

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Felipe Oliveira Furtado

**Análise mecânica e térmica do processo de laser
drilling em rocha Travertino por meio de sensores
FBGs**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Arthur Martins Barbosa Braga
Coorientadora: Sully Milena Mejia Quintero

Rio de Janeiro
Julho de 2018

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Aníbal e Jane, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. O carinho, força, determinação, dedicação e orgulho de vocês sempre me guiarão em busca do desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador Arthur Braga pelo estímulo e força na formação acadêmica, abrindo as portas do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica e pela significativa parcela de contribuição no estágio na *Stanford University*.

Aos queridos amigos de infância de Macaé, Gabriel, Marina, Beatriz, Gabriela, Saulo, Ramon, Roberta, Amanda, Luiza e Ana pelas risadas, alegrias, apoio e parceria durante tantos anos.

Aos órgãos CNPQ e CAPES pela bolsa de estudos concedida para graduação sanduíche na *University of Texas at Austin* e *Stanford University*. Meu sincero agradecimento por fazer parte de um projeto tão importante na minha formação e que me possibilitou viver um dos melhores anos da minha vida.

A todos os meus familiares que sempre torceram pelo meu sucesso. Aos meus avós Clélia, Manoel, José e Celeste que infelizmente não estão presentes para comemorar essa conquista, mas estão guiando meus passos do céu.

A Isabella pelo carinho, atenção e paciência nos momentos nos quais compartilhamos juntos.

Aos queridos amigos que a vida me proporcionou e que espero mantê-los para sempre. A amizade nem mesmo a força do tempo irá destruir.

RESUMO

Análise mecânica e térmica do processo de laser drilling em rocha Travertino por meio de sensores FBGs

Perfuração e completação são as atividades que mais demandam esforços, tempo e dinheiro dentre os processos da indústria de óleo e gás. Nesse sentido, novas tecnologias estão sempre sendo prototipadas, testadas e analisadas a fim de obter melhores resultados na exploração do reservatório. A perfuração por meio de brocas mecânicas vem sendo utilizada por mais de cem anos, garantindo taxas de penetração razoáveis em diferentes condições do campo. Apesar dessa tecnologia ainda ser bastante utilizada, o uso de ferramentas a laser pode incorporar benefícios tais como a diminuição do tempo de perfuração devido a maiores taxas de penetração, aumento na permeabilidade, melhor controle do furo como um resultado da maior precisão proporcionada pela aplicação do laser, além da redução do custo devido à baixa necessidade de troca de ferramentas durante o processo de perfuração. O principal benefício desse projeto, portanto, é analisar o comportamento mecânico e térmico de uma amostra de rocha Travertino durante o processo de perfuração a laser.

O teste foi conduzido em Travertino devido às suas similaridades com rochas carbonáticas encontradas na camada do pré-sal brasileiro.

Optical fiber Bragg grating sensors (FBGs), termopares e uma câmera térmica foram utilizadas para medir deformação e gradientes de temperatura produzidos em decorrência da aplicação do laser.

Os resultados mostraram uma correlação entre deformação cisalhante, altos gradientes de temperatura e áreas afetadas pelo uso do laser, que podem ser subdivididas em áreas fraturadas e evaporadas.

Logo, esse projeto tem por objetivo contribuir com informações relevantes para a discussão desta tecnologia inovadora que pode mudar a concepção dos convencionais processos de perfuração utilizados atualmente.

Palavras chaves: perfuração, laser, Travertino, FBGs, rochas carbonáticas.

ABSTRACT

Laser drilling mechanical and thermal analysis of a Travertine sample using FBGs sensors

Drilling and well completions are the processes that most require efforts in terms of time and money in the oil and gas industry processes. Based on this fact, new technologies are always been prototyped, tested and analyzed in order to achieve greater results in reservoirs exploitation. Mechanical drilling has been in the field for more than a hundred years accomplishing decent rate of penetrations in different types of environments.

Even though this technology is still useful the use of laser tools could bring benefits in terms of decrease of drilling time due to greater rates of penetrations, increase of reservoir permeability, better drill hole control as a result of laser precision and cost reduction due to low necessity to change bits and drill pipes.

The main purpose of this project, therefore, is to analyze the mechanical and thermal behavior of a Travertine sample during laser drilling. The test was conducted on Travertine due to its similar characteristics to Brazilian pre-salt layer carbonate rocks.

Optical fiber Bragg grating sensors (FBGs), thermocouples and a thermal digital camera were used to measure strain and temperature gradients developed during the laser drilling process.

The results showed a correlation between shear deformation, high temperature gradients and the areas affected by the use of laser, which can be divided in fractured and evaporated.

Hence, this project intends to contribute in the discussion of such innovative technology that may change how the world sees the drilling process.

Keywords: Laser, drilling, laser drilling, FBGs, thermocouples, Travertine, carbonate rocks.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3 SETUP EXPERIMENTAL	18
4 ANÁLISE MECÂNICA	23
5 ANÁLISE TÉRMICA	28
6 CONCLUSÃO	29
7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	31

Lista de figuras

Figura 1 – Maiores produtores de óleo bruto. Fonte: EIA website.	8
Figura 2 – Relação preço e consumo barril de petróleo. Fonte: <i>BP Statistical Review of World Energy; EIA [3]</i>	9
Figura 3 – Esquemática das camadas, perfuração offshore. Fonte: PETROBRAS, 2014.....	10
Figura 4 – Equipamentos essenciais para perfuração. Fonte: Paul Bommer, Notas de aula UT Austin, 2016.....	11
Figura 5 – Etapas do canhoneio [16].....	12
Figura 6 – Modos de remoção de rocha, segundo Maurer (1980) [16]	14
Figura 7 – Evolução de potência e custo ao longo dos últimos anos. Fonte: <i>FORO Energy website</i>	17
Figura 8 – Equipamento FORO Energy laser drilling. Fonte: <i>FORO Energy website</i>	17
Figura 9 - Amostra de Travertino utilizada.....	18
Figura 10 - Esquemático da instrumentação de FBGs e termopares na amostra rochosa	19
Figura 11 – Foto da face superior instrumentada	20
Figura 12 - Foto do aparelho de Laser a fibra YLS-1500 do laboratório da PUC-RJ	21
Figura 13 - Câmera termográfica FLIR SC660	22
Figura 14 - Foto obtida durante o teste nas instalações do LSFO	22
Figura 15 - Gráfico deformação vs tempo roseta 45°	24
Figura 16- Foto da face superior da amostra após término do teste.....	25
Figura 17 - Foto mostrando a propagação na profundidade da amostra	27
Figura 18 – Temperatura vs Tempo para diferentes distâncias do centro	28

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros Aplicação Laser YLS-1500 TR	22
Tabela 2 – Propriedades mecânicas Travertino	23

