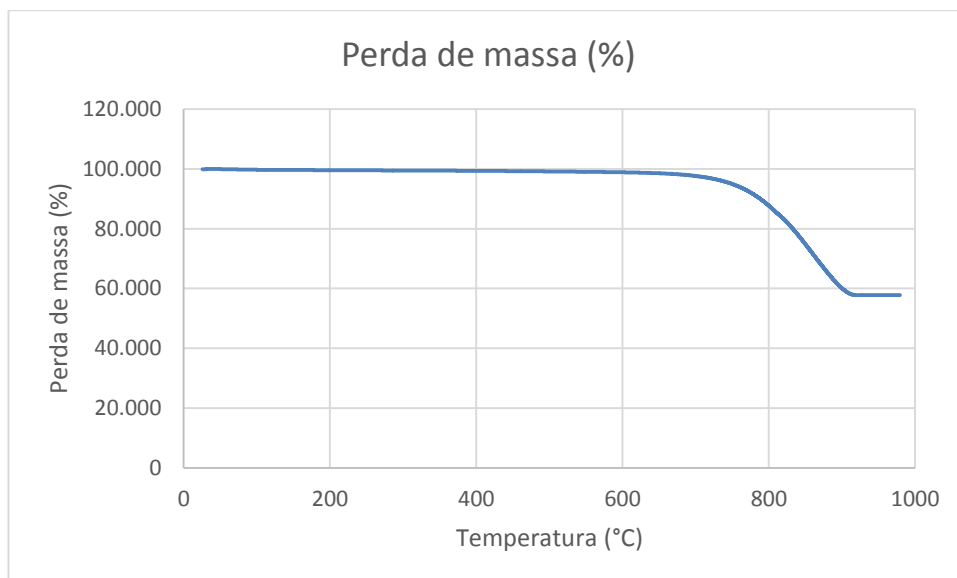


Figura 17: Perda de massa do Travertino em função da temperatura.

Apesar dos bons resultados encontrados quimicamente, o Travertino é uma rocha de difícil acesso, encontrada apenas na Itália, na Turquia, no Peru e no México. Isso possibilitou alguns experimentos em laboratório, utilizando-se placas com dimensões restritas, mas inviabilizou a flexibilidade de novos ensaios, como, por exemplo, se usando blocos de diferentes tamanhos.

Diante desse obstáculo, realizamos uma nova busca a fim de encontrar uma rocha com características parecidas, porém de acesso mais fácil. Assim, chegamos até uma chamada de Bege Bahia, natural do Estado da Bahia, como destacado no próprio nome. Da mesma forma, realizamos a análise semi quantitativa por fluorescência de raio-X e descobrimos que as propriedades do Bege Bahia são muito similares as do Travertino, com uma concentração de Cálcio ainda maior.

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

Tabela 2: Análise semi quantitativa por fluorescência de raio-X do Bege Bahia.

Para o caso do Bege Bahia, optamos por fazer um estudo mais detalhado através da análise quantitativa de fases pelo método de Rietveld. Esse ensaio disponibilizou as concentrações dos compostos encontrados na fase cristalina, o qual confirmou a alta porcentagem de calcita e dolomita, quase 99% do total.

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

Tabela 3: análise quantitativa de fases do Bege Bahia pelo método de Rietveld.

Também foi realizada a análise termogravimétrica (TG) para o Bege Bahia. O comportamento encontrado mostrou-se bastante parecido ao do Travertino, porém a faixa de maior perda de massa ficou entre 600°C até 800°C. Vale destacar, também, que nos dois casos, considerando-se a faixa de temperatura mais eficiente, dentro das limitações dos equipamentos utilizados, houve uma perda de massa de até 40% em relação à massa inicial.

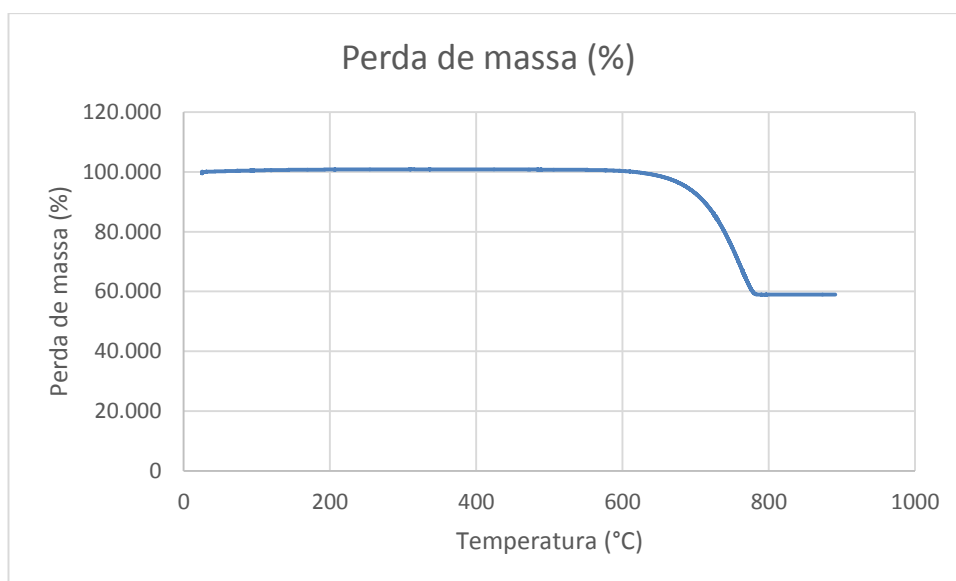


Figura 18: Perda de massa do Bege Bahia em função da temperatura.

A partir daí, realizamos experimentos de perfuração nos dois tipos de amostras e, novamente, encontramos resultados parecidos. Assim, optamos por utilizar na maioria dos experimentos o Bege Bahia, em função da disponibilidade de material e da flexibilidade de ensaios, utilizando diferentes dimensões e formatos de peças.

O trabalho não se restringiu à apresentação de resultados provenientes de rochas do tipo carbonáticas. Também foram realizados experimentos de perfuração e foram mensurados os valores de energia específica para arenitos e folhelhos. Essas amostras ensaiadas provêm de testemunhos retirados de poços de petróleo brasileiros em diferentes profundidades e com características distintas.

4.3. Procedimentos experimentais

Diversos experimentos foram realizados com o intuito de entender melhor a interação entre laser e rocha. Ensaios de perfuração ocorreram primeiramente para verificar a similaridade entre as amostras de Travertino e de Bege Bahia. Em seguida, foi observada a influência da energia fornecida no volume removido e, consequentemente, no valor da energia específica. Também foram realizados vários furos em diversos pontos de um bloco de Bege Bahia para encontrar as configurações que geram os melhores valores de energia específica e entender a

variação na eficiência da perfuração de acordo com as diferentes concentrações ao longo da amostra. Testes de perfuração alcançando diferentes profundidades foram feitos a fim de entender a variação da taxa de penetração em função da mudança na densidade de potência e no surgimento de efeitos secundários.

Além dos ensaios de energia específica descritos em rochas carbonáticas, também foram realizados testes de perfuração em testemunhos de arenitos e folhelhos retirados de campos brasileiros em diferentes profundidades.

Foram utilizadas duas técnicas distintas a fim de mensurar os volumes removidos nos ensaios de energia específica. A primeira consistiu no cálculo do volume total das amostras utilizadas por meio da determinação das suas dimensões, fazendo uso de um paquímetro. Em seguida, foi realizada a pesagem dos materiais, antes e depois da exposição do laser, o que gerou uma massa removida resultante. Dessa forma, possuindo o volume e a massa de cada rocha testada, foi possível calcular a massa específica do material e, por último, o volume removido em cada processo. Porém, esse procedimento de medição gerou resultados imprecisos em função do cálculo do volume da amostra, já que as peças não eram geometricamente perfeitas. Isso gerou um erro elevado, uma vez que os ensaios de perfuração resultavam em pequenos furos.

A segunda forma de medição do volume removido ocorreu por meio de uma seringa abastecida com glicerina. O furo gerado foi preenchido com o líquido descrito e o valor decrescido na seringa representou o volume resultante. A glicerina foi escolhida em função da sua alta viscosidade, que possibilitou a lenta absorção pela rocha ensaiada. Essa técnica proporcionou maior precisão na medição dos furos e conseqüentemente melhores resultados.

Experimentos de corte foram realizados a fim de encontrar as características ideais, como potência e velocidade de deslocamento do feixe, que tornam o processo mais eficiente. Também foram traçados cortes circulares em amostras de Bege Bahia para simular a perfuração de maiores diâmetros, não alcançados em situações estáticas em função do reduzido diâmetro do feixe do laser. Por último, foi verificado o espaçamento ideal entre os cortes que possibilitariam a fragilização da superfície atingida e, conseqüentemente, a remoção de um volume rochoso da melhor forma possível.

Resultados e discussões

De acordo com os testes relatados no capítulo anterior, foram coletados e analisados os resultados. Mas antes de interpretar os experimentos de perfuração em rochas é preciso conhecer os mecanismos responsáveis por esse processo:

Espalação térmica

A expansão volumétrica sofrida pelo quartzo produz um stress pelo aquecimento rápido da superfície que excede a força da rocha principalmente em torno de 573°C.

Derretimento e vaporização

A temperatura de derretimento de rochas ígneas varia de 1100 a 1600°C, enquanto a de carbonatos está em torno de 2600°C. Os lasers produzem concentração de potência suficiente para alcançar essas temperaturas, sendo capazes de derreter e vaporizar rochas.

Quebra mecânica

As rochas são mecanicamente perfuradas por impacto, abrasão ou erosão. Esses mecanismos induzem tensão que excede a força da rocha.

Reação química

Uma grande variedade de compostos químicos pode ser utilizada para dissolver rocha. Eles são altamente reativos, como o flúor, porém são muito caros e representam problemas de segurança.

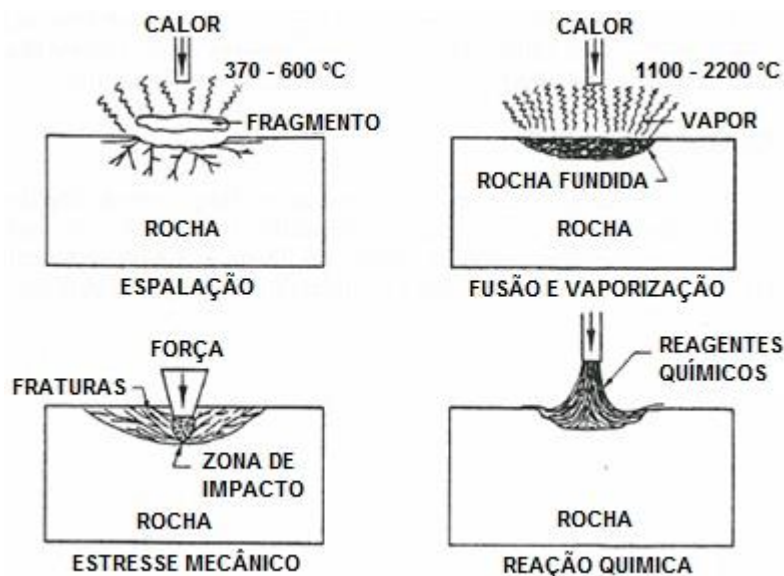


Figura 19: Mecanismos de desintegração de rocha [22].

5.1.

Ensaio de perfuração

Os experimentos de perfuração ocorreram principalmente com a finalidade de mensurar os valores de energia específica para cada tipo de rocha e de verificar quais as características configuradas nos equipamentos que possibilitaram a maior eficiência.

5.1.1.

Travertino e Bege Bahia

Inicialmente, ainda com o intuito de averiguar a similaridade entre as características do Travertino e do Bege Bahia, foram realizados ensaios de perfuração, definindo-se as mesmas configurações de potência e tempo de exposição do feixe para os dois tipos de rochas. Assim, o laser foi programado para funcionar com as potências de 400, 600, 800, 1000 e 1200W durante dois segundos em cada operação.

