



Gabriel Novaes Herdy

Simulação a Laser como uma alternativa a corte de chapas na área de Produção de Petróleo e Gás

Projeto de Graduação

Projeto apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da PUC–Rio como requisito parcial para finalização do curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Arthur Martins Barbosa Braga

Coorientador: Dario Prada Parra

Rio de Janeiro
Junho 2025

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Marcelo e Andrea, por todo o amor, apoio e incentivo incondicional durante a minha formação. A dedicação e o exemplo de vocês foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Arthur Martins Barbosa Braga, e coorientador o Dr. Dario Prada Parra, expresso minha profunda gratidão pela orientação, confiança e comprometimento ao longo deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço também aos professores da graduação, colegas de curso e profissionais com os quais tive a oportunidade de aprender e compartilhar experiências ao longo da jornada.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha trajetória acadêmica.

Resumo

Simulação a Laser como uma alternativa a corte de chapas na área de Produção de Petróleo e Gás

Este trabalho investiga o uso de feixes de laser de alta potência como alternativa aos métodos convencionais de corte de chapas metálicas na indústria de petróleo e gás. Foram realizadas simulações numéricas no COMSOL Multiphysics, considerando dois ambientes distintos (ar e água) e duas configurações operacionais: feixe estacionário e feixe em movimento linear. As análises contemplaram diferentes espessuras de material e diâmetros de spot, respeitando as limitações do sistema óptico disponível. Os resultados indicam que, nas condições estacionárias, especialmente no ar, é possível atingir temperaturas suficientes para viabilizar a perfuração térmica. Em contrapartida, no cenário com laser em movimento, o tempo de exposição e o resfriamento convectivo — sobretudo na água — limitaram a eficiência do processo. Conclui-se que a tecnologia laser apresenta potencial promissor para aplicações industriais, sendo especialmente eficaz quando combinada com estratégias que otimizem a concentração de energia e o tempo de atuação.

Palavras-chave

Corte térmico. Laser de alta potência. Simulação numérica. Petróleo e gás. COMSOL.

Abstract

Laser Simulation as an Alternative to Sheet Metal Cutting in Oil and Gas Production

This study investigates the use of high-power laser beams as an alternative to conventional metal sheet cutting methods in the oil and gas industry. Numerical simulations were performed in COMSOL Multiphysics, considering two different environments (air and water) and two operating modes: stationary and linearly moving laser beams. The analyses included various material thicknesses and spot diameters, aligned with the optical limitations of the system used. The results show that, under stationary conditions — particularly in air — the temperatures reached are sufficient to enable thermal perforation. On the other hand, in moving beam scenarios, exposure time and convective cooling — especially in water — significantly reduced process efficiency. It is concluded that laser technology shows promising potential for industrial applications, particularly when combined with strategies that enhance energy concentration and exposure duration.

Keywords

Thermal cutting. High-Power Laser. Numerical Simulation. Oil and Gas. COMSOL.

Sumário

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introdução | 10 |
| 2. | Motivação do trabalho | 10 |
| 3. | Objetivos do trabalho | 11 |
| 4. | Métodos atuais do corte de chapas | 12 |
| 5. | Revisão da Literatura | 13 |
| 5.1. | Princípios Físicos dos Lasers | 13 |
| 5.1.1. | Laser de CO ₂ | 14 |
| 5.1.2. | Laser Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet) | 15 |
| 5.1.3. | Laser de Fibra | 15 |
| 5.1.4. | Laser de Diodo (Semicondutor) | 16 |
| 5.2. | Transferência de Calor em Processos de Corte Térmico | 16 |
| 5.3. | Interação do Laser com Materiais | 17 |
| 5.3.1. | Absortividade Espectral e Acoplamento Térmico | 17 |
| 5.3.2. | Emissividade Térmica | 19 |
| 5.3.3. | Deformação Térmica vs Deformação Mecânica: Implicações no Corte com Laser | 19 |
| 5.3.4. | Regimes de Interação Térmica com o Laser: Influência da Densidade de Potência | 20 |
| 5.3.5. | Fatores Críticos na Interação Térmica com o Laser: Parâmetros Térmicos e Ópticos | 21 |
| 5.3.6. | Faixas Operacionais de Processamento a Laser: Tempo de Exposição vs Densidade de Potência | 22 |
| 5.3.7. | Profundidade de Penetração Térmica: Influência da Potência e do Tempo de Exposição | 24 |
| 6. | Metodologia para o desenvolvimento do trabalho | 25 |
| 6.1. | Tipo de Laser utilizado | 26 |
| 6.2. | Coeficiente de troca de calor | 27 |
| 6.2.1. | Convecção natural no ar: | 27 |
| 6.2.2. | Convecção natural na água: | 28 |
| 6.3. | Escolha da emissividade | 28 |
| 6.4. | Diâmetro do spot size | 29 |
| 6.5. | Pontos de medição do disco | 29 |
| 6.6. | Geração da malha | 31 |
| 7. | Resultados | 34 |
| 7.1. | Laser apontado para o centro do disco no ar com máxima potência (1800W) | 35 |