1 Introdução

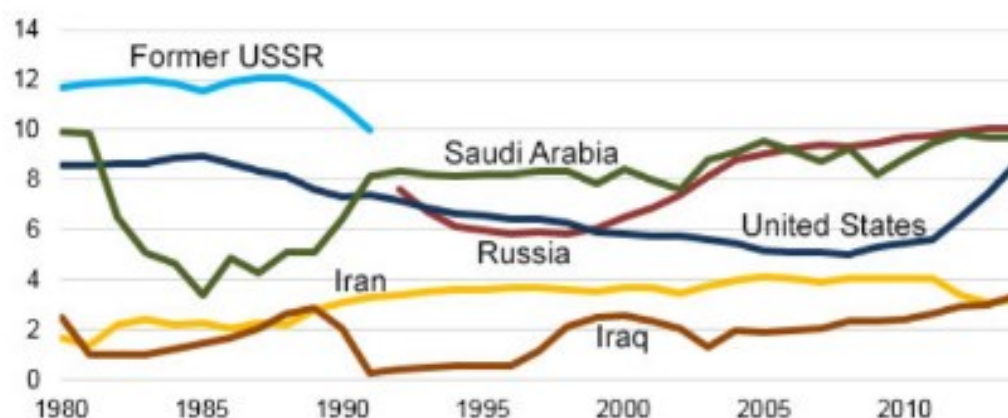
O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos que é formado pelo acúmulo de material orgânico em bacias sedimentares sob determinadas condições de pressão e isolamento por milhares de anos em ambientes terrestres e marítimos. [1]

O início da utilização do betume, uma das formas do petróleo, se dá na antiga Babilônia para fins de calafetação de embarcações e assentamento de tijolos. Além disso, há registros do uso do petróleo para pavimentação de estradas, embalsamar mortos e construção de pirâmides pelos egípcios. O produto era retirado exclusivamente por exsudações naturais em todos os continentes. [2]

Sua exploração comercial, no entanto, tem início no estado da Pensilvânia, nos Estados Unidos, em 1859, quando foi descoberto por Edwin Laurentine Drake um poço de 21 metros de profundidade, com produção média de 2 m³/dia. [2]

A partir do refino do petróleo e da exploração, muitos produtos e subprodutos surgiram e continuam sendo descobertos, o que torna a busca pelo produto incessante. A figura 1 ilustra os cinco maiores produtores de barris de petróleo por dia, e as quantidades produzidas reafirmam o caráter essencial deste recurso natural.

Top five crude oil producing countries, 1980–2016
million barrels per day



Note: Includes crude oil plus lease condensate. Ranking based on production in 2016.

Source: U.S. Energy Information Administration, *International Energy Statistics*, as of April 2017



Figura 1 – Maiores produtores de óleo bruto. Fonte: EIA website.

Cabe ressaltar, no entanto, que a indústria de óleo e gás é volátil, como pode ser observado na figura 2, ou seja, o preço do produto varia significativamente. Nesse sentido, faz-se necessário entender que investimentos em novas tecnologias e processos são acompanhados de fases onde o preço do barril consegue sustentar o desenvolvimento laboratorial e testes em campo, os quais demandam tempo e, principalmente, dinheiro. Porém, nota-se que, independentemente das flutuações de mercado, o consumo do produto segue num crescente considerável.

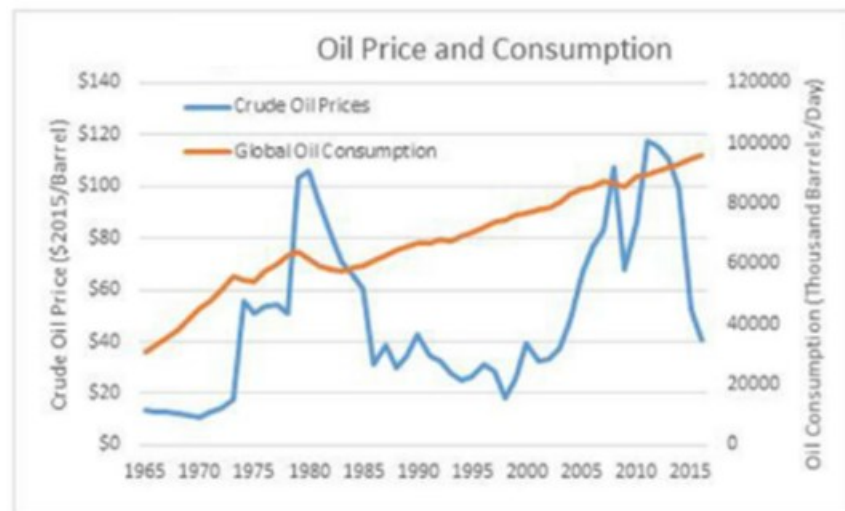


Figura 2 – Relação preço e consumo barril de petróleo. Fonte: *BP Statistical Review of World Energy; EIA [3]*

Dentre as diversas atividades desde a prospecção de um poço até a efetiva produção, a perfuração é a atividade que mais demanda tempo e investimento [4]. Nesse sentido, qualquer avanço tecnológico nessa fase significa grandes possibilidades de redução do tempo de perfuração do poço, que implica em diminuição dos custos inerentes ao processo.

Perfuração é a prática de fazer um poço para um propósito específico, que pode ser para produção de petróleo, injeção de água, coleta de amostras de solo, por exemplo.