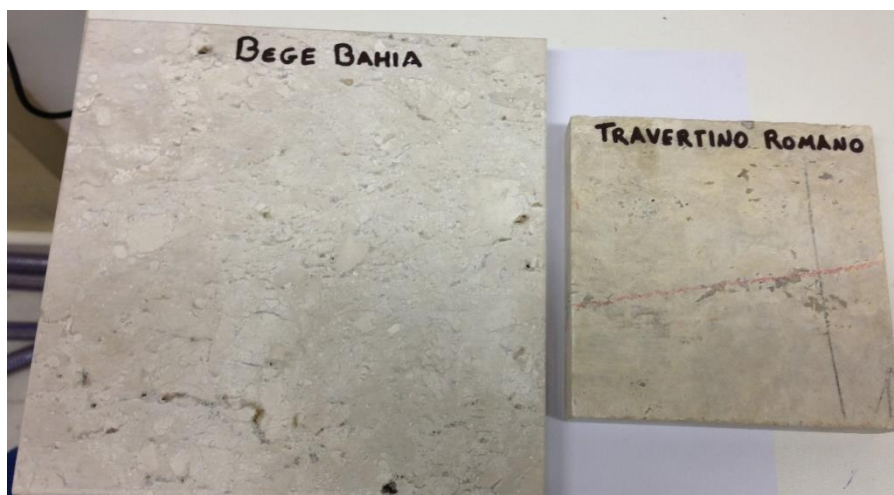


Figura 20: Amostras de Travertino e de Bege Bahia.

Em seguida, foram medidos os volumes removidos e foram calculados os valores de energia específica para cada orifício gerado nas duas amostras, conforme mostrado nas tabelas 4 e 5.

Travertino				
Potência (W)	Tempo (s)	Energia (J)	Volume Removido (mm ³)	Energia específica (kJ/cm ³)
400	2	800	10	80,0
600		1200	20	60,0
800		1600	40	40,0
1000		2000	80	25,0
1200		2400	140	17,1

Tabela 4: Valores de volume removido e de energia específica para o Travertino.

Bege Bahia				
Potência (W)	Tempo (s)	Energia (J)	Volume Removido (mm ³)	Energia específica (kJ/cm ³)
400	2	800	5	160,0
600		1200	10	120,0
800		1600	40	40,0
1000		2000	80	25,0
1200		2400	100	24,0

Tabela 5: Valores de volume removido e de energia específica para o Bege Bahia.

Diante dos resultados encontrados, pode-se perceber que com potências mais baixas, os volumes removidos e os resultados de energia específica são bem diferentes. Porém, utilizando maiores valores de potência – faixa na qual a energia específica é menor e, conseqüentemente, o processo é mais eficiente – os resultados encontrados foram bastante parecidos. A maior eficiência dos testes realizados, nesse caso, ocorreu por meio de uma potência de 1200W, com tempo de exposição do feixe de 2 segundos e energia específica de 17,1 kJ/cm³ para o Travertino e de 24,0 kJ/cm³ para o Bege Bahia.

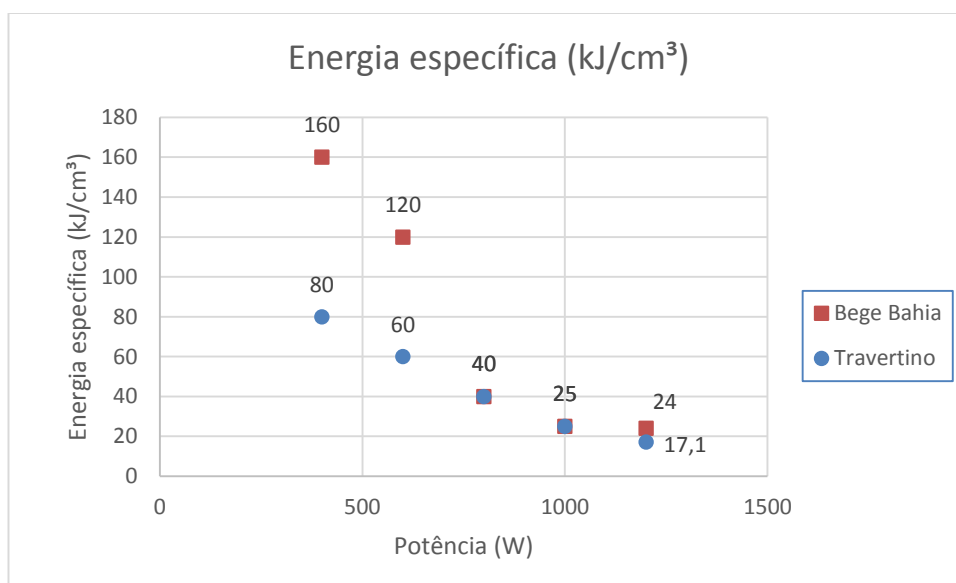


Figura 21: Comparação entre a energia específica do Bege Bahia e a do Travertino em função da potência.

Por serem rochas do tipo carbonáticas, o Travertino e o Bege Bahia tiveram maior perda de massa a partir do momento em que foi atingida a temperatura de 600°C. Nessa faixa, ocorre o processo de calcinação, no qual o carbonato de cálcio (CaCO₃) gera óxido de cálcio (CaO) – acumulado na região perfurada em forma de pó – e dióxido de carbono (CO₂), que é liberado sob forma de gás. O pó acumulado no orifício gerado é facilmente removido pelo fluido de limpeza, que mantém o furo limpo e, conseqüentemente, permite que o feixe do laser atinja a camada subsequente com maior energia. Nessas condições, não foi observado o aparecimento de material derretido, muito mais difícil de ser removido pelo fluido

de limpeza e, por isso, os efeitos secundários¹ não foram tão prejudiciais. Convém destacar também que a profundidade atingida não comprometeu significativamente a remoção dos resíduos gerados durante o processo de perfuração.



Figura 22: Amostra de Travertino após a aplicação do laser.

Em seguida, foram realizados experimentos para descobrir se a fixação do valor da energia fornecida resultaria no mesmo volume removido e, consequentemente, no mesmo valor de energia específica. Para isso, foram utilizadas as potências de 250W com um tempo de exposição de 12 segundos, 500W durante 6 segundos, 750W por 4 segundos e 1000W durante 3 segundos. Dessa forma, o valor de energia para cada processo é sempre o mesmo: 3000J.

$$E = P \cdot t \quad (12)$$

$$E = 250 \cdot 12 = 3000J$$

$$E = 500 \cdot 6 = 3000J$$

$$E = 750 \cdot 4 = 3000J$$

$$E = 1000 \cdot 3 = 3000J$$

Mais uma vez os volumes removidos foram medidos e as energias específicas calculadas tanto para o Travertino quanto para o Bege Bahia, conforme descrito nas tabelas 6 e 7.

¹ Efeitos secundários: efeitos que prejudicam ou impedem a propagação do feixe do laser.

Travertino				
Potência (W)	Tempo (s)	Energia (J)	Volume Removido (mm ³)	Energia específica (kJ/cm ³)
250	12	3000	10	300,0
500	6	3000	20	150,0
750	4	3000	120	25,0
1000	3	3000	160	18,8

Tabela 6: Valores de volume removido e de energia específica para o Travertino com a mesma energia.

Bege Bahia				
Potência (W)	Tempo (s)	Energia (J)	Volume Removido (mm ³)	Energia específica (kJ/cm ³)
250	12	3000	10	300,0
500	6	3000	20	150,0
750	4	3000	60	50,0
1000	3	3000	100	30,0

Tabela 7: Valores de volume removido e de energia específica para o Bege Bahia com a mesma energia.

Apesar de a energia fornecida para cada furo ter sido a mesma, observa-se que isso não garante que o volume removido será o mesmo e muito menos que a energia específica se manterá. Talvez, seja mais fácil de perceber esse fato se pensarmos que, aplicando 1W de potência durante 3000 segundos, teremos 3000J de energia, porém praticamente nada acontecerá com a rocha atingida. Já se utilizarmos 3000W por 1segundo, teremos o mesmo valor de energia, mas parte do volume da amostra será removido.

Esse experimento foi interessante para entender a importância dos ajustes de operação dos equipamentos. Cada variável tem a sua importância e deve ser muito bem definida diante dos ensaios a serem executados. Assim, somente após a análise dos resultados, poderão ser estabelecidos os valores de configuração das ferramentas de forma a alcançar a maior eficiência. No caso em questão, esses valores foram de 1000W de potência durante 3 segundos com energia específica de 18,8 kJ/cm³ para o Travertino, e de 30,0 kJ/cm³ para o Bege Bahia.

Mais a diante, utilizando um cubo de 20cm de Bege Bahia, novos experimentos foram realizados, desta vez com o intuito de verificar a homogeneidade da rocha. Assim, a amostra foi perfurada com um tempo de

exposição do feixe de 10 segundos para cada furo e com as potências de 600, 800, 1000, 1200 e 1400W. Com o mesmo valor de potência, cinco furos foram gerados com a ideia de fazer um teste de repetitividade, no qual se esperava alcançar os mesmos valores de volume removido. Os ensaios de perfuração foram espalhados ao longo da superfície do bloco de Bege Bahia, pois a peça poderia apresentar diferentes concentrações em pontos distintos da amostra, tornando o processo de perfuração mais ou menos eficiente.

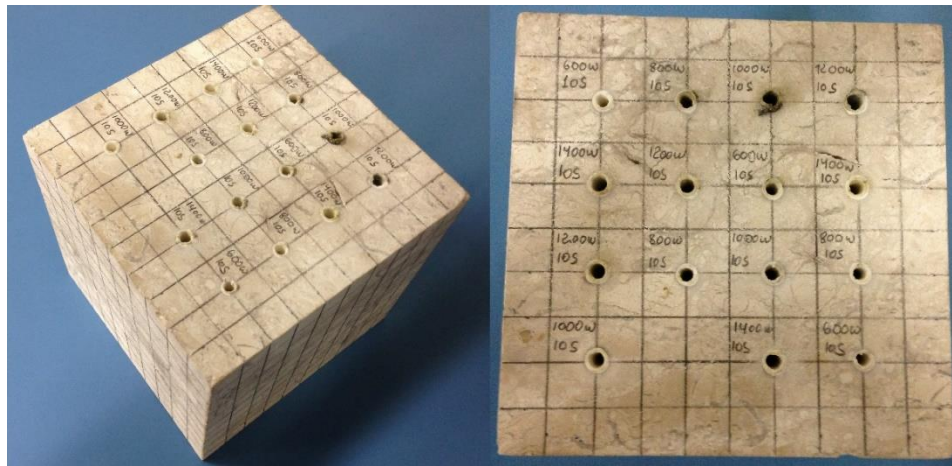


Figura 23: Bloco de Bege Bahia perfurado em diferentes pontos ao longo da sua superfície.

Dessa forma, foram observados valores distintos de volume removido e de energia específica, conforme mostra a tabela 8.

Bege Bahia			
Potência (W)	Tempo (s)	Volume removido (mm ³)	Energia Específica (kJ/cm ³)
600	10	160	37,5
		150	40,0
		130	46,2
		120	50,0
		140	42,9
800	10	230	34,8
		230	34,8
		210	38,1
		200	40,0
		240	33,3
1000	10	260	38,5
		320	31,3
		260	38,5
		250	40,0
		310	32,3
1200	10	300	40,0
		320	37,5
		350	34,3
		400	30,0
		320	37,5
1400	10	420	33,3
		470	29,8
		410	34,2
		440	31,8
		400	35,0

Tabela 8: Resultados de volume removido e de energia específica em diferentes pontos de uma amostra de Bege Bahia.

De acordo com os resultados, observa-se que durante um tempo de exposição maior do feixe e aplicando valores de potência a partir de 600W, os valores de energia específica são bastante parecidos. No entanto, os melhores resultados foram encontrados quando houve a utilização de uma potência de 1400W, durante 10 segundos, cuja energia específica foi de 29,8 kJ/cm³.