| | | |
|--------|--|----|
| 7.1.1. | Disco com $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura: | 35 |
| 7.1.2. | Disco com meia polegada de espessura: | 36 |
| 7.1.3. | Disco com uma polegada de espessura: | 37 |
| 7.2. | Laser apontado para o centro do disco na água com potência máxima(1800W) | 39 |
| 7.2.1. | Disco com $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura: | 40 |
| 7.2.2. | Disco com meia polegada de espessura: | 41 |
| 7.2.3. | Disco com uma polegada de espessura: | 42 |
| 7.3. | Laser variando linearmente ao longo do disco no ar e máxima potência(1800W) | 44 |
| 7.3.1. | Disco com $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura: | 45 |
| 7.3.2. | Disco com meia polegada de espessura: | 46 |
| 7.3.3. | Disco com uma polegada de espessura: | 47 |
| 7.4. | Laser variando linearmente ao longo do disco na água a máxima potência (1800W) | 49 |
| 7.4.1. | Disco com $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura: | 50 |
| 7.4.2. | Disco com meia polegada de espessura: | 51 |
| 7.4.3. | Disco com uma polegada de espessura: | 52 |
| 8. | Conclusão | 54 |
| | Referências bibliográficas | 55 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 5.1-1- Esquemático simplificado de um laser. | 14 |
| Figura 5.3.1-1- Variação da absorvidade com o comprimento de onda para metais e materiais orgânicos. [6] | 18 |
| Figura 5.3.3-1 - Deformação mecânica vs deformação térmica para materiais de engenharia. [6] | 20 |
| Figura 5.3.4-1 - Representação dos regimes de interação térmica a partir da densidade de potência. | 21 |
| Figura 5.3.5-1 - Parâmetros físicos que influenciam a interação térmica com laser. [6] | 22 |
| Figura 5.3.6-1 - Faixas de densidade de potência e tempo de exposição típicas para diferentes processos a laser. [6] | 23 |
| Figura 5.3.7-1 - Profundidade de penetração térmica em função da potência e do tempo de exposição. [6] | 24 |
| Figura 6.1-1 - Esquema de como é o funcionamento do laser de diodo utilizado com a mangueira de fibra óptica. [5] | 26 |
| Figura 6.5-1 - Pontos de Medições na Parte Inferior do Disco e Superior do Disco. | 30 |
| Figura 6.5-2 - Linha de Medição ao longo da espessura no centro do disco. | 30 |
| Figura 6.5-3 - Linhas de Medições na Parte Superior e Inferior do Disco. | 31 |
| Figura 6.6-1 - Seis Tipos de Malhas usadas para Estudo: (A) Malha com 2520 elementos; (B) Malha com 7376 elementos; (C) Malha com 21672 elementos; (D) Malha com 59008 elementos; (E) Malha com 134712 elementos; e (F) Malha com 508464 elementos. | 32 |
| Figura 6.6-2 - Malha 59008. | 33 |
| Figura 6.6-3- Comparativo dos Resultados das Malhas | 33 |
| Figura 7.1-1 - Temperatura ao Longo de Um Ponto Posicionado na Parte Superior do Disco no Ar. | 35 |
| Figura 7.1.1-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, Disco de 6,35 mm de Espessura. | 36 |
| Figura 7.1.1-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 6,35 mm de Espessura. | 36 |
| Figura 7.1.2-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, disco de 12,7 mm de espessura. | 37 |
| Figura 7.1.2-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 12,7 mm de Espessura. | 37 |
| Figura 7.1.3-1 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 25,4 mm de espessura. | 38 |
| Figura 7.1.3-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 25,4 mm de espessura. | 38 |
| Figura 7.2-1 - Temperatura ao Longo de Um Ponto Posicionado na Parte Superior do Disco na água. | 40 |
| Figura 7.2.1-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, Disco de 6,35 mm de Espessura. | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 7.2.1-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 6,35 mm de espessura. | 41 |
| Figura 7.2.2-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, Disco de 12,7 mm de Espessura. | 41 |
| Figura 7.2.2-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 12,7 mm de espessura. | 42 |
| Figura 7.2.3-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, Disco de 25,4 mm de Espessura. | 42 |
| Figura 7.2.3-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 25,4 mm de espessura. | 42 |
| Figura 7.3-1 - Variação do Laser ao Longo do Disco. | 44 |
| Figura 7.3-2 - Temperatura no Centro do Disco com Diferentes Spot Sizes e espessuras, com o Laser em Movimento no Ar. | 45 |
| Figura 7.3.1-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 6,35 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar. | 45 |
| Figura 7.3.1-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 6,35 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar. | 46 |
| Figura 7.3.2-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 12,7 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar. | 46 |
| Figura 7.3.2-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 12,7 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar. | 47 |
| Figura 7.3.3-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 25,4 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar. | 48 |
| Figura 7.3.3-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 25,4 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar. | 48 |
| Figura 7.4-1 - Temperatura no Centro do Disco com Diferentes Spot Sizes e espessuras, com o Laser em Movimento no Ar. | 50 |
| Figura 7.4.1-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 6,35 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água. | 50 |
| Figura 7.4.1-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 6,35 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água. | 51 |
| Figura 7.4.2-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 12,7 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água. | 51 |
| Figura 7.4.2-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 12,7 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água. | 52 |
| Figura 7.4.3-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 25,4 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água. | 53 |
| Figura 7.4.3-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 25,4 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água. | 53 |

Lista de Tabelas

Tabela 6.6.1

31

1. Introdução

O desenvolvimento da tecnologia laser representa um dos marcos mais significativos na história do processamento de materiais. Sua base teórica foi estabelecida por Albert Einstein, em 1917, ao formular o conceito de emissão estimulada de radiação — princípio essencial para a amplificação coerente da luz. No entanto, o primeiro laser funcional só foi desenvolvido em 1960 por Theodore Maiman, utilizando um cristal de rubi como meio ativo [11]. Desde então, os lasers passaram a ser empregados em diversas áreas da ciência, incluindo corte, soldagem, gravação e tratamentos térmicos.

O uso do laser como ferramenta de corte teve início em 1965, com a *Western Electric Engineering Research Center*, que utilizou feixes de laser para perfurar matrizes de diamante. Em 1967, pesquisadores britânicos introduziram o corte assistido por oxigênio, permitindo sua aplicação em metais de maior espessura [12]. Na década seguinte, o advento dos lasers de dióxido de carbono (CO₂) consolidou sua adoção industrial como alternativa de alta precisão e produtividade em comparação aos métodos convencionais. Mais recentemente, os lasers de fibra óptica destacaram-se por sua eficiência energética, estabilidade de feixe e capacidade de operação contínua em altas potências [6].

Com o avanço tecnológico, o corte a laser tornou-se amplamente utilizado em setores como o automotivo, aeroespacial, eletrônico e médico, graças à sua precisão, controle térmico e elevada repetibilidade. Essa tecnologia tem sido adaptada, também, a ambientes extremos, como o setor de petróleo e gás, onde se investiga sua aplicação em estruturas metálicas robustas. Em cenários que exigem alta confiabilidade operacional e mínima interferência mecânica, os sistemas a laser emergem como alternativa promissora para operações críticas.

2. Motivação do trabalho

A crescente demanda por soluções tecnológicas que promovam eficiência e segurança em operações industriais offshore tem impulsionado o desenvolvimento de ferramentas inovadoras. Entre essas, os lasers de alta potência vêm se destacando

como alternativa viável para intervenções em materiais metálicos em ambientes complexos.

Tradicionalmente, o corte de chapas metálicas na indústria de petróleo e gás é realizado por processos mecânicos ou térmicos convencionais, que apresentam desvantagens como desgaste de ferramentas, perda de precisão e risco de deformações térmicas. O emprego da tecnologia laser pode superar essas limitações ao oferecer cortes com menor aporte térmico, maior precisão geométrica e mínima contaminação do ambiente de trabalho.

Este trabalho propõe investigar, por meio de simulações computacionais no software *COMSOL Multiphysics*, a aplicação de um feixe laser como ferramenta de corte de chapas metálicas utilizadas no setor de petróleo e gás. A metodologia adotada será dividida em duas etapas principais: na primeira, será analisada a interação térmica do feixe fixo sobre o centro da chapa; na segunda, será simulado o movimento linear do feixe sobre a superfície metálica, representando condições operacionais mais próximas da prática industrial. A metodologia considera dois meios distintos de atuação: o ar, que representa um ambiente típico de operação industrial, e a água, que simula condições de corte submerso, permitindo a comparação dos efeitos térmicos em diferentes contextos de dissipação de calor.