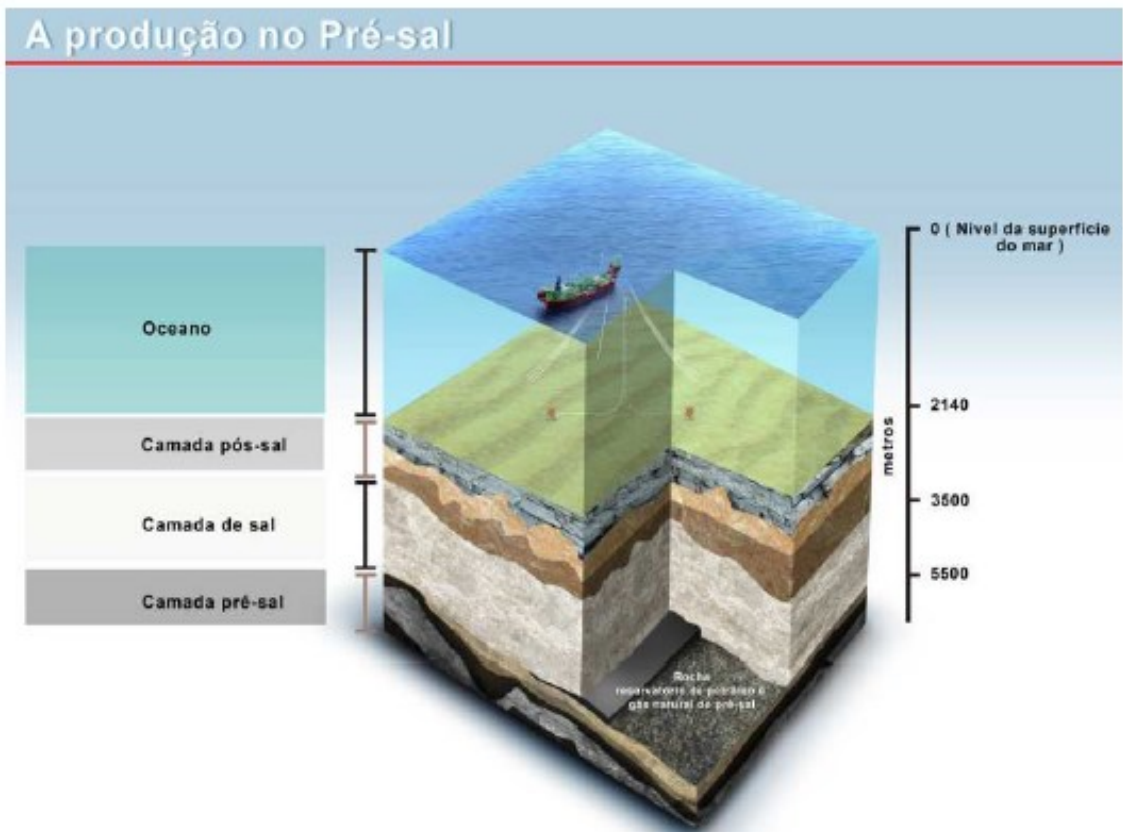


Figura 3 – Esquemática das camadas, perfuração offshore. Fonte: PETROBRAS, 2014

Independentemente da localização do reservatório, *onshore* ou *offshore*, em águas rasas ou ultra profundas, o processo de perfuração sempre necessita de ferramentas e instrumentação específica, tais como:

- Ferramentas para quebrar rochas (brocas);
- Meios para remoção de fragmentos de rocha do poço;
- Meios de estabilização para prevenir que o poço não desmorone;
- Meios para subir e descer tubulações e ferramentas;
- Mecanismos de controle de pressão para que fluidos não escapem descontroladamente;
- Mecanismos para que os responsáveis possam controlar a operação;
- Uma fonte de energia para que as variáveis acima sejam possíveis.

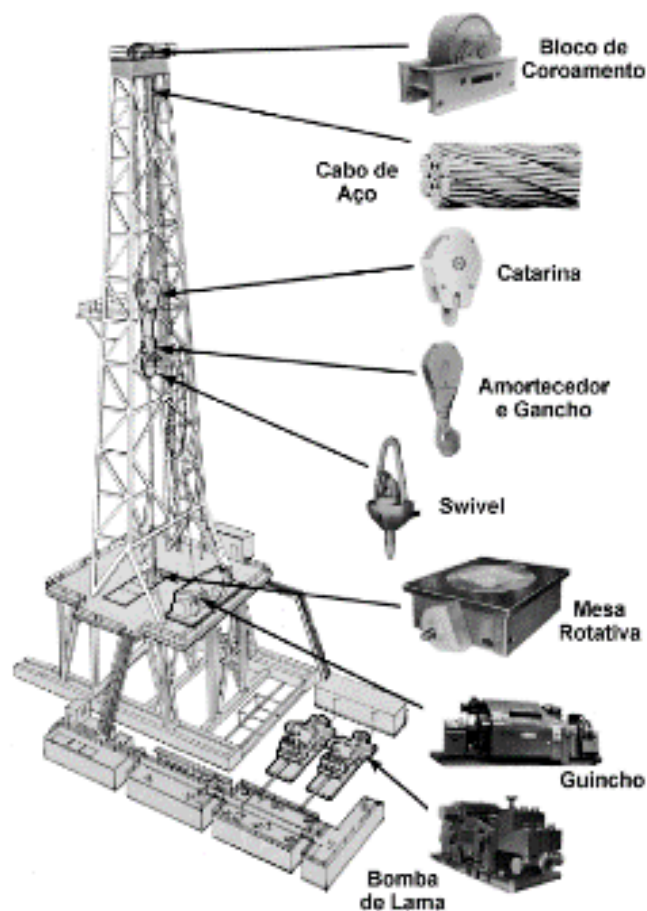


Figura 4 – Equipamentos essenciais para perfuração. Fonte: Paul Bommer, Notas de aula UT Austin, 2016

A tecnologia usualmente utilizada consiste na rotação de uma broca mecânica através de movimento rotativo da coluna de perfuração ou de um motor localizado no interior do poço. Os fragmentos rochosos são removidos pela circulação de um fluido, conhecido como lama de perfuração, que retorna à superfície pelo espaçamento entre a coluna de perfuração e o poço perfurado.

Atualmente há duas principais vertentes na utilização de lasers durante o processo de perfuração.

A primeira estuda a viabilidade de uma broca híbrida onde o laser seria aplicado para enfraquecimento da rocha e a broca mecânica seria utilizada posteriormente para a fragmentação final.

Estudos realizados durante a construção de um poço demonstram que o tempo de perfuração com broca é em média dividido em 50% para perfurar, 25% para as manobras referentes ao posicionamento e 25% para revestir e cimentar. [5]

Com essa tecnologia implementada, espera-se que a taxa de perfuração aumente consideravelmente, além de gerar uma diminuição considerável no número de manobras, pois haverá baixa necessidade de troca de ferramentas, visto que a broca mecânica não será exposta às mesmas tensões observadas atualmente. Além disso, gastos relacionados à troca frequente dos equipamentos seriam consideravelmente reduzidos.

A segunda vertente da tecnologia objetiva utilizar a técnica de laser drilling em substituição ao processo de descida do dispositivo com cargas explosivas para possibilitar fluxo do reservatório para o poço, conhecido como canhoneio.

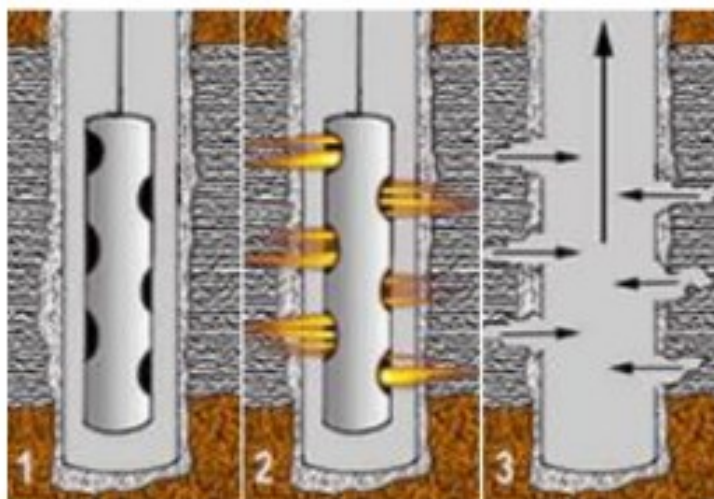


Figura 5 – Etapas do canhoneio [16]

Apesar da larga aplicabilidade do canhoneio na indústria atualmente, tal atividade apresenta dificuldades que poderiam ser reduzidas com a utilização do laser, como a previsibilidade do caminho gerado pela explosão, a movimentação de estrutura explosiva descendente e o impacto da explosão nos arredores do reservatório.