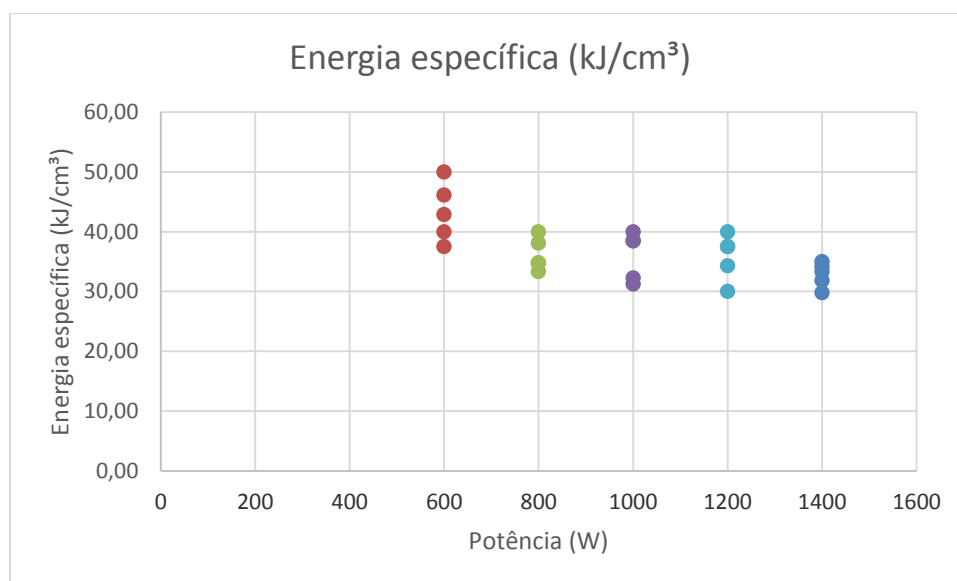


Figura 24: Valores de energia específica para diferentes potências ao longo de uma amostra de Bege Bahia.

Foi possível compreender também que a amostra testada não é homogênea, ou seja, ela possui diferentes concentrações ao longo de sua estrutura. Isso foi constatado em virtude dos distintos valores de volume removido encontrados a partir do uso das mesmas configurações dos equipamentos.

Partindo dessa situação, em termos de simplificação, foi feita a média de volume removido dos cinco furos para cada valor de potência e calculada a respectiva energia específica (tabela 9).

Bege Bahia			
Potência (W)	Tempo (s)	Volume removido (mm³)	Energia Específica (kJ/cm³)
600	10	140	42,9
800	10	222	36,0
1000	10	280	35,7
1200	10	338	35,5
1400	10	428	32,7

Tabela 9: Resultados médios de volume removido e de energia específica em uma amostra de Bege Bahia.

Assim, percebeu-se que a redução da energia específica continuava em função do aumento da potência aplicada como nos ensaios anteriores. A maior

eficiência continuou por meio da aplicação de 1400W, porém com um valor de energia específica resultante de 32,7 kJ/cm³.

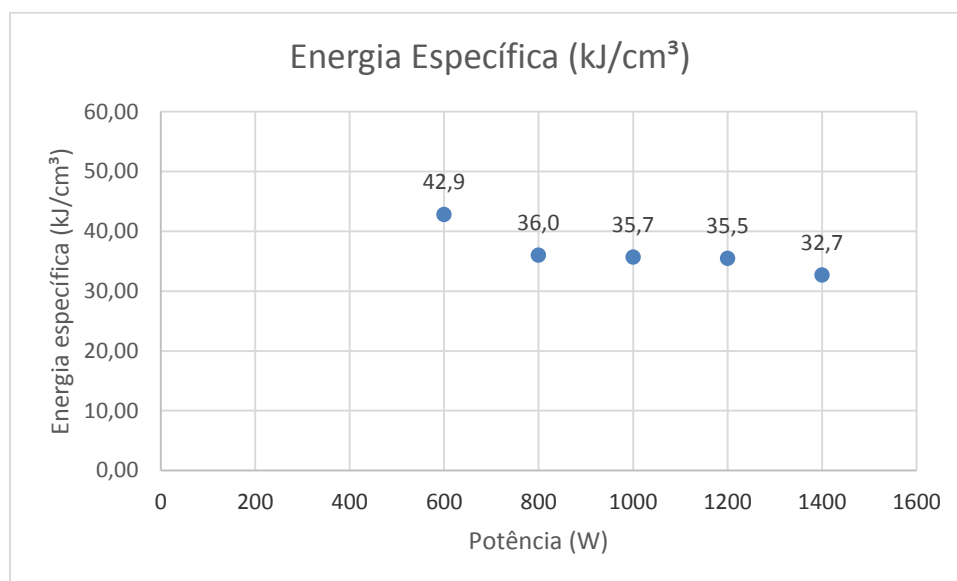


Figura 25: Valores médios de energia específica para diferentes potências em uma amostra de Bege Bahia.

Outro experimento foi realizado visando verificar a variação da taxa de penetração de acordo com a profundidade alcançada. Logo, buscava-se entender a influência da variação da densidade de potência (DP)² e da eficiência do sistema de limpeza em função da profundidade no processo de perfuração. Para isso, foram realizados furos com as potências de 1000, 1200 e 1400W, durante 2, 4, 6, 8, 10, 15 e 20 segundos.

Sabe-se que as amostras utilizadas não são homogêneas, conforme observado no experimento anterior, por isso diferentes resultados podem ser encontrados ao longo das suas estruturas. Sendo assim, foram realizados três ensaios para cada potência e tempo, totalizando sessenta e três furos. Todas as profundidades foram medidas e, para cada característica de aplicação do laser, foi calculada uma média de profundidade atingida (tabela 10).

² Densidade de potência (DP): razão entre a potência aplicada e a área atingida pelo feixe do laser.

Potência (W)	Tempo (s)	Profundidade média (cm)	Taxa de penetração (cm/s)
1000	2	1,47	0,73
	4	2,00	0,50
	6	2,20	0,37
	8	3,30	0,41
	10	3,17	0,32
	15	3,80	0,25
	20	4,30	0,22
1200	2	1,40	0,70
	4	2,07	0,52
	6	3,07	0,51
	8	3,80	0,48
	10	4,03	0,40
	15	4,30	0,29
	20	5,13	0,26
1400	2	1,63	0,82
	4	2,17	0,54
	6	2,90	0,48
	8	3,30	0,41
	10	4,10	0,41
	15	5,10	0,34
	20	5,43	0,27

Tabela 10: Resultados de profundidade média e de taxa de penetração aplicando diferentes potências e tempos ao longo de uma amostra de Bege Bahia.

Percebe-se, em geral, que quanto maior for o tempo de exposição do laser, maior será a profundidade atingida. No entanto, quanto mais profundo, menor é a taxa de penetração. A eficiência de perfuração diminui em função do aparecimento de efeitos secundários. Quanto maior o comprimento do furo, mais difícil se torna a remoção dos detritos gerados, pelo gás nitrogênio. Isso resulta no acúmulo de material no fundo do orifício, que, por sua vez, absorve parte da energia do laser, impedindo que ela chegue por inteira nas camadas subsequentes.

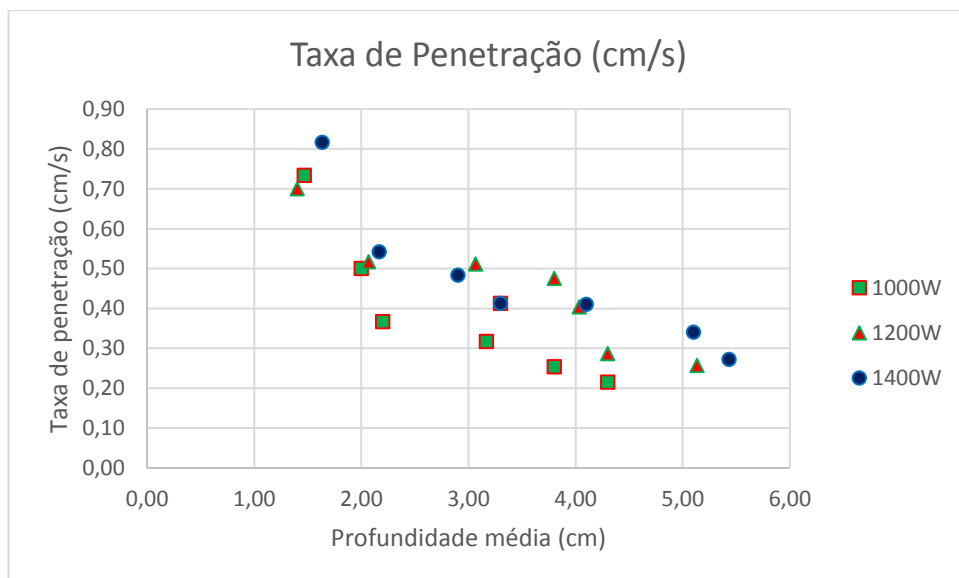


Figura 26: Valores de taxa de penetração para diferentes profundidades ao longo de uma amostra de Bege Bahia.

Além disso, em virtude da focalização do feixe do laser, o diâmetro do mesmo cresce com o aumento da distância entre a lente e a amostra, diminuindo a densidade de potência e, conseqüentemente, a eficiência do processo. Outro aspecto observado nesse tipo de rocha foi a presença de “espaços vazios” no seu interior, que aumentam a possibilidade de erros de medição, uma vez que o laser não foi responsável por tais orifícios.

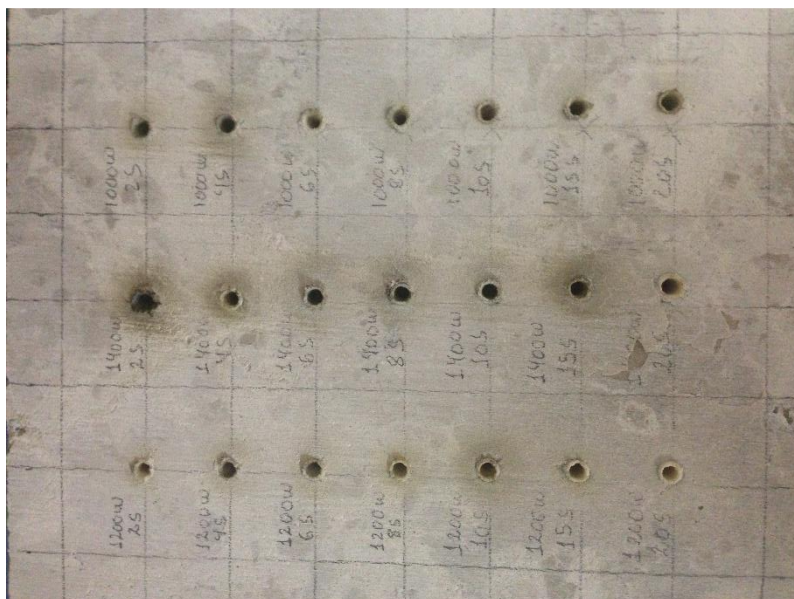


Figura 27: Furos realizados em um bloco de Bege Bahia para medir a taxa de penetração em função da profundidade.

5.1.2. Arenito

Como dito anteriormente, os experimentos não foram realizados apenas em rochas carbonáticas. Outro ensaio de perfuração foi feito com um testemunho de arenito com formato cilíndrico, medindo 38mm de diâmetro e 88mm de altura, extraído a uma profundidade de 3825 pés. Nele, foram realizados quatro furos com as potências de 600, 800, 1000 e 1200W e um tempo de exposição do feixe de 2 segundos para cada um (tabela 11).

Tempo (s)	Potência (W)	Volume removido (mm ³)	Energia específica (kJ/cm ³)
2	600	100	12,0
	800	120	13,3
	1000	140	14,3
	1200	160	15,0

Tabela 11: Valores de volume removido e de energia específica em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3825 pés.

Nesse caso, ao contrário dos resultados observados anteriormente em rochas carbonáticas, a energia específica aumenta com a elevação da potência aplicada.

Isso acontece em virtude do processo de remoção mais eficiente para o arenito ser a espalação térmica, a qual ocorre em torno de 573°C . A energia específica aumentou, pois a temperatura de espalação foi ultrapassada, causando o derretimento da amostra. Esse material derretido é mais difícil de ser removido, o que aumenta os efeitos secundários e diminui a eficiência do processo.