3. Objetivos do trabalho

Avaliar, por meio de simulações computacionais realizadas no software *COMSOL Multiphysics*, a viabilidade do uso de um feixe laser como ferramenta alternativa para o corte de chapas metálicas na indústria de petróleo e gás. O estudo visa analisar o desempenho térmico em diferentes cenários operacionais, considerando tanto a aplicação estática quanto o movimento do feixe sobre a superfície metálica.

Essa abordagem se fundamenta na sólida experiência do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica (LSFO) da PUC-Rio — uma unidade do Departamento de Engenharia Mecânica criada em 1997 — com atuação reconhecida no desenvolvimento de sensores óticos, sistemas a laser e suas aplicações industriais. O LSFO disponibiliza infraestrutura avançada (sensores FBG, lasers de alta potência, equipamentos optoeletrônicos) e conta com histórico em projetos voltados

ao setor de petróleo e gás, envolvendo monitoramento em *risers*, aplicações a laser e instrumentação de precisão. Dessa forma, a parceria com o LSFO garante suporte técnico especializado e alinhamento com práticas de vanguarda em processamento térmico aplicado a materiais metálicos via feixe laser.

4. Métodos atuais do corte de chapas

Na indústria de petróleo e gás, diversos métodos são empregados para o corte de chapas metálicas, cada um com características específicas em termos de precisão, espessura máxima, custo e aplicabilidade.

O oxicorte, um dos processos mais tradicionais, utiliza uma chama combustível e um jato de oxigênio para oxidar e remover o material metálico. É amplamente empregado no corte de aços carbono de grande espessura, devido ao seu baixo custo operacional. No entanto, esse método apresenta limitações, como a impossibilidade de cortar metais não ferrosos e a geração de uma extensa zona termicamente afetada (ZTA), que pode comprometer a integridade do material [19], [13].

O corte a plasma, por sua vez, baseia-se na geração de um arco elétrico que ioniza o gás e produz um jato de plasma capaz de fundir e remover o metal. Essa técnica apresenta maior velocidade de corte e menor ZTA em comparação ao oxicorte, sendo adequada para metais como aço inoxidável e alumínio, com aplicações em espessuras de até 150 mm. O corte a plasma também pode ser realizado sob água, utilizando equipamentos específicos [14], [17].

Já o corte a laser destaca-se por sua elevada precisão e controle térmico, permitindo cortes complexos com excelente acabamento. Os lasers de fibra óptica, em especial, são capazes de cortar chapas de até 20 mm de espessura, oferecendo menor zona afetada termicamente e melhor qualidade de borda, ainda que com custos operacionais mais elevados [16], [18].

O corte por jato de água é uma técnica utilizada em aplicações que exigem ausência total de calor no processo. Ele emprega jatos de água de alta pressão, com ou sem abrasivos, para remover o material. Embora proporcione cortes com excelente qualidade superficial e sem distorção térmica, apresenta como desvantagens sua menor velocidade de corte e maior consumo energético [15].

Em ambientes submersos, como estruturas offshore, a aplicação direta desses métodos é limitada por dificuldades técnicas como a dispersão de energia no meio aquático. A propagação do plasma, da chama ou até mesmo do feixe laser sofre interferência nesse meio, comprometendo a eficácia dos processos. Soluções como câmaras hiperbáricas ou robôs submersos podem ser empregadas, mas envolvem alta complexidade e custos elevados [17].

Diante dessas limitações, torna-se necessário explorar alternativas mais eficazes. A utilização de lasers de alta potência em ambientes controlados ou simulados representa uma abordagem promissora para avaliar o desempenho térmico e geométrico do corte de chapas metálicas, especialmente no contexto offshore.

5. Revisão da Literatura

5.1. Princípios Físicos dos Lasers

O termo LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) designa um dispositivo que gera radiação eletromagnética coerente, monocromática e colimada. Essa tecnologia baseia-se na emissão estimulada, proposta por Einstein em 1917, que transformou a compreensão da interação entre matéria e radiação.

No processo, uma fonte de bombeamento excita os átomos do meio ativo, promovendo seus elétrons a níveis de energia superiores. Com a inversão de população, esses elétrons retornam ao estado fundamental, emitindo fótons idênticos em energia, fase e direção. Esse processo se intensifica na cavidade óptica, amplificando o feixe. O laser é composto por três elementos principais: meio ativo (sólido, líquido ou gasoso), fonte de excitação e cavidade óptica, onde ocorre a amplificação da radiação.

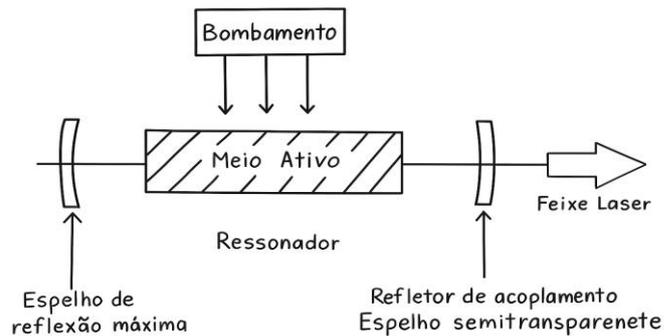


Figura 5.1-1- Esquemático simplificado de um laser.

A inversão de população, condição em que há mais átomos em estado excitado do que no estado fundamental, permite que o sistema emita luz coerente, com fótons na mesma fase, direção e frequência. A cavidade óptica, formada por dois espelhos (um totalmente refletivo e outro parcialmente transmissivo), promove a retroalimentação dos fótons emitidos, intensificando o processo de emissão estimulada. O feixe resultante é colimado (paralelo), coerente e monocromático — características que o distinguem das fontes de luz convencionais.

Entre as tecnologias a laser mais consolidadas e frequentemente utilizadas na indústria, encontram-se:

5.1.1. Laser de CO₂

Este é um dos tipos mais tradicionais e amplamente utilizados em aplicações industriais. Seu meio ativo é uma mistura gasosa de dióxido de carbono, nitrogênio e hélio, operando em 10,6 μm (infravermelho distante). Esse comprimento de onda é altamente absorvido por materiais não metálicos, como plásticos e cerâmicas, mas também pode cortar chapas metálicas finas com auxílio de gases reativos ou inertes. Suas principais vantagens incluem alta potência contínua e capacidade de corte profundo. No entanto, não pode ser guiado por fibras ópticas convencionais e exige sistemas ópticos com espelhos — o que limita seu uso em ambientes confinados e reduz sua eficiência energética.

5.1.2. Laser Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet)

É um laser de estado sólido cujo meio ativo é um cristal dopado com neodímio. Opera em 1,064 μm , sendo eficaz na absorção por metais altamente reflexivos, como alumínio e cobre. Pode operar em modo contínuo ou pulsado, sendo usado em soldagem, corte de precisão e aplicações médicas. Entre suas vantagens estão a condução por fibras ópticas, menor ZTA e bom controle de penetração. Por outro lado, sua potência contínua é inferior à do CO_2 , requer resfriamento ativo e possui menor eficiência elétrica-luminosa.