2 Revisão Bibliográfica

O desenvolvimento da teoria da mecânica quântica, nas duas primeiras décadas do século XX, possibilitou o início do surgimento do princípio de funcionamento do laser. De acordo com a teoria, sistemas atômicos e moleculares tem níveis de energia bem definidos e, para mudar de um orbital para outro, um elétron tem que absorver ou emitir energia. Nesse sentido, caso um elétron vá para um orbital de energia maior, ele deve absorver energia. Caso contrário, emitirá energia. [6]

No entanto, a tecnologia apenas começou a se desenvolver no contexto da Segunda Guerra Mundial, onde os envolvidos começaram a conseguir obter meios através dos quais a maior parte dos átomos estivessem no seu estado excitado, ou seja, em órbitas mais energizadas. Como essas órbitas são instáveis por natureza, a tendência é que ocorra a migração para órbitas mais estáveis, e, por consequência haja emissão de energia. [6]

Após o final da guerra, muitas das tecnologias que estavam em desenvolvimento pelos países se tornaram acessíveis para o público geral. Nesse contexto, a utilização de lasers passou a ser pesquisada com maior intensidade e disponibilidade de informações.

Um dos primeiros projetos de grande peso na atividade de *laser drilling* foi desenvolvido pela *Gas Research Institute* (GRI), em 1998, que visava a otimização da perfuração e completação por meio da aplicação de lasers desenvolvidos durante o período da Segunda Guerra Mundial. Os resultados do projeto foram apresentados no ano subsequente, com o título de “*StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas Wells*”. [7]

A partir dos resultados obtidos na execução do projeto da GRI, muitos estudos passaram a ser desenvolvidos a fim de aprofundar o conhecimento sobre o assunto e comprovar a viabilidade dos projetos.

Projetos, antes exclusivamente voltados aos lasers desenvolvidos no contexto da Segunda Guerra Mundial passaram a abordar conceitos primordiais no entendimento da nova tecnologia. O estudo “*Specific Energy for laser removal of rock*”, de Zhiyue Xu, 2001, comprovou que o meio mais eficiente para remoção de rochas é a aplicação do laser com menor valor de energia específica, que mede a quantidade de energia necessária para a remoção de certo volume rochoso. [8]

Neste estudo, um laser Nd:YAG de 1,6 kW foi utilizado para a realização dos testes. Irradiação do feixe, energia por pulso, tempo de exposição e taxa de repetição de pulsos foram os parâmetros considerados essenciais para o dimensionamento do equipamento utilizado. Como resultado, o mecanismo de fragmentação, ou *spallation*, que consiste na fratura da rocha previamente à fusão ou vaporização devido à aplicação do laser, foi considerado o mais eficiente.

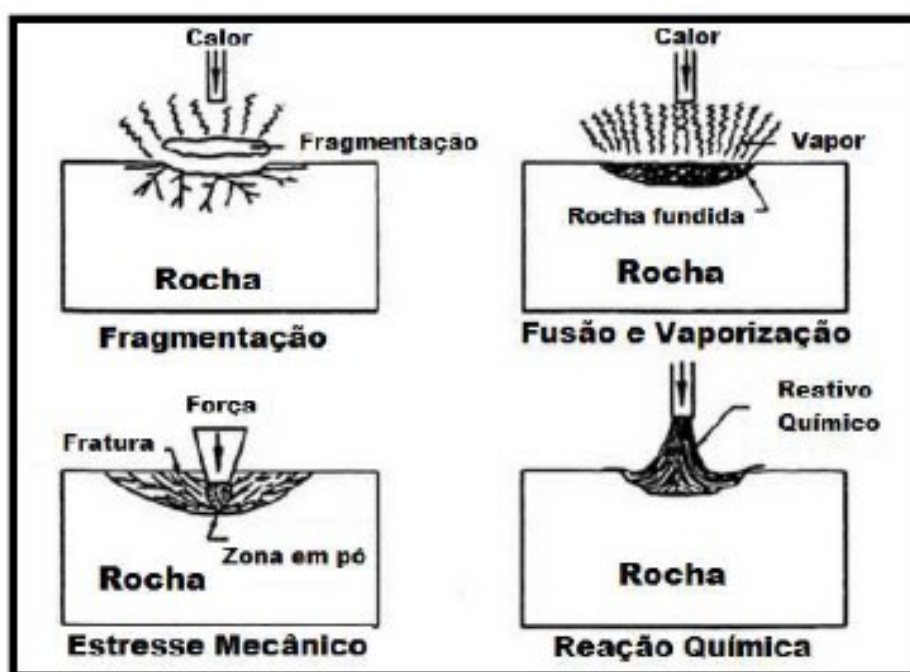


Figura 6 – Modos de remoção de rocha, segundo Maurer (1980) [16]

Nos anos subsequentes, outros estudos também foram desenvolvidos com grande destaque, seja no âmbito da comparação com sistemas rotativos, como “*Comparison of Specific Energy Between Drilling With High Power Lasers and Other Drilling Methods*”, onde é destacada a necessidade de mais simulações para desenvolvimento da atividade [9], ou ao desenvolvimento de alguma atividade específica de completação, como o canhoneio, descrito pelo “*Well Perforation Using High Power Laser*”. [10]

Com o objetivo de dar prosseguimento aos testes previamente realizados, o projeto “*Laser Drilling – Drilling with the Power of Light*” utilizou um laser a fibra de 5,34 kW, cujas vantagens eram justificadas pelo menor custo de operação e manutenção além de capacidade de controle remoto [11].

Nesse sentido, foi identificado, por meio da comparação com os lasers previamente testados nas mesmas condições e parâmetros que o *High Power Fiber Laser* era a tecnologia mais indicada para prosseguimento das investigações. A partir desse estudo os lasers a fibra passaram a ser majoritariamente utilizados na aplicação dos testes. [12]

A fragmentação, como descrito anteriormente, já era considerado o principal mecanismo de remoção de rochas. No entanto, caso não houvesse um meio de extrair os fragmentos rochosos do ponto de aplicação do laser, parte da energia aplicada seria indevidamente utilizada para a fusão e vaporização destes fragmentos. Logo, o estudo "*Laser Spallation of Rocks for Oil Well Drilling*" concluiu que um sistema de limpeza de gás a alta pressão era necessário concomitantemente a emissão da energia proveniente do laser para possibilitar uma superfície livre de impurezas. [13]

Diante dos avanços laboratoriais do mundo acadêmico, novos testes passaram a ser desenvolvidos para aproximar ainda mais do cenário de um ambiente real. Nesse sentido, amostras de rochas usualmente encontradas no ambiente de extração foram utilizadas, pressões foram impostas às rochas e materiais como cimento e aços foram inseridos para experimentação. Estudos como "*An Energy Based Comparison of Alternative Drilling Methods*", "*Feasibility of Using Laser Bit Besides of Common Bits to Drilling Slim Holes*" e "*Utilization of Lasers in Petroleum Drilling Industry*" reafirmaram resultados encontrados previamente, com o laser a fibra como principal equipamento, espalação como principal método de remoção, além de sugerir uma diminuição do diâmetro do furo do poço, visto que o laser diminuiria consideravelmente o peso necessário sob a broca. [14,15,16]