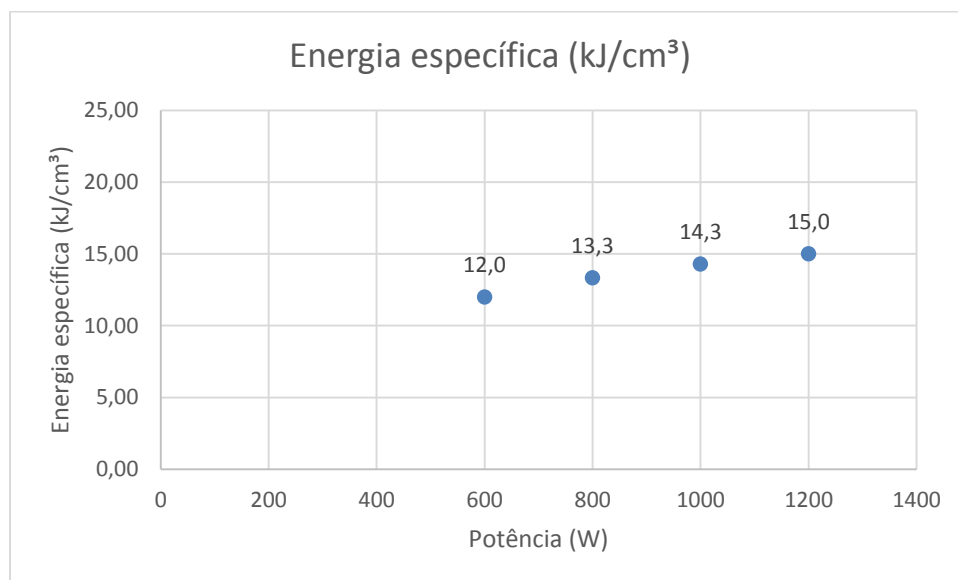


Figura 28: Valores de energia específica para diferentes potências, durante dois segundos, em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3825 pés.

Utilizando um outro testemunho com as mesmas características, foram feitos mais quatro furos com os mesmos valores de potência, porém com quatro segundos de duração (tabela 12).

Tempo (s)	Potência (W)	Volume removido (mm³)	Energia específica (kJ/cm³)
4	600	120	20,0
	800	140	22,9
	1000	200	20,0
	1200	220	21,8

Tabela 12: Valores de volume removido e de energia específica, durante quatro segundos em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3825 pés.

Já para essa segunda amostra, houve uma elevação no tempo de exposição do feixe, aumentando a energia fornecida. Assim, a temperatura local, a quantidade de

material derretido e os efeitos secundários tornaram-se ainda maiores. Como resultado, o pequeno aumento no volume removido não compensou a elevação da energia e o processo tornou-se ainda menos eficiente.

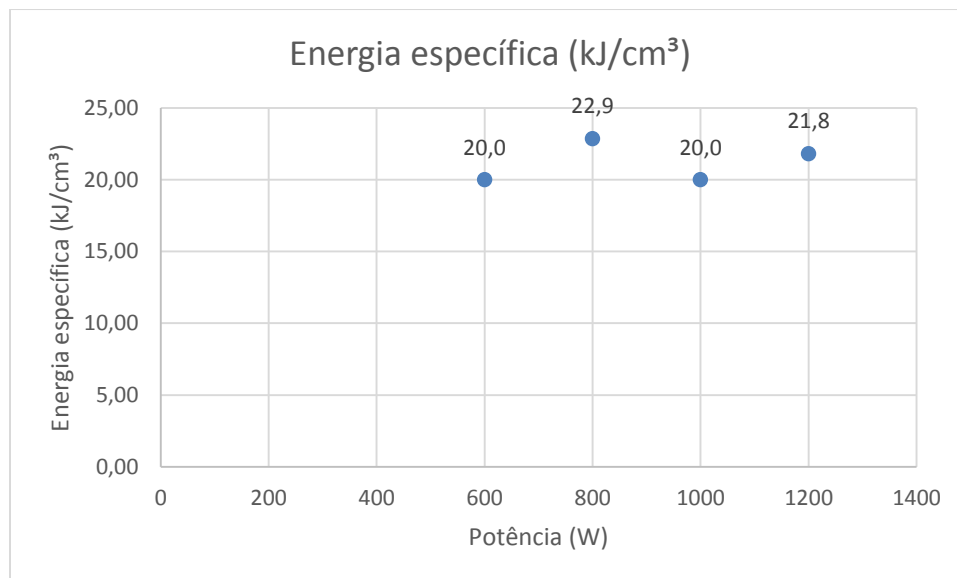


Figura 29: Valores de energia específica para diferentes potências, durante quatro segundos em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3825 pés.



Figura 30: Testemunho de arenito retirado de uma profundidade de 3825 pés, antes e depois da aplicação do laser.

Mais dois testemunhos de arenito medindo 38mm de diâmetro e 85mm de altura, retirados de uma profundidade de 3833 pés, foram submetidos aos mesmos procedimentos experimentais citados anteriormente, primeiramente com um tempo de exposição do feixe de 2 segundos (tabela 13).

Tempo (s)	Potência (W)	Volume removido (mm ³)	Energia específica (kJ/cm ³)
2	600	160	7,5
	800	180	8,9
	1000	200	10,0
	1200	220	10,9

Tabela 13: Valores de volume removido e de energia específica, durante dois segundos, em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3833 pés.

De acordo com os resultados encontrados, percebe-se o mesmo comportamento observado anteriormente para amostras de arenito: aumento da energia específica com a elevação da potência. Porém, nesse experimento, houve uma melhora na eficiência. Um dos motivos pode ter sido a menor quantidade de sílica aparentemente apresentada, a qual é ainda mais difícil de ser removida quando derretida.

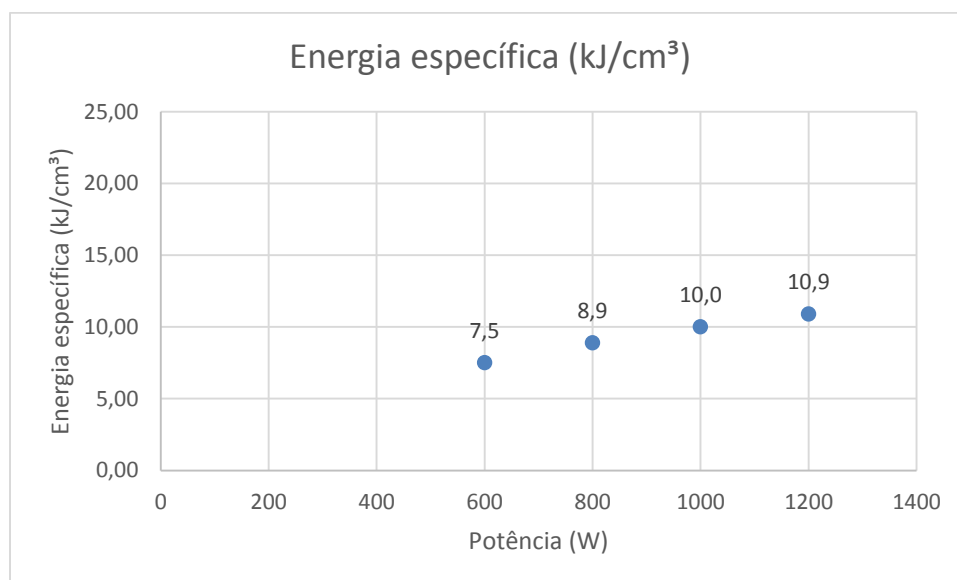


Figura 31: Valores de energia específica para diferentes potências, durante dois segundos em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3833 pés.

Em seguida, o ensaio foi repetido, mas com um tempo de exposição do feixe de quatro segundos (tabela 14).

Tempo (s)	Potência (W)	Volume removido (mm ³)	Energia específica (kJ/cm ³)
4	600	200	12,0
	800	260	12,3
	1000	340	11,8
	1200	400	12,0

Tabela 14: Valores de volume removido e de energia específica, durante 4quatro segundos, em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3833 pés.

Novamente, houve uma queda na eficiência comparada ao tempo de exposição do feixe de 2 segundos em virtude de o aumento no volume removido não ter compensado a elevação da energia. Isso resultou em efeitos secundários mais intensos.

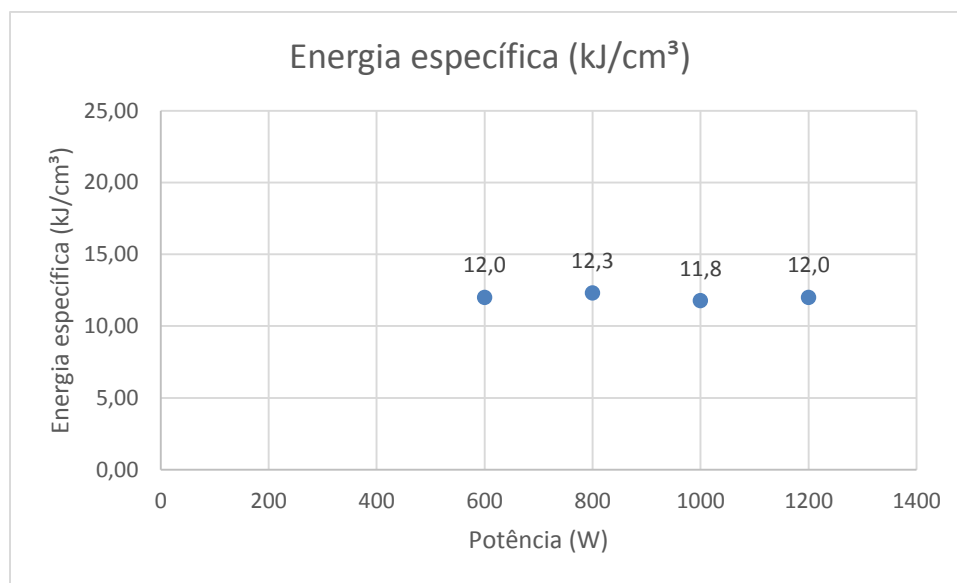


Figura 32: Valores de energia específica para diferentes potências, durante quatro segundos, em um testemunho de arenito retirado a uma profundidade de 3833 pés.



Figura 33: Testemunho de arenito retirado de uma profundidade de 3833 pés, antes e depois da aplicação do laser.

De acordo com os ensaios realizados com amostras de arenito, percebeu-se que esse tipo de formação é menos resistente do que as de origem carbonáticas. Estudos realizados mostraram que o processo de remoção mais eficiente utilizando-se laser para o arenito é o de espalação [15]. Ou seja, por meio da expansão térmica, principalmente do Quartzo, tensões são produzidas, gerando o craqueamento do material. Isso explica o fato de maiores valores de energia fornecidos terem proporcionado maiores valores de energia específica. A temperatura responsável pela espalação foi ultrapassada e o ponto de derretimento foi atingido. Esse material derretido prejudica a eficiência do processo, uma vez que absorve boa parte da energia disponível, impedindo que ela chegue integralmente à próxima camada a ser atingida.

Vale ressaltar que o primeiro testemunho de arenito ensaiado aparentava possuir grande quantidade de sílica, que é um material muito difícil de ser removido. Isso pode ter causado o aparecimento de efeitos secundários mais intensos, resultando em um processo menos eficiente.

5.1.3. Folhelho

Por último, foram utilizados dois testemunhos de folhelho medindo 38mm de diâmetro e 75mm de altura. Essas amostras foram perfuradas sob as mesmas condições anteriores, 600, 800, 1000 e 1200W durante 2 (tabela 15) e 4 segundos (tabela 16).

Tempo (s)	Potência (W)	Volume removido (mm ³)	Energia específica (kJ/cm ³)
2	600	220	5,5
	800	240	6,7
	1000	400	5,0
	1200	460	5,2

Tabela 15: Valores de volume removido e de energia específica, durante dois segundos, em um testemunho de folhelho.