5.1.3. Laser de Fibra

Atualmente, os lasers de fibra representam o que há de mais avançado em tecnologia de processamento a laser para aplicações industriais. Seu meio ativo consiste em uma fibra óptica dopada com íons terras-raras, como érbio, itérbio ou neodímio, que é bombeada por diodos semicondutores. O feixe é gerado e amplificado dentro da própria fibra, sendo conduzido diretamente ao ponto de trabalho com altíssima eficiência, frequentemente superior a 30%.

A radiação emitida costuma estar na faixa de 1,06 μm , semelhante à dos lasers Nd:YAG. Entre seus principais atributos estão a excelente qualidade de feixe (fator M^2 próximo a 1), elevada estabilidade térmica, baixa manutenção e facilidade de integração com sistemas automatizados, como robôs e veículos remotamente operados (ROVs). Essas características o tornam ideal para ambientes hostis, como os encontrados na indústria submarina, permitindo aplicações como corte de chapas, soldagem em profundidade, microfabricação e dissociação de hidratos em dutos.

Sua compactidade e robustez viabilizam a instalação em espaços restritos e operação remota em tempo real. As limitações mais relevantes incluem o custo inicial elevado e a sensibilidade da fibra sob aplicações de altíssima potência, exigindo sistemas de resfriamento e controle térmico bem dimensionados.

5.1.4. Laser de Diodo (Semicondutor)

O laser de diodo é uma fonte compacta baseada em junções semicondutoras, que opera tipicamente na faixa do infravermelho próximo (780 a 980 nm). Apesar de sua potência ser inferior à dos lasers industriais de alto desempenho, é amplamente utilizado como fonte de bombeamento em lasers de estado sólido e de fibra. Em aplicações diretas, é empregado em leitura óptica, sensores, tratamentos médicos e marcações de baixo impacto.

Com o avanço da tecnologia, lasers de diodo de alta potência passaram a ser utilizados em soldagem de plásticos, secagem seletiva e, em menor escala, em cortes leves. No entanto, ainda não substituem os lasers de CO₂, Nd:YAG ou fibra em processos industriais intensivos de corte e soldagem de metais.

5.2. Transferência de Calor em Processos de Corte Térmico

A compreensão dos mecanismos de transferência de calor é essencial para o estudo de processos de corte térmico, em especial aqueles que envolvem fontes localizadas de energia, como o feixe de laser. Dentre os modos de transferência, destacam-se a condução e a radiação térmica, ambos fundamentais para a análise do comportamento térmico do material durante o corte de chapas metálicas.

A condução térmica é o principal mecanismo de propagação do calor no interior do material durante o corte a laser. Trata-se da transferência de energia térmica de regiões com temperatura mais elevada para regiões com temperatura mais baixa, sem movimentação macroscópica de matéria. Esse fenômeno é regido pela Lei de Fourier, cuja formulação vetorial estabelece que o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura [2]:

$$q = -K * \nabla T \quad (5.2.1)$$

Onde q representa a densidade de fluxo de calor [W/m²], k é a condutividade térmica do material [W/m·K] e ∇T é o gradiente de temperatura. Para situações transientes, como é o caso do aquecimento induzido por laser, a condução é descrita pela equação da difusão de calor:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q \quad (5.2.2)$$

Nessa equação, ρ é a densidade do material [kg/m^3], c_p é o calor específico [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$], T é a temperatura [K], e Q representa uma fonte volumétrica de calor [W/m^3], que, neste contexto, é associada à absorção de energia pelo feixe de laser [4]. A partir da zona de incidência do feixe, o calor se propaga por condução ao longo da espessura da chapa, influenciando diretamente a formação da zona termicamente afetada (ZTA), o perfil térmico e a qualidade do corte.

Por outro lado, a radiação térmica também está presente nesse tipo de processo, embora atue de forma distinta. Trata-se da emissão de energia eletromagnética por corpos em função de sua temperatura, sendo o único dos três modos de transferência que não exige meio material para ocorrer. A taxa de radiação emitida por uma superfície é descrita pela Lei de Stefan-Boltzmann [4]:

$$q = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (5.2.3)$$

Onde q é o fluxo de calor por radiação [W/m^2], ε é a emissividade da superfície (adimensional), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$), e T é a temperatura absoluta [K].

Durante o corte a laser, temperaturas locais muito elevadas — frequentemente superiores a 1500 K — fazem com que a radiação térmica se torne relevante, especialmente na dissipação de calor nas superfícies externas da chapa e na interação com o ambiente [3].

5.3. Interação do Laser com Materiais

5.3.1. Absortividade Espectral e Acoplamento Térmico

A eficiência com que um feixe laser transfere energia para um material metálico depende diretamente de sua absortividade espectral, ou seja, da capacidade do material em absorver radiação em diferentes comprimentos de onda. Esse fator é crítico para determinar a profundidade de aquecimento, a extensão da zona termicamente afetada (ZTA) e a qualidade final do corte.

De acordo com Ion (2020) [6], a absorptividade dos metais é relativamente baixa na região do infravermelho distante ($\sim 10,6 \mu\text{m}$), onde atuam os lasers de CO_2 , mas é significativamente maior na faixa do infravermelho próximo ($\sim 1,06 \mu\text{m}$), típica dos lasers Nd:YAG e de fibra. Já os materiais orgânicos apresentam comportamento inverso: maior absorção em comprimentos de onda mais longos.

Esses dados são fundamentais para a seleção adequada do tipo de laser conforme o material processado. Em materiais como o aço inoxidável, por exemplo, pode ser necessário aplicar tratamentos superficiais ou alterar o comprimento de onda do feixe para melhorar o acoplamento térmico. Também se observa que a absorptividade varia com o ângulo de incidência, rugosidade superficial e temperatura, podendo aumentar significativamente durante o aquecimento.