As pesquisas acadêmicas brasileiras também têm ganhado destaque no cenário atual. "Estudo de otimização de energia específica a laser aplicada a perfuração de rochas na indústria do petróleo" conclui que mesmo com a fixação do valor da energia fornecida pelo laser não há garantia que o volume removido e a energia específica se manterão. Isto acontece porque a eficiência cai ao passo que a profundidade perfurada aumenta. Além disso, devido a heterogeneidade das rochas presentes no ambiente, existe a necessidade de mais experimentos para que conclusões fidedignas sejam retiradas da amostragem. [17]

Já "Estudos preliminares sobre a aplicação de lasers de alta potência na perfuração de revestimentos de poços" teve como objetivo caracterizar cortes a laser

em placas de aço com anteparo rochoso a fim de melhor entender os parâmetros ótimos como densidade de potência e posição do ponto focal. [18]

A partir do estudo pôde-se concluir que a densidade de potência deve ser maior que 1 MW/cm^2 ao longo de toda a espessura do material metálico e que estudos com lâmina de água são de primordial importância para o melhor entendimento da tecnologia, visto que podem gerar atenuações de até 50 %. Além disso, análises metalográficas concluíram que a extensão da área adjacente afetada varia proporcionalmente ao aumento da densidade de potência do laser. [19]

Portanto, nota-se que ainda há muitos estudos a serem realizados a fim de possibilitar o melhor entendimento sobre a perfuração a laser. Nesse sentido, a saturação da rocha e a utilização de fluidos entre a amostra aço/laser são caminhos ainda poucos explorados pelo ambiente acadêmico, mas de vital importância para melhor compreensão da viabilidade do processo.

As primeiras aplicações da nova tecnologia estão sendo desenvolvidas pela *FORO Energy*, empresa voltada para aplicação de laser de alta potência para a indústria de óleo e gás.

Fundada em 2009 como uma *startup* no Colorado, recebeu investimentos de grandes empresas do setor como *Chevron* e *Conoco Philips*. Em 2014, assinou um acordo de cooperação com a Petrobras com foco na nova geração de lasers de alta potência para a sistemas de perfuração. Testes foram realizados nos últimos anos em ambientes *onshore* e *offshore*. [19]

Com os avanços de conhecimento do processo, o custo por Watt tem diminuído significativamente, o que viabiliza novos testes e aplicações em campo, como pode ser observado na figura 7.

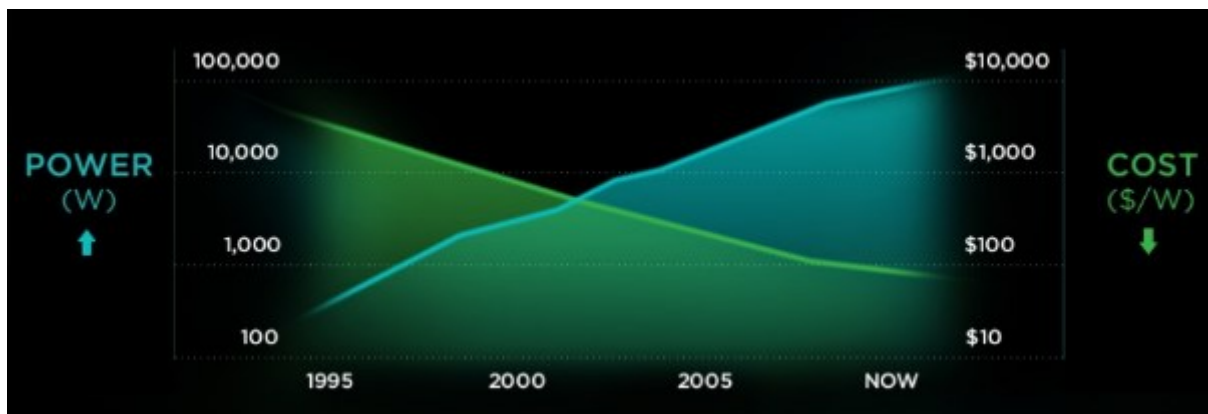


Figura 7 – Evolução de potência e custo ao longo dos últimos anos. Fonte: *FORO Energy website*

Fazem parte do escopo de fornecimento da *FORO Energy* equipamentos de perfuração a laser, que aumenta a taxa de perfuração de 2 a 4 vezes, reduz o peso na broca para menos de 1000 lbs, proporcionando maior duração da broca e redução do torque aplicado. [19]



Figura 8 – Equipamento FORO Energy laser drilling. Fonte: *FORO Energy website*

3 Setup Experimental

Os testes relatados foram conduzidos nas instalações do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica, do departamento de Engenharia Mecânica da PUC – Rio. Os equipamentos descritos abaixo passaram por calibrações e tiveram sua rastreabilidade checada previamente à execução da atividade.

A amostra cúbica de Travertino utilizada foi disponibilizada pelo laboratório e tem como origem uma série de experimentos de uma tese de mestrado realizada anteriormente. Tal peça não havia sido testada previamente. A matéria prima foi fornecida pela empresa LC Mármore e Granitos e posteriormente usinada a fim de se obter a dimensão para o teste.



Figura 9 - Amostra de Travertino utilizada

A dimensão de 100 mm foi escolhida para possibilitar a instalação de sensores em diversas faces para garantir que o monitoramento térmico e mecânico fosse obtido independente da direção na qual a fratura se propagasse, caso ocorresse fratura.

Essa dimensão foi escolhida devido a potência do laser ser elevada, comparativamente aos testes realizados anteriormente. Nesse sentido, existia a necessidade de uma amostra grande o suficiente para que os sensores pudessem ser instrumentados sem perda de dados caso ocorressem fraturas.

Quarenta e dois FBGs foram instrumentados nas faces superior e lateral da amostra rochosa a fim de monitorar a deformação durante a aplicação do laser.

Tal tipo de sensor foi escolhido devido a sua baixa perda relacionada ao comprimento da fibra, imunidade a interferências magnéticas, sensibilidade alta e fácil manuseio.

Na face superior, os sensores FBGs foram inicialmente instrumentados em um raio de 20 mm ao redor da região de aplicação do laser nas direções horizontal e vertical em posições de 0, 90, 180 e 270°. Na posição de 270° foi instalado um sensor adicional posicionado a 45° dos remanescentes, formando uma roseta. O objetivo da instrumentação foi medir as deformações planas ϵ_x , ϵ_y e a cisalhante γ_{xy} . Ademais, sensores foram instalados sequencialmente em dois vértices opostos a fim de monitorar a propagação do efeito da aplicação do laser.

Em uma das faces laterais, quatro sensores em formato de cruz foram instalados também com o propósito de monitorar a propagação do efeito sentido pela rocha.

Doze termopares foram instalados para monitoramento da temperatura em questão, sendo oito deles instrumentados na face superior em diferentes distanciamentos e 4 na face lateral oposta à face na qual foi instrumentada os FBGs.