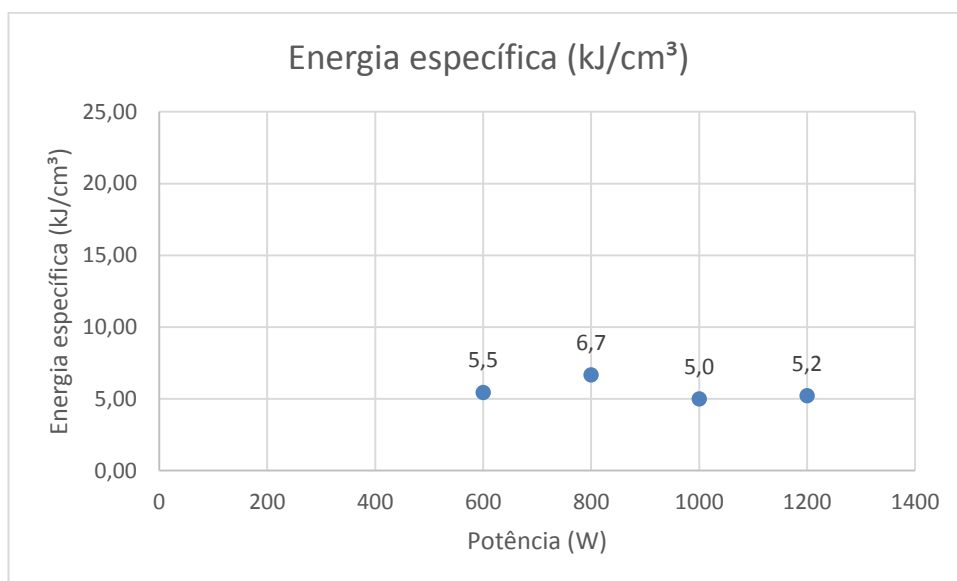


Figura 34: Valores de energia específica para diferentes potências, durante dois segundos, em um testemunho de folhelho.

Tempo (s)	Potência (W)	Volume removido (mm ³)	Energia específica (kJ/cm ³)
4	600	240	10,0
	800	280	11,4
	1000	460	8,7
	1200	520	9,2

Tabela 16: Valores de volume removido e de energia específica, durante 4 segundos em um testemunho de folhelho.

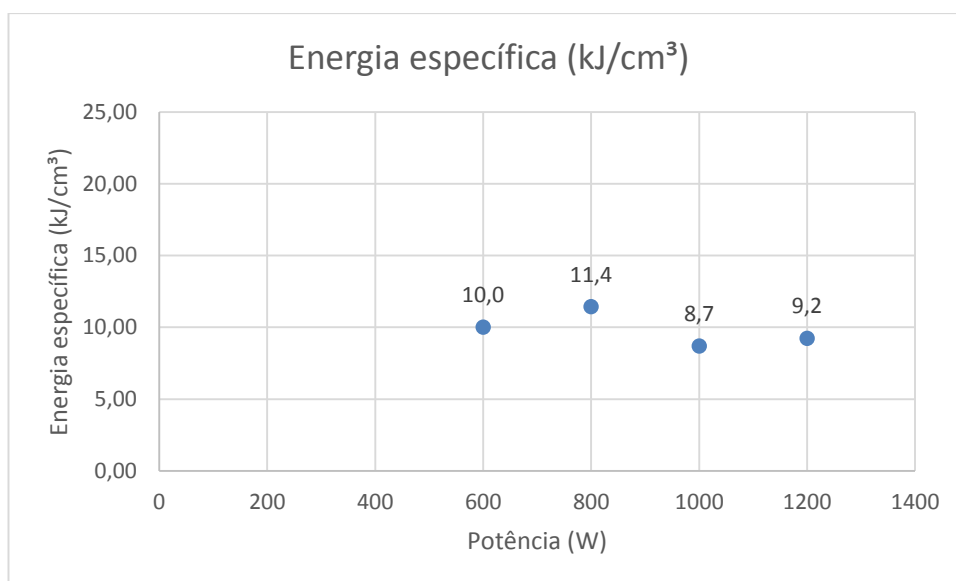


Figura 35: Valores de energia específica para diferentes potências, durante quatro segundos, em um testemunho de folhelho.

Foi possível observar, diante dos experimentos realizados com amostras de folhelho, que uma menor quantidade de energia é necessária para se alcançar valores ainda menores de energia específica. Utilizando-se uma potência de 1000W durante 2 segundos chegou-se a um valor de energia específica de 5,0 kJ/cm³. Porém, mais uma vez, o aumento no tempo de exposição do feixe resultou em uma maior energia fornecida, a qual não foi compensada em função do pequeno ganho no volume removido, gerando uma redução da eficiência.

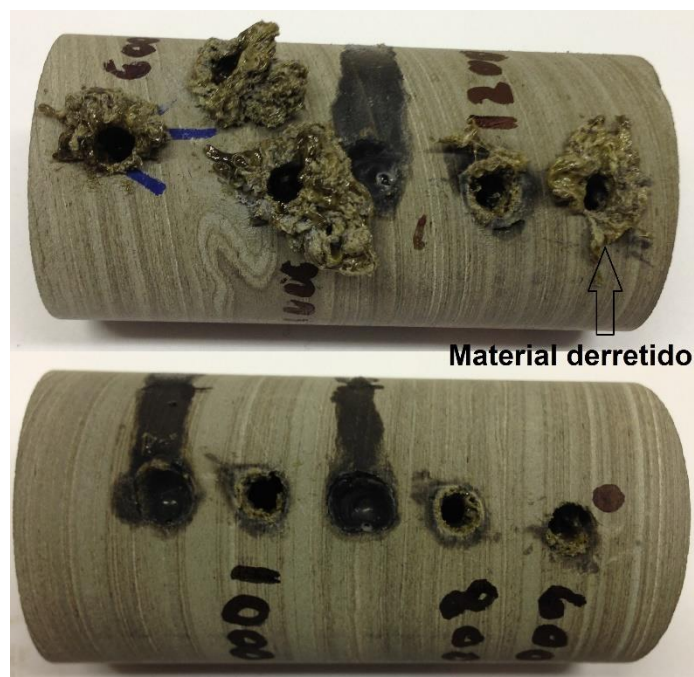


Figura 36: Amostra de folhelho após a aplicação do laser.

5.2.

Ensaio de corte

Os ensaios de corte foram conduzidos a fim de encontrar as características mais apropriadas referentes ao processo, de maneira a alcançar os melhores valores de energia específica. Para isso, vários experimentos foram realizados e diversos resultados de energia específica de corte foram calculados.

Dessa vez, fazendo uso apenas das amostras de Bege Bahia, os ensaios dinâmicos foram feitos. Assim, cortes foram produzidos utilizando-se as potências de 1000 e 1400W. Para cada potência aplicada, foram testados dois valores de distância focal, que originaram dois diâmetros de feixe, 1,5mm e 3,5mm e, consequentemente, diferentes valores de densidade de potência (DP), representada pela razão entre a potência óptica do laser, expressa em Watts (W) e a área irradiada, expressa em centímetros quadrados (cm²). Além disso, para cada configuração de densidade de potência, foram utilizadas as velocidades de corte de 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 2000 e 3000mm/min. Para encontrar a profundidade de cada corte, foi feita uma média de cinco pontos espalhados ao longo da linha removida pelo laser.

Os primeiros ensaios, configurando-se o laser para operar com 1000W de potência e com um feixe de 3,5mm de diâmetro, gerando uma densidade de potência de 10,4 kW/cm², apresentaram resultados diferentes (tabela 17).

Potência (W)	Corte (mm)	Diâmetro (mm)	w (mm/min)	Prof. média (mm)	EEC (Kj/cm ²)
1000	50	3,5	50	12,8	9,4
1000	50	3,5	100	9,2	6,5
1000	50	3,5	200	4,7	6,4
1000	50	3,5	400	2,9	5,2
1000	50	3,5	600	2,1	4,8
1000	50	3,5	800	1,6	4,7
1000	50	3,5	1000	1,2	5,0
1000	50	3,5	2000	0,5	6,0
1000	50	3,5	3000	0,3	5,9

Tabela 17: Resultados de profundidade média e de energia específica de corte para o Bege Bahia, utilizando-se 1000W de potência e diâmetro de feixe de 3,5mm.

Com o aumento da velocidade, houve a diminuição da energia específica, chegando a 4,7 kJ/cm², no momento em que foi atingido 800mm/min. A partir disso, o ponto de saturação foi atingido e o valor de energia específica de corte piorou. A elevada velocidade de corte causou a diminuição do tempo de exposição do feixe em cada ponto da amostra. Aliado a isso, o baixo valor de densidade de potência não foi capaz de gerar um valor de profundidade suficiente que diminuísse significativamente a energia específica.

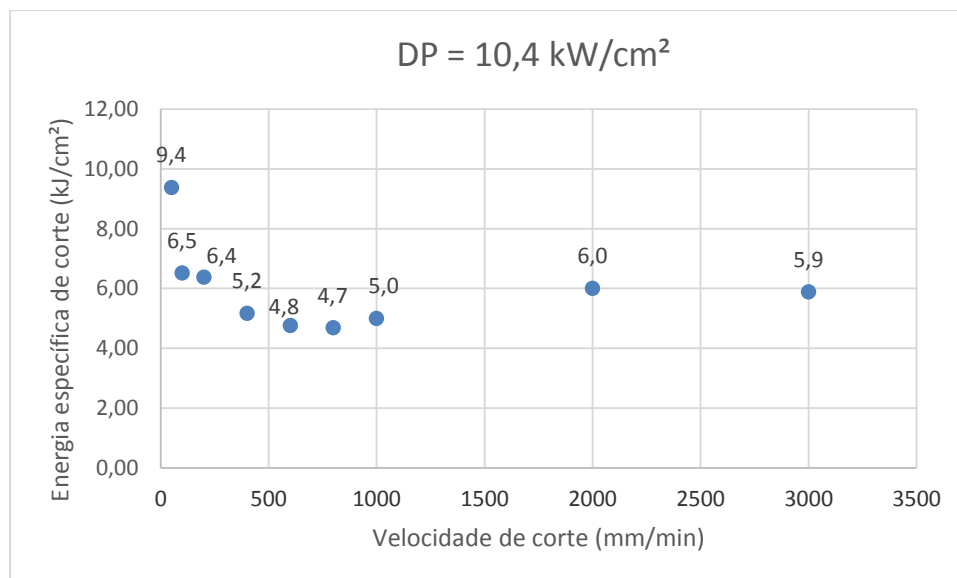


Figura 37: Valores de energia específica de corte para diferentes velocidades e densidade de potência de 10,4 kW/cm².

Aumentando-se a potência de 1000 para 1400W, elevou-se a densidade de potência para 14,6 kW/cm² (tabela 18) e observaram-se resultados bastante parecidos aos do experimento anterior.

Potência (W)	Corte (mm)	Diâmetro (mm)	w (mm/min)	Prof. média (mm)	EEC (Kj/cm²)
1400	50	3,5	50	16,3	10,3
1400	50	3,5	100	8,8	9,6
1400	50	3,5	200	6,6	6,4
1400	50	3,5	400	3,9	5,4
1400	50	3,5	600	2,8	5,0
1400	50	3,5	800	2,0	5,3
1400	50	3,5	1000	1,5	5,6
1400	50	3,5	2000	0,7	6,0
1400	50	3,5	3000	0,5	5,8

Tabela 18: Resultados de profundidade média e de energia específica de corte para o Bege Bahia utilizando-se 1400W de potência e diâmetro de feixe de 3,5mm.

Dessa vez, o ponto de saturação foi atingido com uma velocidade de 600 mm/min e com uma energia específica de corte de 5,0 kJ/cm².