Abaixo, é apresentada a variação da absorptividade espectral conforme o tipo de material e o comprimento de onda:

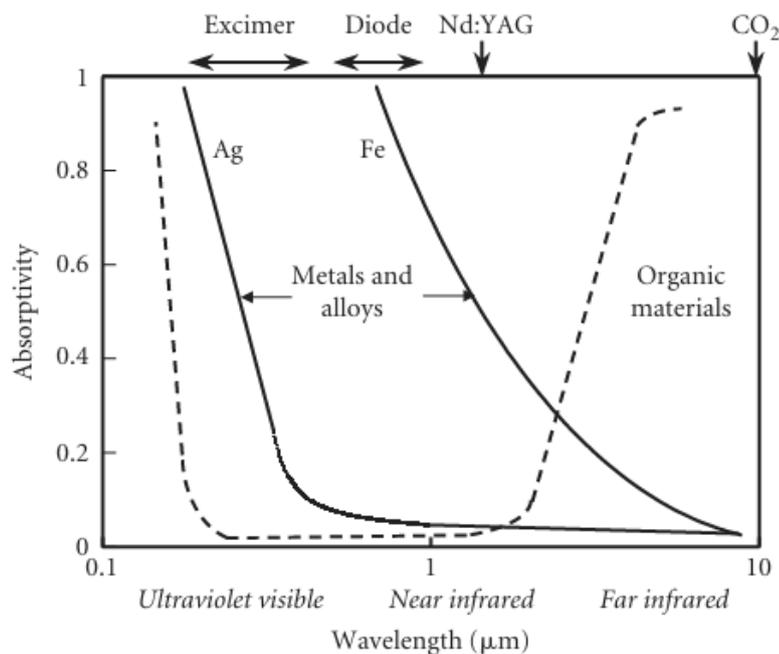


Figura 5.3.1-1- Variação da absorptividade com o comprimento de onda para metais e materiais orgânicos. [6]

A Figura 5.3.1-1 ilustra a variação da absorptividade em função do comprimento de onda para diferentes materiais. Observa-se que metais como o ferro (Fe) apresentam maior absorptividade em comprimentos de onda mais curtos, como os utilizados por lasers de diodo e Nd:YAG, em comparação com lasers de CO_2 , cuja absorção por metais é consideravelmente menor. Isso justifica a escolha do laser de diodo neste estudo, uma vez que seu comprimento de onda permite

melhor acoplamento térmico com metais, promovendo maior eficiência no aquecimento localizado. Além disso, a alta absorptividade nesse espectro contribui para maior penetração de energia, favorecendo processos como corte e perfuração térmica.

5.3.2. Emissividade Térmica

Além da absorptividade espectral, outro parâmetro relevante na análise térmica por laser é a emissividade da superfície do material. A emissividade (ϵ) representa a eficiência com que uma superfície emite energia térmica em relação a um corpo negro ideal. Seu valor varia de 0 a 1 e depende da composição, rugosidade, temperatura e estado superficial do material.

Em metais polidos ou recém-usinados, a emissividade é tipicamente baixa ($\epsilon < 0,2$). No entanto, superfícies oxidadas, envelhecidas ou rugosas apresentam valores significativamente maiores, podendo atingir ou ultrapassar 0,8. Essa diferença afeta diretamente a taxa de perda de calor por radiação — especialmente relevante em simulações com fontes térmicas concentradas, como lasers.

5.3.3. Deformação Térmica vs Deformação Mecânica: Implicações no Corte com Laser

Durante o processamento térmico com laser, os materiais estão sujeitos a gradientes intensos de temperatura em períodos muito curtos. Esses gradientes não só promovem a fusão localizada, mas também podem gerar deformações térmicas significativas, resultando em imperfeições como rebarbas, tensões residuais e até falhas estruturais.

Para avaliar a susceptibilidade à deformação térmica, é útil considerar dois indicadores: o esforço térmico (produto entre o coeficiente de expansão térmica e a temperatura de fusão) e o esforço mecânico (razão entre resistência à tração e módulo de Young). Materiais com altos valores em ambos os parâmetros, como polímeros espumados, tendem a se expandir excessivamente e falhar sob calor localizado — o que os torna inadequados para corte a laser de alta potência.

Por outro lado, metais e ligas, como aços, alumínio e titânio, equilibram rigidez estrutural e estabilidade térmica, possibilitando cortes com maior precisão, desde que os parâmetros operacionais (potência, velocidade de varredura) sejam bem controlados.

O gráfico a seguir mostra a correlação entre esforço térmico e mecânico em diversos materiais, facilitando a seleção de substratos mais adequados ao corte por laser:

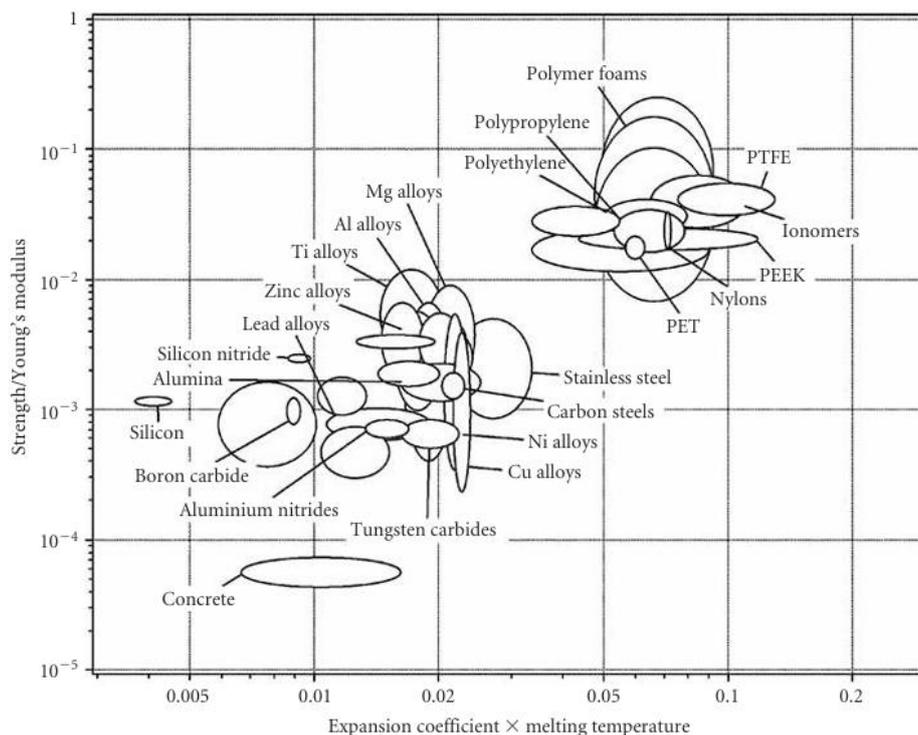


Figura 5.3.3-1 - Deformação mecânica vs deformação térmica para materiais de engenharia. [6]

5.3.4. Regimes de Interação Térmica com o Laser: Influência da Densidade de Potência

A densidade de potência (W/mm^2) é um dos parâmetros mais críticos na definição do tipo de interação entre o feixe laser e o material processado. Pequenas variações nesse valor podem alterar completamente o regime físico envolvido — desde aquecimento superficial até vaporização intensa com formação de cavidades profundas (*keyholes*).

Em baixas densidades de potência, o laser promove apenas elevação gradual da temperatura superficial, sendo apropriado para tratamentos térmicos leves.

Quando a densidade ultrapassa determinados limites, ocorre fusão localizada, característica de processos como soldagem e corte de metais finos. Acima de 10^6 W/cm², inicia-se a vaporização do material, com remoção volumétrica e formação de canais profundos — regime essencial para cortes de alta precisão em chapas espessas.