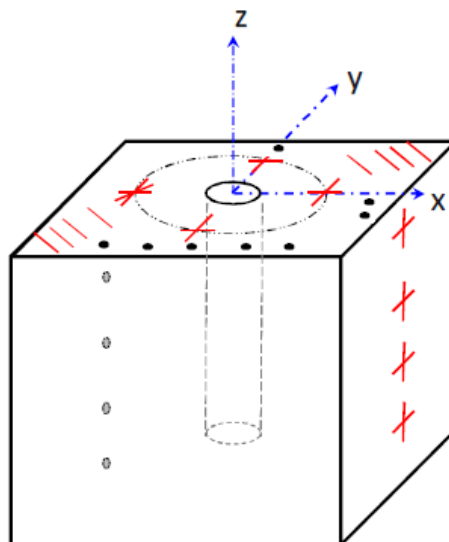


Figura 10 - Esquemático da instrumentação de FBGs e termopares na amostra rochosa

Cabe ressaltar ainda que os sensores FBGs foram conectados ao interrogador ótico *Micron Optics* SM 225, que é um sistema de aquisição de dados que permite a

leitura de vários tipos de sensores, tais como deformação, temperatura e deslocamento. Durante a aquisição dos dados, o interrogador mede o comprimento de onda associado com a luz refletida pelos sensores óticos e converte em unidades de engenharia. Já os termopares foram conectados a um aquisitor de dados *Agilent* 34970A.

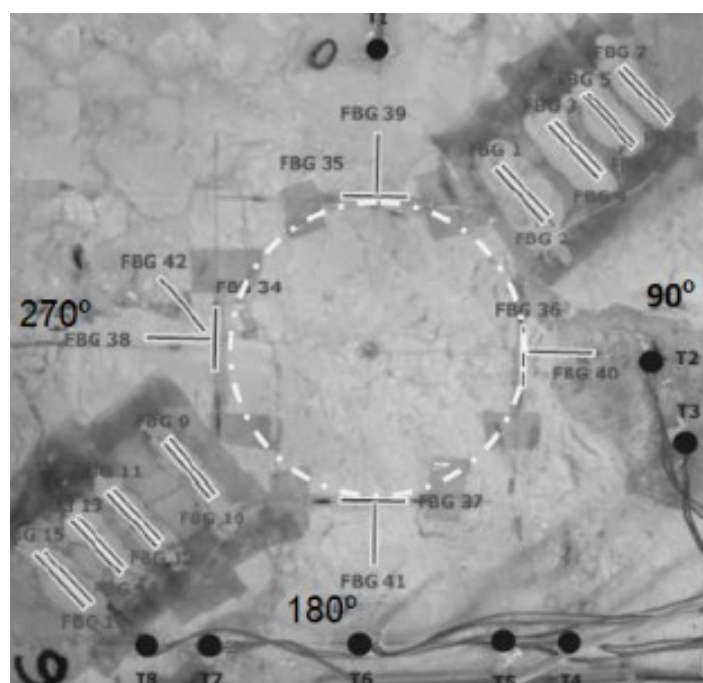


Figura 11 – Foto da face superior instrumentada

O equipamento utilizado durante a execução dos testes é um laser a fibra modelo YLS-1500 TR, da empresa *IPG Photonics*, de 1500 W. Previamente a realização do estudo em questão foi montado uma estrutura tri-axial a fim de sustentar a cabeça do laser, além de ser responsável pelos deslocamentos por meio de servo motores. Acoplado a essa estrutura metálica foi também instalado o mecanismo que libera gás nitrogênio a uma pressão de 6 bar para que ocorresse a limpeza da região de incidência.



Figura 12 - Foto do aparelho de Laser a fibra YLS-1500 do laboratório da PUC-RJ

Os parâmetros para a utilização do laser foram baseados em estudos previamente realizados pelo laboratório, e são apresentados na tabela 1 a seguir. A potência utilizada nos experimentos é a máxima suportada pelo laser em operação, enquanto a densidade de potência é calculada seguindo a lógica apresentada abaixo:

$$Densidade\ de\ potência = \frac{potência}{\pi * \frac{(spot\ size)^2}{4}} \quad (1)$$

Cabe ressaltar ainda que o comprimento de onda é específico do equipamento utilizado e a pressão de N₂ é a suficiente para que fragmentos rochosos provenientes do mecanismo de espalação sejam expelidos para fora do raio de atuação do laser.

A aplicação seguiu uma trajetória espiral partindo do centro da amostra a uma velocidade de 150 mm/min, alcançando um diâmetro de 10 mm em 33 segundos de duração do feixe.

Tabela 1 – Parâmetros Aplicação Laser YLS-1500 TR

Potência [kW]	Densidade de Potência [MW/cm ²]	Comprimento de onda [nm]	Spot size [mm]	Pressão do N ₂ [bar]
1,5	11,5	980	0,129	6

Além disso, o experimento foi gravado por meio de uma câmera termográfica modelo FLIR SC660 a fim de monitorar os gradientes de temperatura antes, durante e depois da aplicação do laser.



Figura 13 - Câmera termográfica FLIR SC660



Figura 14 - Foto obtida durante o teste nas instalações do LSFO

4 Análise Mecânica

Propriedades mecânicas da rocha Travertino deverão ser consideradas para as análises que serão tratadas a seguir. Medidas médias foram consideradas devido à heterogeneidade da rocha em questão. A tabela 2, apresentada a seguir, mostra o range de algumas dessas propriedades.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas da rocha Travertino

Módulo de Elasticidade [GPa]	Poisson	Tensão Máxima [MPa]
22 – 37	0,2 – 0,3	2 – 5

O comprimento de onda de Bragg (λ_B) é definido pelo período da microestrutura (Λ) e pelo índice de refração do núcleo (n_{ef}), que no caso considerado é o vidro.

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (2)$$

Nesse sentido, as variações de comprimento de onda a cada instante podem ser correlacionadas com a deformação e temperatura instantânea segundo a equação abaixo.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 0,78\epsilon + 9 * 10^{-10} \Delta T \quad (3)$$

Onde ϵ é a deformação adimensional, ΔT a diferença de temperatura, medida em Kelvin e λ é o comprimento de onda no instante pré determinado.

A roseta, formada por três sensores FBGs espaçados em 45°, mostra o comportamento das deformações nos eixos x e y, além da deformação cisalhante durante e após a aplicação do laser. A figura 15 ilustra o comportamento das deformações de acordo com o desenrolar da aplicação de 33 segundos do laser.