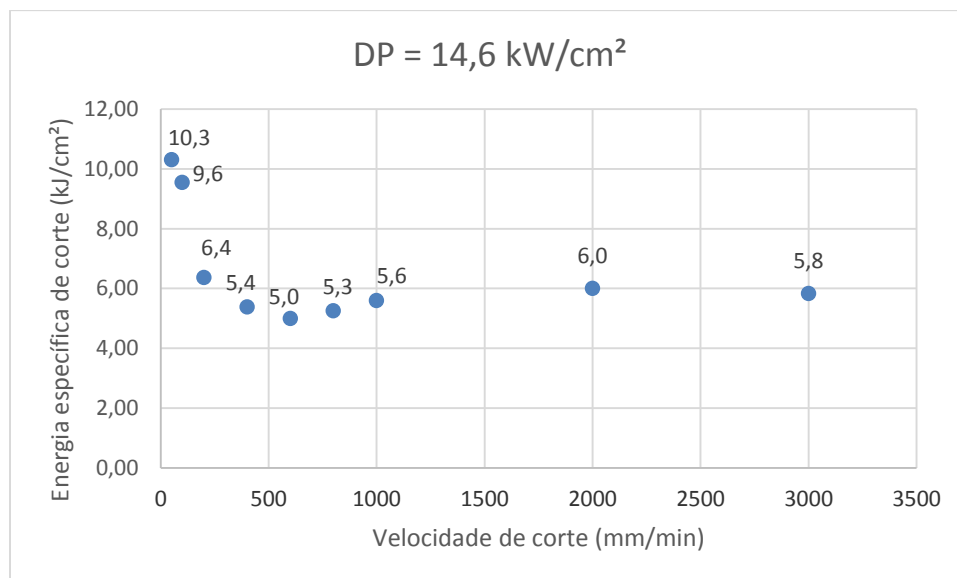


Figura 38: Valores de energia específica de corte para diferentes velocidades e densidade de potência de 14,6 kW/cm².

Um novo experimento mostrou um comportamento diferente do observado nos ensaios anteriores. Dessa vez, utilizando 1000W, reduziu-se a distância focal, originando um diâmetro de feixe de 1,5mm e uma densidade de potência de 56,5 kW/cm² (tabela 19).

Potência (W)	Corte (mm)	Diâmetro (mm)	w (mm/min)	Prof. média(mm)	EEC (Kj/cm²)
1000	50	1,5	50	18,1	6,6
1000	50	1,5	100	11,6	5,2
1000	50	1,5	200	7,4	4,1
1000	50	1,5	400	3,3	4,6
1000	50	1,5	600	2,0	5,0
1000	50	1,5	800	1,9	4,0
1000	50	1,5	1000	1,7	3,5
1000	50	1,5	2000	1,0	3,0
1000	50	1,5	3000	0,7	2,9

Tabela 19: Resultados de profundidade média e de energia específica de corte para o Bege Bahia utilizando-se 1000W de potência e diâmetro de feixe de 1,5mm.

Apesar de ter apresentado um comportamento diferente nas velocidades de 400 e 600 mm/min, pode-se observar que a energia específica de corte diminui com

o aumento da velocidade. Sendo assim, o resultado mais eficiente de 2,9 kJ/cm² ocorreu com a maior velocidade utilizada de 3000 mm/min.

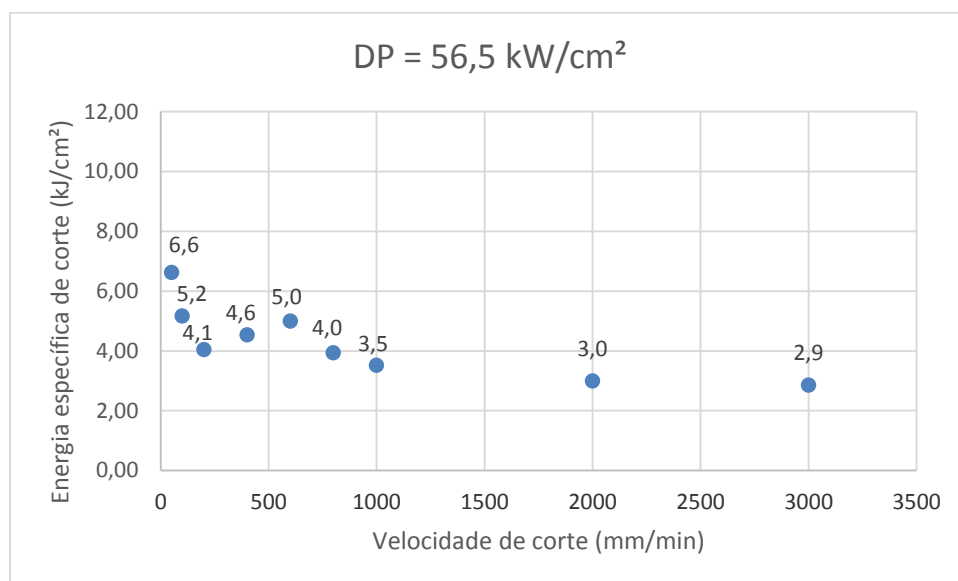


Figura 39: Valores de energia específica de corte para diferentes velocidades e densidade de potência de 56,5 kW/cm².

Por último, aumentando-se a potência de 1000 para 1400W e, consequentemente, a densidade de potência para 79,1 kJ/cm², foram notados resultados ainda melhores (tabela 20).

Potência (W)	Corte (mm)	Diâmetro (mm)	w (mm/min)	Prof. média(mm)	EEC (Kj/cm ²)
1400	50	1,5	50	28	6,0
1400	50	1,5	100	14	6,0
1400	50	1,5	200	7,2	5,8
1400	50	1,5	400	4,5	4,7
1400	50	1,5	600	3,0	4,7
1400	50	1,5	800	2,3	4,6
1400	50	1,5	1000	2,2	3,8
1400	50	1,5	2000	1,5	2,8
1400	50	1,5	3000	1,0	2,8

Tabela 20: Resultados de profundidade média e de energia específica de corte para o Bege Bahia utilizando-se 1400W de potência e diâmetro de feixe de 1,5mm.

Novamente, foi percebida a redução da energia específica com a elevação da velocidade. Dessa forma, o resultado mais eficiente de energia específica de corte, de 2,8 kJ/cm², ocorreu com as maiores velocidades utilizadas de 2000 e 3000 mm/min. Entretanto, para esse caso, é possível observar uma tendência de estabilização da energia específica que se manteve em 2,8 kJ/cm², mesmo com o aumento da velocidade de 2000 para 3000 mm/min. Tudo indica, em termos de eficiência, que, para utilizar maiores valores de velocidade de corte, acima de 3000 mm/min, seria preciso aumentar a densidade de potência.

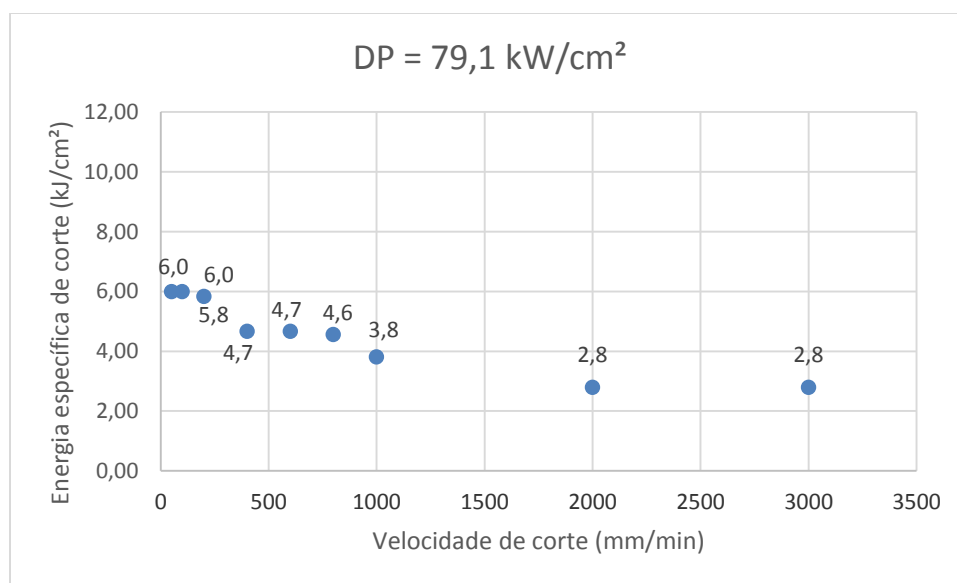


Figura 40: Valores de energia específica de corte para diferentes velocidades e densidade de potência de 79,1 kW/cm².

Em geral, pode-se dizer que valores maiores de densidade de potência demandam elevadas velocidades de corte. Já valores reduzidos de densidade de potência necessitam da diminuição da velocidade de deslocamento do feixe de forma a compensar as alterações dos valores das variáveis envolvidas no processo. Esses ajustes devem ocorrer proporcionalmente de maneira que a temperatura necessária para se alcançar o processo de calcinação seja atingida. Todavia, também deve ser evitado que a temperatura aumente a ponto de gerar o derretimento da amostra. Esse fato torna o processo menos eficiente em virtude da dificuldade de remoção desse material fundido que absorve parte da energia fornecida pelo laser.

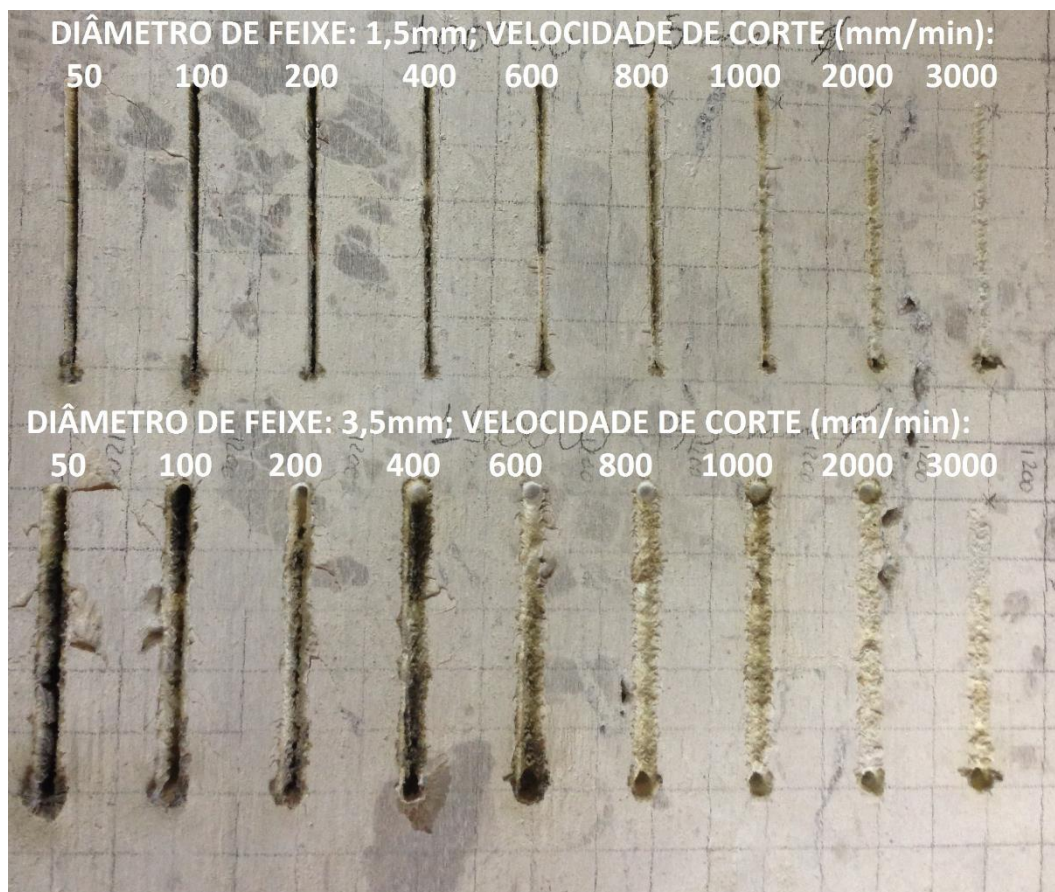


Figura 41: Diferença entre cortes realizados com diâmetros de feixe de 1,5mm e 3,5mm em amostra de Bege Bahia.