Abaixo, o gráfico ilustra essas transições de regime térmico com base na densidade de potência aplicada:

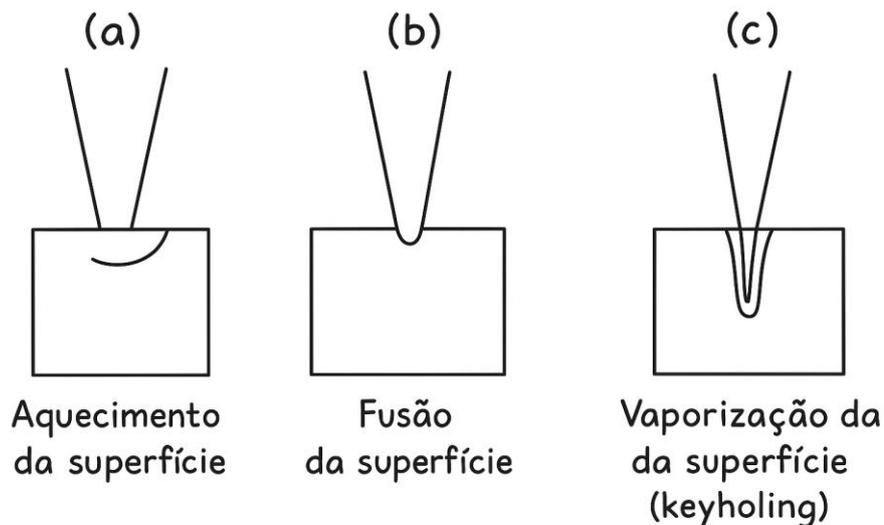


Figura 5.3.4-1 - Representação dos regimes de interação térmica a partir da densidade de potência.

5.3.5. Fatores Críticos na Interação Térmica com o Laser: Parâmetros Térmicos e Ópticos

O desempenho do processo de corte a laser é influenciado por uma combinação de propriedades físicas do material e características do sistema laser. Esses fatores determinam como a energia é absorvida, conduzida e dissipada, afetando diretamente a qualidade do corte, a profundidade de penetração térmica e a extensão da ZTA.

Esses fatores podem ser organizados em três categorias principais:

Absorção do feixe – Depende do comprimento de onda, ângulo de incidência e estado superficial do material. Superfícies rugosas ou oxidadas

aumentam a absorção; além disso, a absorptividade pode crescer com o aquecimento. Condução térmica – Influenciada pela condutividade, capacidade térmica volumétrica e espessura da peça. Materiais com baixa condutividade concentram calor, facilitando o corte; já materiais espessos e altamente condutores exigem potências maiores.

Remoção de calor – Envolve convecção natural ou forçada (uso de ar ou gás auxiliar) e radiação térmica, especialmente relevantes em simulações que envolvam ambientes abertos ou de alta pressão, como aplicações submarinas.

O gráfico a seguir resume esses parâmetros e sua influência sobre a interação térmica durante o corte:

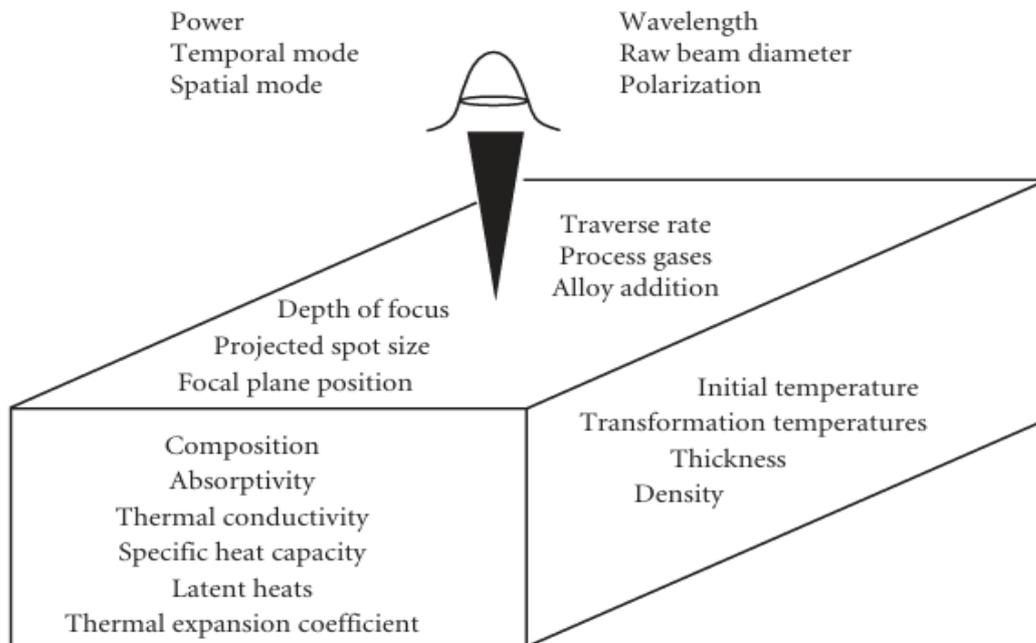


Figura 5.3.5-1 - Parâmetros físicos que influenciam a interação térmica com laser. [6]

5.3.6. Faixas Operacionais de Processamento a Laser: Tempo de Exposição vs Densidade de Potência

A combinação entre tempo de exposição e densidade de potência do feixe laser é determinante para definir o tipo de processo térmico que ocorrerá: corte, soldagem, aquecimento superficial ou modificação microestrutural. Um mesmo

material pode responder de forma completamente distinta dependendo do regime térmico imposto.

Conforme mostrado na literatura, as principais faixas de operação são:

- Modificação superficial: tempos longos (frações de segundo a segundos), com densidades moderadas, suficientes para alterar a microestrutura sem fusão.
- Soldagem por condução: exige densidades maiores com tempo de exposição controlado, permitindo fundir a superfície sem perfurar o substrato.
- Soldagem por penetração e corte térmico: ocorrem na zona superior do gráfico, com densidades superiores a 10^5 W/cm^2 e tempos muito curtos (milissegundos), ideais para formação de *keyholes* e cortes profundos.
- Revestimento a laser: posiciona-se entre os regimes de fusão e modificação, com energia suficiente para fundir camadas superficiais sem danificar o material base.