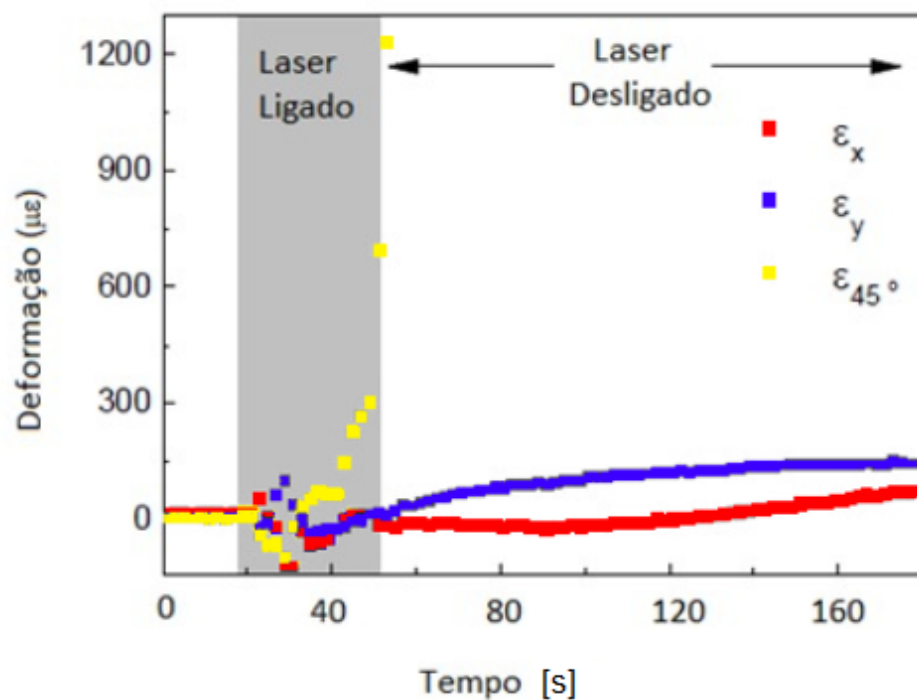


Figura 15 - Gráfico deformação vs tempo roseta 45°

Como pode ser identificado na figura 16, foram observadas tensões trativas e compressivas durante a aplicação do laser. Nota-se uma deformação compressiva em todos os sensores nos primeiros segundos, seguida de deformação trativa durante e após a finalização do teste.

Tal mudança repentina coincide com o início de uma fratura, observada a olho nu em 23 segundos de aplicação do laser, na região leste da face superior, como mostrado na figura 15. Logo após o desligamento do laser o sensor 45° da roseta quebra devido a uma nova trinca que surge na região oeste.

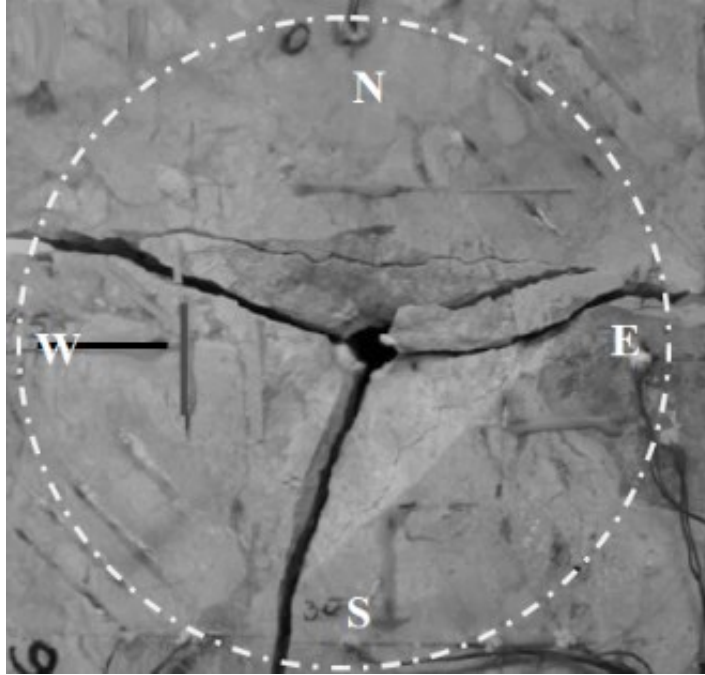


Figura 16- Foto da face superior da amostra após término do teste

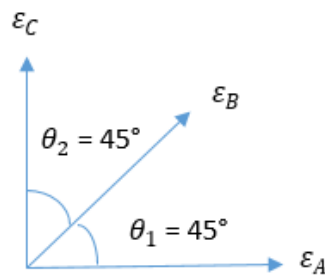
Considerando-se um estado plano de tensões e assumindo um comportamento linear elástico, as equações abaixo são válidas para o estudo em questão.

$$\varepsilon_A = \varepsilon_{xx} \quad (4)$$

$$\varepsilon_B = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} + \frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2} \cos 2\theta_1 + \varepsilon_{xy} \sin(2\theta_1) \quad (5)$$

$$\varepsilon_C = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} + \frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2} \cos 2\theta_2 + \varepsilon_{xy} \sin(2\theta_2) \quad (6)$$

Onde ε_A , ε_B e ε_C são medidos pela roseta seguindo a lógica abaixo.



$$\sigma_{xx} = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_{xx} + \mu \epsilon_{yy}) \quad (7)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_{yy} + \mu \epsilon_{xx}) \quad (8)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{1-\mu^2} \epsilon_{xy} \quad (9)$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (10)$$

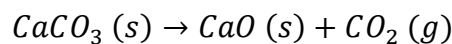
$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_1 + \mu \epsilon_2) \quad (11)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_2 + \mu \epsilon_1) \quad (12)$$

Nesse sentido, foram obtidas as máximas tensões principais iguais a $\sigma_1 = 24,6 \text{ MPa}$ e $\sigma_3 = -24,5 \text{ MPa}$, que corresponde a um estado de cisalhamento puro.

As fraturas identificadas na face superior da rocha demonstram que a propagação ocorreu inicialmente na direção radial. Posteriormente, pode-se destacar uma mudança na direção devido a presença da tensão cisalhante e a tensão ter excedido a máxima tensão suportada pelo material.

Vale destacar ainda o comportamento da rocha em sua profundidade. Observa-se influência direta do laser em uma profundidade de 20 mm, como ilustrado na figura 17, enquanto a propagação de trincas ocorreu até em torno de 80 mm. Cabe ressaltar a presença de uma espécie de pó branco proveniente da decomposição do Carbonato de Cálcio (CaCO_3) em Óxido de Cálcio (CaO), como descrito na reação abaixo.



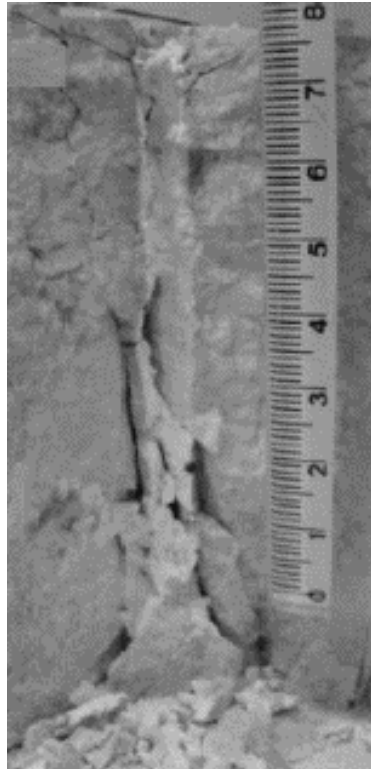


Figura 17 - Foto mostrando a propagação na profundidade da amostra

5 Análise Térmica

Sensores de temperatura instalados na face superior da amostra foram utilizados para construção do gráfico de Temperatura versus Tempo, apresentado na figura 18.