5.3. Ensaio de corte em túnel

Como explicado anteriormente, o processo de perfuração a laser torna-se inviável utilizando-se apenas um feixe de forma estática, uma vez que não é possível gerar diâmetros significativos sem prejudicar a densidade de potência. Para produzir furos com largura suficiente de modo a aumentar a área de escoamento de fluidos, alguma intervenção deve ser feita. Assim, estudos realizados mostraram o uso de múltiplos feixes de pequenos diâmetros atingindo uma determinada superfície, de forma que o somatório das áreas geradas resultaria no formato do furo desejado. Porém, o foco desta dissertação é verificar a viabilidade de outra técnica, ainda pouco estudada no campo da perfuração de poços: o corte em túnel.

A operação de corte em túnel é caracterizada pela movimentação circular do laser em uma determinada superfície. A intenção é gerar círculos concêntricos, separados entre eles por uma distância H , de forma a fragilizar toda a região

atingida, alcançando um furo com o diâmetro do maior círculo realizado. Dessa forma, o processo é repetido por várias vezes, até que a profundidade requerida seja obtida.

Fazendo uso dos resultados previamente encontrados nos ensaios de corte, foram realizados experimentos a fim de verificar a fragilização da amostra escolhida. Para isso, foram utilizadas placas de Bege Bahia de 25cm x 25cm e 5cm de espessura. As características de operação definidas para o laser, 1400W de potência, diâmetro de feixe de 1,5mm e velocidade de corte de 3000mm/min, basearam-se no melhor valor de energia específica de corte encontrado até então, 2,8kJ/cm². Também foi definido que o diâmetro da maior circunferência, conseqüentemente o diâmetro resultante do furo, seria de 10cm, já que esse valor estaria próximo daquele perfurado em zonas de reservatório.

Assim, o primeiro ensaio de corte em túnel foi realizado com a utilização de um H (distância entre os cortes) de 5mm.



Figura 42: Corte em túnel realizado com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 5mm.

Em seguida, sob as mesmas características, foram repetidos os procedimentos em até 4 vezes sobre os cortes já realizados.

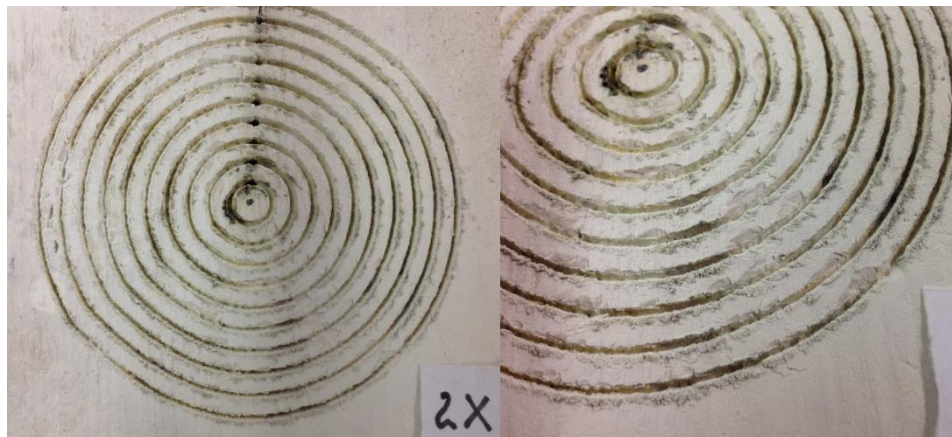


Figura 43: Corte em túnel realizado duas vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 5mm.



Figura 44: Corte em túnel realizado três vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 5mm.



Figura 45: Corte em túnel realizado cinco vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 5mm.

Visualizando-se as imagens, percebe-se que mesmo com a execução de 5 cortes sobre o mesmo ponto, não foi possível fragilizar o suficiente a região demarcada com um H de 5mm. A estrutura remanescente entre os cortes permaneceu relativamente firme mesmo com o gás de limpeza agindo sobre ela. Entretanto, acredita-se que seja possível remover as paredes entre os cortes a partir da utilização de outros fluidos de limpeza sob maiores pressões.

Com o intuito de continuar a investigação referente ao espaçamento entre os cortes, foi reduzido o valor de H, a fim de gerar danos maiores à amostra. Para a próxima etapa, foi utilizado um espaçamento entre os cortes de 2,5mm. Todas as características de operação do laser foram mantidas.

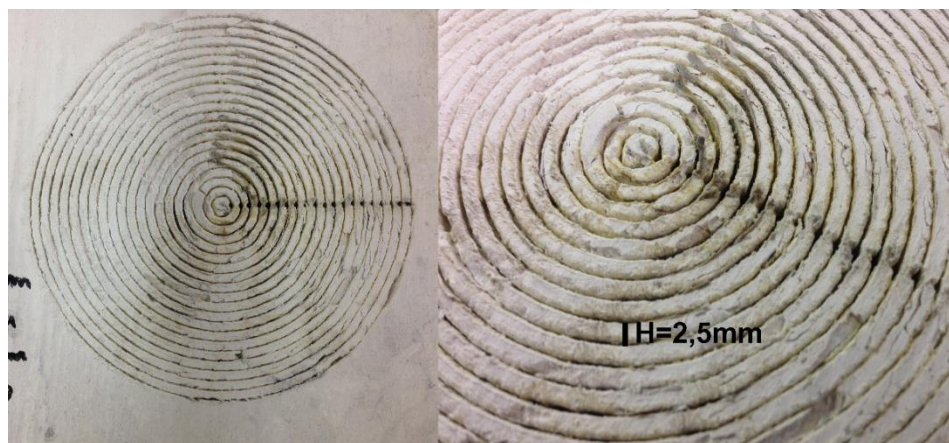


Figura 46: Corte em túnel realizado com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 2,5mm.



Figura 47: Corte em túnel realizado 2 vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 2,5mm.



Figura 48: Corte em túnel realizado três vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 2,5mm.



Figura 49: Corte em túnel realizado cinco vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 2,5mm.

Pode-se observar que utilizando um espaçamento entre os cortes de 2,5mm a região atingida foi bem mais fragilizada do que no caso anterior. Alguns resquícios de rocha que ficaram entre os cortes desmoronaram e os que permaneceram de pé estavam bastante fragilizados, com uma espessura muito fina.

Por último, a fim de se alcançar ainda melhores resultados, o H foi mais uma vez reduzido à metade, agora, com um valor de 1,25mm. Porém, como o diâmetro do feixe é de 1,5mm, nesse caso, houve a sobreposição dos cortes e toda a área atingida foi removida.



Figura 50: Corte em túnel realizado com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 1,25mm.



Figura 51: Corte em túnel realizado duas vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 1,25mm.

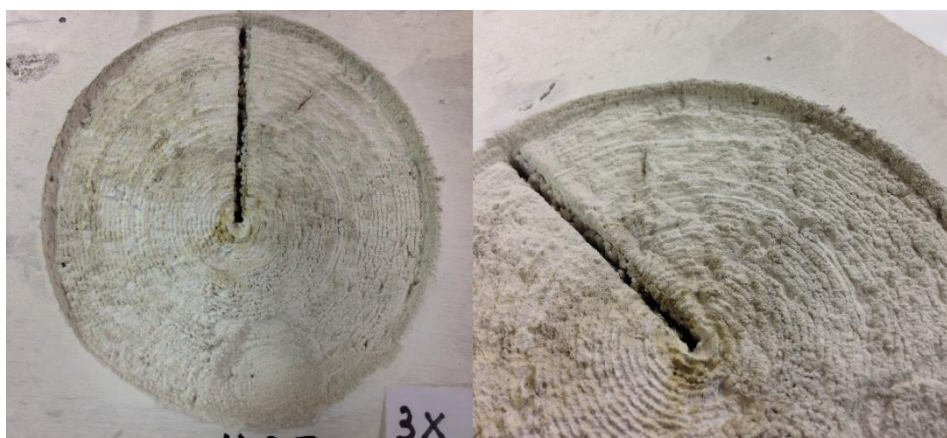


Figura 52: Corte em túnel realizado três vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 1,25mm.

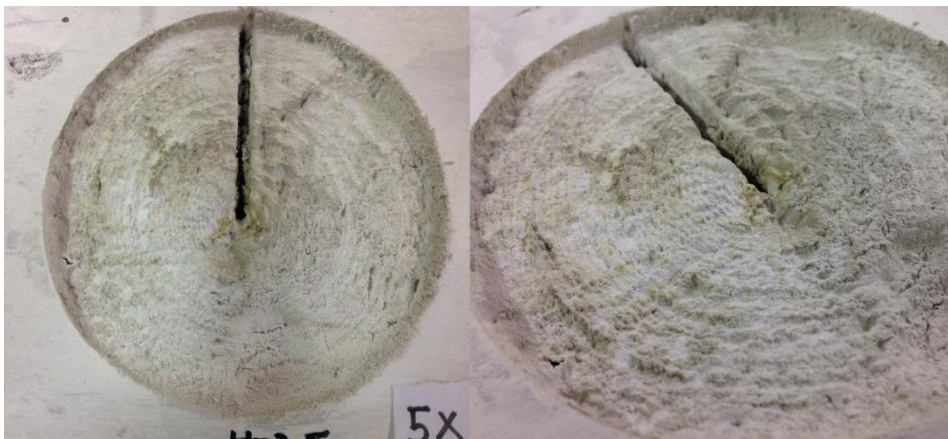


Figura 53: Corte em túnel realizado cinco vezes sobre o mesmo ponto com 1400W, 1,5mm de diâmetro de feixe, 3000 mm/min e H de 1,25mm.

Por meio das imagens mostradas, é possível observar que a área demarcada foi completamente removida utilizando um espaçamento entre os cortes de 1,25mm.



Figura 54: Corte em túnel realizado cinco vezes sobre o mesmo ponto.

Utilizando a equação abaixo, é possível calcular o tempo total requerido para o procedimento de corte em túnel para cada valor de H.

$$E_{ec} = \frac{4 P H t}{\pi d D (D + 2H)} \quad (13)$$

Isolando-se o tempo, temos que:

$$t = \frac{E_{ec} \cdot \pi d D (D + 2H)}{4 P H} \quad (14)$$

Além disso, considerando a profundidade média alcançada de 1mm e a equação abaixo (15), é possível calcular a taxa de penetração do sistema:

$$ROP = \frac{d}{t} \quad (15)$$

Assim, substituindo-se os valores, chegamos aos seguintes resultados:

H (mm)	t (s)	ROP (m/h)	EE (kJ/cm ³)
5mm	34,6	0,11	6,2
2,5mm	66,0	0,06	11,8
1,25mm	128,8	0,03	23,0

Tabela 21: Valores de tempo, taxa de penetração e energia específica em função dos espaçamentos entre os cortes.

Os valores de taxa de penetração encontrados, utilizando equipamentos com restrições operacionais, já não estão tão distantes daquela produzida pelos mecanismos de perfuração convencionais em rochas carbonáticas, que está em torno de 2,0m/h [6]. Vale lembrar que estamos considerando um diâmetro de furo de 10 cm, ou seja, quanto menor for essa dimensão – o que é o caso do orifício resultante do método de canhoneio na completação de poços –, menor será o tempo de operação do laser e o número de cortes, gerando maior taxa de penetração.

Foi calculado também o valor de energia específica para cada caso. Esse termo pode ser utilizado quando há um volume removido resultante. Para os valores de H de 5 e 2,5mm, sobraram alguns resquícios de rocha, os quais talvez pudessem ser removidos através de sistemas de limpeza mais eficientes, viabilizando os valores de energia específica encontrados. Já para um H de 1,25mm, o volume foi

completamente removido e o valor de energia específica foi parecido com o encontrado para o Bege Bahia em processos estáticos. Porém, no caso dinâmico, no qual é possível produzir furos com maiores diâmetros, a eficiência diminui de forma mais lenta. Isso porque foi comprovado, através dos experimentos, que quanto maior a profundidade maior é a energia específica do processo em função da redução da eficiência do agente de limpeza e da diminuição da densidade de potência do feixe do laser.