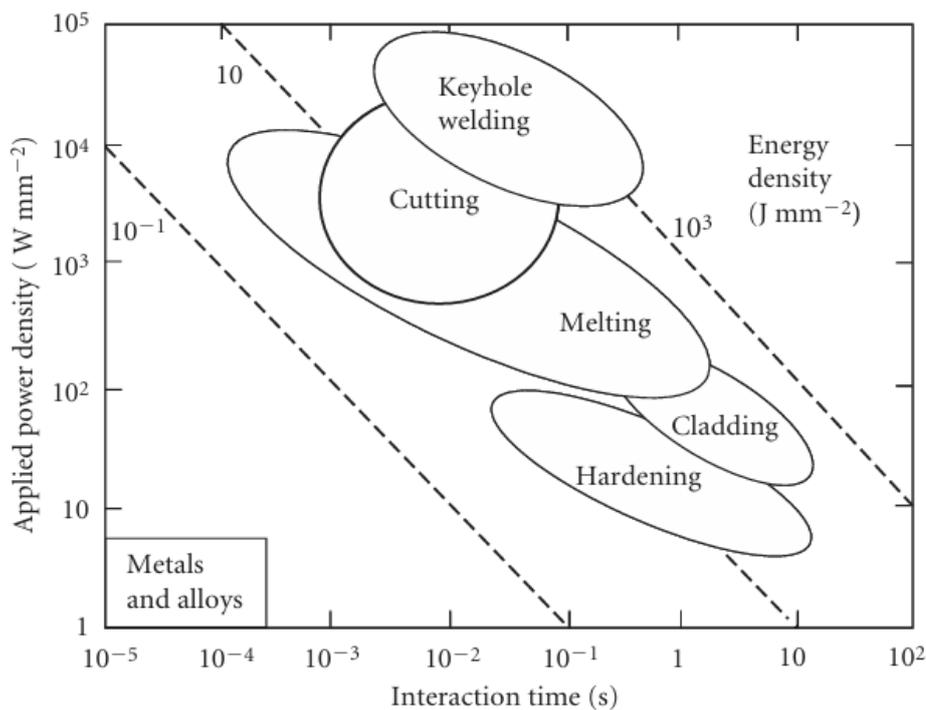


Figura 5.3.6-1 - Faixas de densidade de potência e tempo de exposição típicas para diferentes processos a laser. [6]

5.3.7. Profundidade de Penetração Térmica: Influência da Potência e do Tempo de Exposição

A profundidade de penetração térmica é um dos parâmetros mais relevantes na engenharia de processos a laser. Ela define a capacidade do feixe em atingir regiões internas do material, determinando a eficácia do corte, soldagem ou tratamento térmico, além de influenciar diretamente a zona termicamente afetada (ZTA) e a qualidade do acabamento.

Essa profundidade depende basicamente de dois fatores:

- Potência do feixe (W)
- Tempo de exposição (s)

A relação entre essas variáveis é não linear — em tempos curtos, o aumento da potência provoca crescimento rápido da penetração térmica; em tempos mais longos, o aquecimento se estabiliza devido à dissipação de calor.

O gráfico abaixo mostra como a profundidade térmica evolui com o tempo de exposição e diferentes potências, indicando as regiões ideais para processos como corte por vaporização:

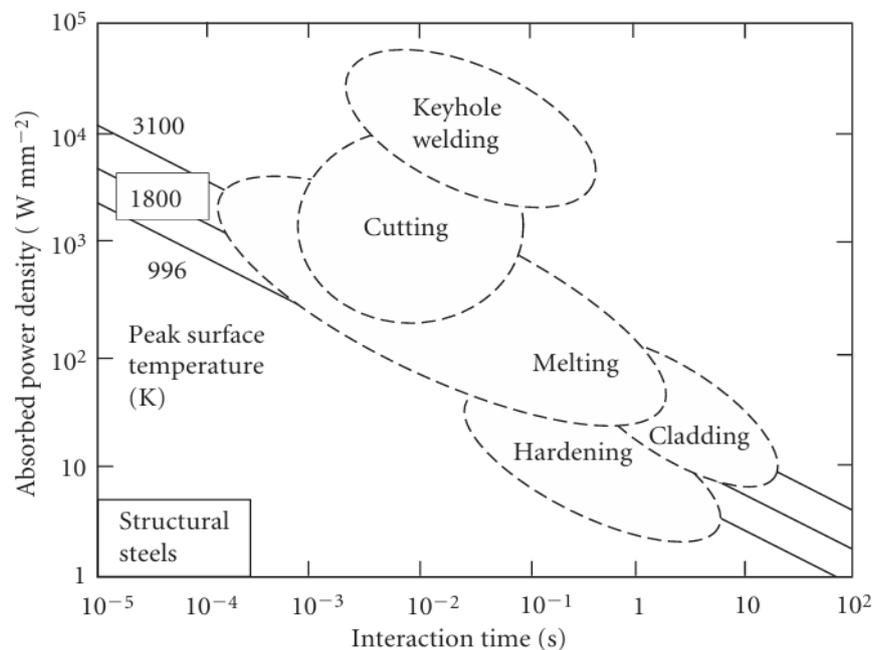


Figura 5.3.7-1 - Profundidade de penetração térmica em função da potência e do tempo de exposição. [6]

6. Metodologia para o desenvolvimento do trabalho

Para a realização deste trabalho, foram conduzidas simulações considerando dois cenários principais: um com o feixe de laser fixo no centro do disco e outro com o feixe de laser se deslocando linearmente sobre sua superfície. O material utilizado foi um disco de aço AISI 4340 com 25 cm de diâmetro, sendo a espessura do disco uma variável nos testes.

Além disso, variou-se a distância entre o feixe de laser e o disco, o que resultou na utilização de diferentes diâmetros de *spot size*, conforme a posição do feixe ao longo da simulação.

As simulações foram realizadas considerando dois meios distintos: ar e água, ambos inicialmente em repouso e com temperatura ambiente fixada em 300 K. Em cada caso, adotou-se a convecção natural como mecanismo de transferência de calor entre a superfície metálica e o meio envolvente. Essa abordagem permite avaliar comparativamente os efeitos térmicos do feixe de laser sob diferentes condições de resfriamento convectivo, respeitando a realidade de aplicações tanto em ambientes abertos quanto em meios submersos, como ocorre em contextos offshore.

Para o caso do feixe de laser estático, considerou-se que o laser permaneceu ligado durante 900 segundos (15 minutos), tempo suficiente para simular um aquecimento contínuo e observar a evolução térmica sob regime estacionário. Após esse período, o feixe foi desligado, permitindo analisar a dissipação de calor na ausência da fonte térmica.

Já para o caso do feixe de laser em movimento, a simulação foi conduzida por 240 segundos, durante os quais o laser permaneceu continuamente ligado, deslocando-se linearmente ao longo de uma linha central na superfície superior do disco. A distância total percorrida pelo feixe foi de 250 mm, resultando em uma velocidade de deslocamento de aproximadamente 1,04 mm/s.