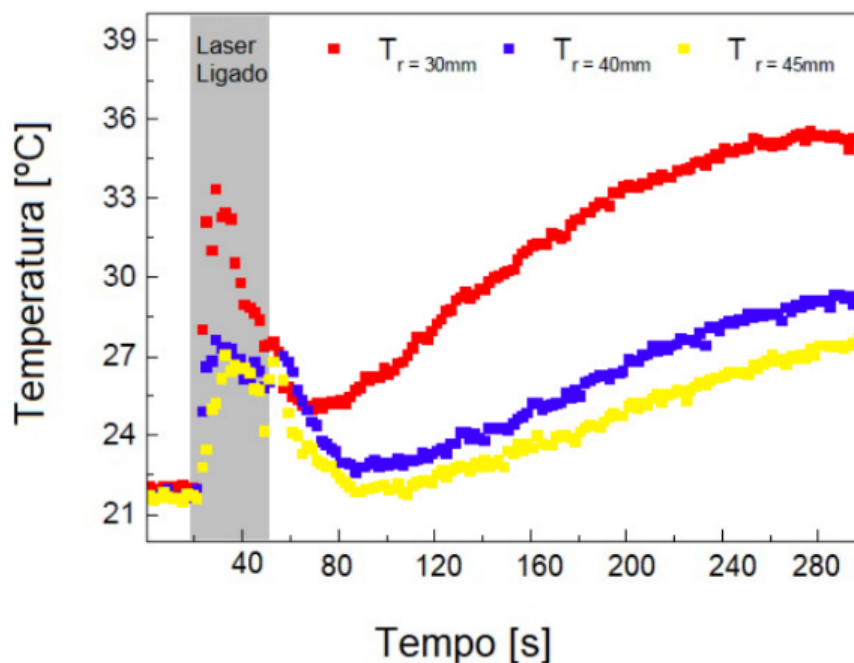


Figura 18 – Temperatura vs Tempo para diferentes distâncias do centro

As três curvas representadas no gráfico retratam sensores posicionados a 30 , 40 e 45 mm do ponto central da aplicação do laser.

Pode ser observado um rápido aumento da temperatura nos primeiros segundos de aplicação do laser seguido de uma significativa redução. Sabe-se que a condutividade da rocha em questão é 2 W/mK, valor considerado baixo. Nesse sentido, conclui-se que a variação de temperatura percebida durante o teste se deve primariamente a radiação proveniente do laser frente a condução e, ao passo que a perfuração ganha em profundidade, essa temperatura decresce. [18]

No entanto, após pequeno intervalo de tempo após o desligamento do laser, a temperatura local sentida pelos sensores volta a crescer devido ao calor proveniente da condução da área irradiada. Nota-se que a taxa de crescimento dessa temperatura é menor que a observada anteriormente, reafirmando que o processo de transmissão de calor nesse momento é primariamente por condução.

Cabe ressaltar ainda que a temperatura do laser quando aplicado uma densidade de potência de $11,5 \text{ MW/cm}^2$ gira em torno de 38.000 K. Existe claramente uma diferença de temperatura entre o laser e o que foi identificado pelos sensores. Tal diferença produz tensões que excedem a tensão máxima da rocha, proporcionando o aparecimento de trincas e fraturas.

Os sensores instrumentados na face lateral da rocha também apresentaram comportamento similar, reafirmando que o processo de condução ocorre tanto radialmente quanto em sua profundidade.

6 Conclusão

Este projeto visa contribuir com informações relevantes para a discussão desta tecnologia inovadora que pode mudar a concepção dos processos de perfuração convencionais utilizados atualmente.

Os resultados mostraram uma correlação entre deformação cisalhante, altos gradientes de temperatura e áreas afetadas pelo uso do laser, que podem ser divididas em áreas fraturadas, fundidas e evaporadas.

Além disso, as análises térmicas e mecânica mostraram que o processo perfuração a laser vai muito além da própria incidência, visto que as consequências ainda são sentidas após o desligamento do equipamento.

No entanto, devido a heterogeneidade da rocha Travertino, faz-se necessário a continuidade do estudo para que haja uma quantidade de amostras grande o suficiente para possibilitar obter um comportamento médio dos resultados.

As pesquisas de desenvolvimento da tecnologia colocam a perfuração a laser em um patamar de 4 numa escala de 7 até o pleno conhecimento da ferramenta. Faz-se necessário abordar tópicos que consigam expandir ainda mais os conhecimentos na área.

Nesse sentido, acredita-se que pesquisas futuras devam tratar os seguintes tópicos:

- Testes em amostras de rochas saturadas com água.

- Testes em amostras de rochas saturadas com água e imersas em solução de água e lama.
- Testes com lasers de maior potência simulando ambiente de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] US Energy Information Administration EIA. Disponível em < <https://www.eia.gov/>> Acesso em: 13 de março de 2018.
- [2] THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2001.
- [3] FORBES. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/uhenergy/2017/01/05/the-future-of-oil-and-gas-look-to-the-past/#5de746d57457>> Acesso em: 13 de março de 2018.
- [4] CONAWAY, C. F. **The Petroleum Industry: A nontechnical Guide**. Tulsa, Oklahoma, USA: PenWell, 1999.
- [5] CHRYSSOLOURIS, G. et al., **Journal of Manufacturing Science & Engineering**, 1997. Vol. 119, No. 4(B), Pages 766-69.
- [6] NETO, C. P. S., Júnior, O.F., **Um Presente de Apolo: lasers, história e aplicações**, 2016
- [7] R.M. Graves, D.G. O'Brien, **StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas Wells**. SPE-49259-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 27-30 September, New Orleans, Louisiana, 1998
- [8] 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.
- [9] GRAVES, R. M. et al., **Comparison of Specific Energy Between Drilling With High Power Lasers and Other Drilling Methods**. SPE 77627. SPE Annual 79 Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 29 September-2 October, 2002.
- [10] BATARSEH, S. et al., **Well Perforation Using High-Power Lasers**. SPE 84418. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 5-8 October, 2003.
- [11] SALEHI, B. C. et al., **Laser Drilling – Drilling with the Power of Light**. Gas Technology Institute. Des Plaines, Illinois, may, 2007.
- [12] 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.

- [13] XU, Z. et al. **Laser Spallation of Rocks for Oil Well Drilling**. 23th International Congress on Application of Lasers & Electro-Optics. Chicago, Illinois, 2004.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] BAZARGAN, M. et al., **Utilization of Lasers in Petroleum Drilling Industry**. International Petroleum Technology Conference, Beijing, China, 26-28 march, 2013.
- [17] GAMA, L., Braga, A. M. B., **Estudo de otimização de energia específica a laser aplicada a perfuração de rochas na indústria do petróleo**, PUC-RIO, Rio de Janeiro, Brasil, 2014. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [18] Silva, H. G.; Braga, A. M. B., **Estudos preliminares sobre a aplicação de lasers de alta potência na perfuração de revestimentos de poços**, Rio de Janeiro, 2014. 69p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [19] FORO ENERGY INC. Disponível em: <<http://www.foroenergy.com>>. Acesso em: 31 março de 2018.
- [20] Yasar E., Erdogan Y., Guneyli H., **Determination of thermal conductivity from physico-mechanical properties**, Bull Eng Geol Environ 67:219–225, 2008