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1.

Conclusões

Diante das abordagens utilizadas e dos experimentos realizados, constatou-se que é possível remover volumes consideráveis de rochas fazendo uso de lasers. Os cálculos de eficiência ajudaram a definir as características de configuração dos equipamentos que tornariam o processo mais eficiente. A utilização de métodos dinâmicos, tratados com o conceito de energia específica de corte, resultou na criação de furos com maiores diâmetros, que se mostraram mais eficientes em função do tempo quando comparados aos métodos de perfuração a laser estáticos. A intenção foi construir um canal suficientemente largo de modo a possibilitar um bom fluxo de óleo, baseado nas dimensões produzidas a partir de métodos de perfuração convencionais.

Os resultados obtidos foram os mais eficientes de acordo com a estrutura e os equipamentos disponíveis para os experimentos. Porém, acredita-se que dispondo de lasers mais potentes, de estruturas que permitam alcançar maiores velocidades de deslocamento do feixe e de sistemas de limpeza mais eficazes seja possível atingir taxas de penetração superiores às encontradas nos sistemas rotativos. Para isso, é preciso também que cada rocha seja analisada individualmente, a fim de definir as características dos equipamentos utilizados para perfurá-las. Isso garantirá que a temperatura ideal, responsável pelo melhor processo de remoção para cada formação, seja atingida. No caso de rochas carbonáticas, a temperatura deve estar entre 600 e 2600°C, pois é quando acontece a calcinação, gerando grande perda de massa, antes de atingir o derretimento, que prejudica a eficiência do processo. Já para o caso do arenito, não é desejável que a temperatura de 600°C, em que ocorre a espalação térmica, seja excedida, pois maiores valores geram o derretimento do material.

A partir do momento em que novos instrumentos mais apropriados forem introduzidos, novos experimentos devem ser realizados de forma a definir as

características de operação que tornam o processo mais eficiente. Assim, considerações diferentes poderiam ser feitas com a inserção de equipamentos mais robustos. Uma delas seria, por meio de um laser mais potente, gerar vários feixes de lasers movendo-se em conjunto sobre uma mesma superfície. Outra poderia utilizar um único feixe de laser com maior potência e aumentar a velocidade de deslocamento do mesmo. Nos dois casos, haveria a diminuição do tempo de fragilização de uma determinada área e, conseqüentemente, o aumento da taxa de penetração.

Foi observado também que a fixação do valor da energia fornecida pelo laser não garante que o volume removido será o mesmo e muito menos que a energia específica se manterá. Além disso, a taxa de penetração caiu com o aumento da profundidade. Primeiramente, porque a eficiência na remoção dos detritos gerados pela perfuração a laser diminui e os resíduos remanescentes absorvem parte da energia fornecida pelo laser, evitando que o mesmo atinja integralmente as camadas subsequentes. Em segundo lugar, em função da diminuição da densidade de potência, pelo fato de o feixe ser focalizado e ter o seu diâmetro aumentado com a elevação da profundidade. Uma lente colimada poderia manter constante a área do feixe independentemente da variação da distância, fazendo com que a densidade de potência fosse sempre a mesma.

A aplicação do laser na perfuração e completação de poços de petróleo poderia apresentar grandes vantagens em relação aos métodos tradicionais. Essas vantagens gerariam a redução nos custos de exploração de petróleo, que, por sua vez, possibilitariam a produção de reservatórios hoje não comerciais. A redução nos custos dos equipamentos a laser, o aperfeiçoamento da tecnologia e os pedidos de patentes já realizados indicam o potencial do laser aplicado à indústria petrolífera.

O Travertino e o Bege Bahia são rochas de composições semelhantes e podem representar as rochas carbonáticas encontradas nos reservatórios do pré-sal brasileiro. São rochas que possuem grande concentração de Calcita e Dolomita, no caso do Bege Bahia, quase 99%. No entanto, essas não são homogêneas e apresentam diferentes concentrações ao longo da sua estrutura. Dessa forma, alguns cuidados devem ser tomados, como a realização de um número significativo de experimentos para a obtenção de resultados mais confiáveis.

6.2.**Sugestões para trabalhos futuros**

Um fator que não foi considerado no desenvolvimento deste trabalho diz respeito à saturação da rocha. Todos os experimentos foram realizados apenas em rochas, sem qualquer tipo de fluido. Entretanto, sabemos que o processo torna-se diferente quando adicionados fluidos no caminho do laser. Esses fluidos podem servir de barreira à passagem do feixe e prejudicar a eficiência do processo. Dessa forma, novos estudos devem ser feitos a fim de entender melhor a interação entre laser e rochas que contenham fluidos em seus poros.

Referências Bibliográficas

- 1 THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2001.
- 2 MAUGERI, L. The Age of Oil. Praeger Publishers. Westport, 2006. P.207-218.
- 3 CONAWAY, C. F. The Petroleum Industry: A nontechnical Guide. Tulsa, Oklahoma, USA: PenWell, 1999.
- 4 GRAVES, R. M. et al., StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas Wells. SPE 49259. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 27-30 September, 1998.
- 5 XU, Z. et al., Application of High Powered Lasers to Perforated Completions. International Congress on Applications of Laser & Electro-Optics. Jacksonville, Florida, October 13-16, 2003.
- 6 AMARO, R. et al., Perfuração em Rochas Duras: das Tecnologias Convencionais Até o Potencial Uso do Laser. IBP 1285_12. Rio Oil & Gas Expo and Conference. Rio de Janeiro, 20 de setembro, 2012.
- 7 CHRYSSOLOURIS, G. et al., Journal of Manufacturing Science & Engineering, 1997. Vol. 119, No. 4(B), Pages 766-69.
- 8 O'BRIEN, D. G. et al., StarWars Laser Technology for Gas Drilling and Completions in the 21th Century. SPE 56625. Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 3-6 October, 1999.
- 9 COHN, S., CNBC Senior Correspondent. Gulf Rigs Stand Ready as Hurricane Season Arrives. June 1, 2013.
- 10 XU, Z. et al., Specific Energy for Laser Removal of Rocks. 20th International Congress on Application of Lasers & Electro-Optics. Jacksonville, Florida. October 15-18, 2001.
- 11 GRAVES, R. M. et al., Comparison of Specific Energy Between Drilling With High Power Lasers and Other Drilling Methods. SPE 77627. SPE

- Annual Technical Conference and Exhibition, Sab Antonio, Texas, 29 September-2 October, 2002.
- 12 BATARSEH, S. et al., Well Perforation Using High-Power Lasers. SPE 84418. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 5-8 October, 2003.
 - 13 SALEHI, B. C. et al., Laser Drilling – Drilling with the Power of Light. Gas Technology Institute. Des Plaines, Illinois, may, 2007.
 - 14 GAHAN, B. C. et al. Analysis of Efficient High-Power Fiber Lasers for Well Perforation. SPE 90661. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 26-29 September 2004.
 - 15 XU, Z. et al. Laser Spallation of Rocks for Oil Well Drilling. 23th International Congress on Application of Lasers & Electro-Optics. Chicago, Illinois, 2004.
 - 16 KESHAVARZI, R. et al., Laser Perforation for Hydraulic Fracturing in Oil and Gas Wells. 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, California, June 26-29, 2011.
 - 17 ELAHIFAR, B. et al., An Energy Based Comparison of Alternative Drilling Methods. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Muscat, Oman, 24-26 October, 2011.
 - 18 BAZARGAN, M. et al., Feasibility of Using Laser Bit Beside of Common Bits to Drilling Slim Holes. International Petroleum Technology Conference, Beijing, China, 26-28 march, 2013.
 - 19 BAZARGAN, M. et al., Utilization of Lasers in Petroleum Drilling Industry. International Petroleum Technology Conference, Beijing, China, 26-28 march, 2013.
 - 20 FORO ENERGY INC, 2012-2013. Disponível em: <<http://www.foroenergy.com>>. Acesso em: 25 nov. 2013.
 - 21 ROCHA, L. A. S., Perfuração Direcional. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2001. 3ª Edição.
 - 22 MAURER, W. C., Advanced Drilling Techniques. Petroleum Publishing Co., 1980.
 - 23 STEEN, W. M., MAZUMDER, J., Laser Material Processing. Springer, 2010.

- 24 TEALE, R., The Concept of Specific Energy in Rock Drilling. Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol.2, pp.57-73. Pergamon Press, 1965.
- 25 PARKER, R. et al. Drilling Large Diameter Holes in Rocks Using Multiple Laser Beams. Arvada, Colorado, U.S.A., 2001.
- 26 XU, Z. et al. Rock Perforation by Pulsed ND:YAG LASER. Chicago, Illinois, U.S.A., 2004.
- 27 XU, Z. et al. Laser Rock Drilling by a Super-Pulsed CO₂ Laser Beam. Chicago, Illinois, U.S.A., 2004.
- 28 XU, Z. et al. Specific Energy for Pulsed Laser Rock Drilling. Chicago, Illinois, U.S.A., 2003.
- 29 NAGAI, K. et al. Study on Rock Excavation with Laser. Japan, 2000.
- 30 DHAR, S. et al. A Review on Laser Drilling and its Techniques. Fatehgarh Sahib, Punjab, India, 1-3 December 2006.
- 31 PINTO, H. L. C. P. et al. Visão de Futuro da Construção de Poços. IBP1295_12A, Rio de Janeiro.
- 32 Inova Unicamp, 09 nov. 2009. Disponível em: <http://www.inovacao.unicamp.br/report/noticias/index.php?cod=642>. Acesso em: 06 fev. 2014.
- 33 GAS TECHNOLOGY INSTITUTE. KLEEFISCH, Mark S.; SALEHI, Iraj. TELESCOPIC LASER PURGE NOZZLE. WO 2013/023020 A1, 10 ago. 2011, 09 ago. 2012.
- 34 Grubb, Daryl L. et al. HIGH POWER LASER-MECHANICAL DRILLING BIT AND METHODS OF USE. US 2012/0255774 A1, 23 fev. 2012, 11 out. 2012.
- 35 FACULDADES CATÓLICAS, SOCIEDADE CIVIL MANTENEDORA DA PUC Rio. BRAGA, Arthur Martins Barbosa; MARTELLI, Cicero. DISPOSITIVO PARA PERFURAÇÃO A LASER. WO 2012/003560 A1, 08 jul. 2011, 12 jan. 2012.
- 36 GAS TECHNOLOGY INSTITUTE. PERRY, Kent; SALEHI, Iraj. LASER ASSISTED DRILLING. WO 2010/036318 A1, 29 set. 2008, 01 abr. 2010.
- 37 JAPAN OIL, GAS AND METALS NATIONAL CORPORATION. Norioka, Takao; Nishio, Hiroaki. Laser Drill Device. WO 2013/051611 A1, 11 abr. 2013.

- 38 Desco International, 2000-2014. Disponível em: < <http://www.desco-intl.com>>. Acesso em: 10 mar. 2014.
- 39 Petróleo e Gás. Disponível em: <<http://www.marcelogustavo.com/apospetromar/apospetro.html>>. Acesso em 10 mar. 2014.
- 40 Fracfocus, 2014. Disponível em: < <http://fracfocus.org/>>. Acesso em: 12 mar. 2014.
- 41 Ebah. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABY_cAC/seminario-cores-1>. Acesso em: 12 mar. 2014.
- 42 IPG Photonics. Disponível em: < <http://www.ipgphotonics.com/>>. Acesso em: 12 mar. 2014.
- 43 Exame. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/economia/noticias/bndes-deve-investir-r-405-bi-em-oleo-e-gas-ate-2016>>. Acesso em: 21 maio 2014.
- 44 Durham Energy Institute. Fracking e aquíferos: até onde chega uma fratura? Disponível em: < <https://www.dur.ac.uk/resources/refine/HydraulicFracturesRBportuguese.pdf> >. Acesso em: 21 maio 2014.
- 45 Haas Laser Technologies Inc. Disponível em: <<http://www.haaslti.com/laser-beam-delivery/fiber-laser-high-power-38mm.html>>. Acesso em: 08 jun. 2014.