Propriedades do disco de aço:

- Condutividade térmica: 44,5 W/(mK)
- Densidade: 7850 kg/m³
- Calor específico: 475 J/(kg*K)

6.1. Tipo de Laser utilizado

O presente trabalho utiliza um laser de diodo de 1800 W, fabricado pela empresa alemã *Laser Line*. Este equipamento foi inicialmente adquirido para ser utilizado em projetos conduzidos pelo Laboratório de Sensores de Fibra Óptica (LSFO) da PUC-Rio, mais especificamente no projeto *Cyclops*, cujo objetivo era a dissociação de hidratos utilizando feixes de laser em ambientes submarinos. A estrutura do LSFO serviu como base para esta pesquisa, permitindo a reutilização do mesmo sistema óptico em um novo contexto: a investigação da viabilidade de uso do feixe laser para corte de chapas de aço.

O sistema conta com uma mangueira de fibra óptica, que permite o direcionamento preciso do feixe gerado. A Figura 6.11 apresenta o funcionamento esquemático do laser acoplado à fibra óptica. A escolha do comprimento de onda na faixa do azul (445 nm) visa reduzir a atenuação em meio aquoso, tornando o sistema particularmente eficaz em aplicações submarinas. No entanto, para os propósitos deste trabalho, optou-se por avaliar o desempenho do feixe em chapas metálicas, explorando seu potencial para corte térmico industrial.

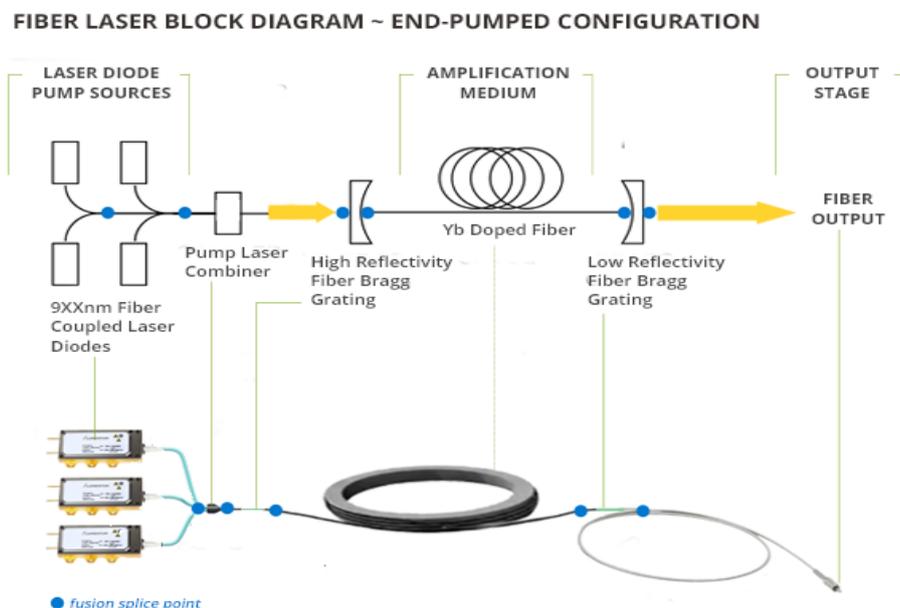


Figura 6.1-1 - Esquema de como é o funcionamento do laser de diodo utilizado com a mangueira de fibra óptica. [5]

Inicialmente, foram utilizados *spot sizes* de 2 mm e 4 mm, devido à configuração atual da lente instalada no sistema. O laser foi comprado intencionalmente com uma lente que ampliava o diâmetro do feixe, permitindo

aplicações seguras em hidratos, sem risco de perfuração intensa. Contudo, essa configuração limitou a concentração de energia por unidade de área, o que impacta diretamente na densidade de potência durante os testes de corte. A limitação, portanto, não está associada ao diâmetro da fibra óptica, mas sim à lente instalada no sistema. A substituição por uma lente com foco mais fechado permitiria, no futuro, a utilização de *spot sizes* menores e, conseqüentemente, maior densidade de potência — condição ideal para aplicações de corte em chapas espessas.

Com base nisso, este trabalho busca avaliar, por meio de simulações numéricas, se é possível alcançar a perfuração térmica de chapas metálicas com a lente atual. Simultaneamente, a análise dos resultados orienta futuras adaptações no sistema óptico, com vistas à obtenção de feixes mais concentrados para melhorar a eficiência de corte.

6.2. Coeficiente de troca de calor

6.2.1. Convecção natural no ar:

A troca de calor por convecção natural no ar atmosférico ocorre devido ao movimento espontâneo do fluido gerado por diferenças de densidade, que por sua vez resultam de gradientes térmicos entre a superfície aquecida e o ar adjacente. No presente estudo, considera-se que a temperatura ambiente inicial é de 300 K, mesma temperatura assumida inicialmente para a superfície metálica antes da incidência do feixe de laser. A partir da aplicação do laser, a superfície sofre aquecimento significativo, gerando um gradiente térmico suficiente para iniciar e intensificar o processo convectivo.

Em condições normais, valores típicos para o coeficiente de transferência de calor por convecção natural em superfícies expostas ao ar em repouso situam-se entre 5 e 10 W/m²·K, conforme indicado por Bird, Stewart e Lightfoot (2007) [20] e Holman (2010) [21]. No entanto, sob aquecimento localizado intenso, como no caso da irradiação a laser, esse coeficiente tende a se elevar, em função do aumento do número de Rayleigh e da intensificação dos movimentos convectivos ao redor da superfície aquecida.

Nesse contexto, diversos autores recomendam a utilização de coeficientes entre 10 e 15 W/m²·K para modelagens térmicas em que há elevação significativa

da temperatura superficial [4], [3]. Assim, para representar adequadamente o fenômeno físico envolvido e garantir um bom equilíbrio entre a simplificação computacional e a fidelidade ao comportamento térmico real, adota-se neste trabalho o valor de $h = 12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ como coeficiente de transferência de calor por convecção natural no ar.

6.2.2. Convecção natural na água:

A convecção natural na água ocorre de maneira significativamente mais eficiente do que no ar, devido à maior densidade, capacidade térmica e condutividade do líquido. Para água parada a uma temperatura média de 300 K, o coeficiente de transferência de calor por convecção natural pode variar amplamente, dependendo da geometria da superfície, do gradiente térmico e das dimensões características do sistema. De acordo com correlações clássicas baseadas no número de Rayleigh e na equação de Churchill–Chu, os valores típicos para essa condição situam-se entre 100 e 3000 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$. Essa faixa contempla desde situações em que o fluido permanece quase completamente estático — aproximando-se de um regime puramente condutivo — até casos em que pequenas diferenças de temperatura promovem movimentos convectivos espontâneos. Para simulações com geometrias simples e temperatura superficial levemente superior à da água, a literatura recomenda utilizar um valor representativo em torno de 500 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, conforme apontado em obras de referência como *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* de Çengel e Ghajar (2015) [4], bem como *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* de Incropera e DeWitt (2008) [2]. Com isso, adota-se neste trabalho o valor de $h = 500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ como coeficiente de transferência de calor por convecção natural na água. A adoção desse valor busca equilibrar a fidelidade física do modelo com a simplificação computacional, sendo compatível com condições laboratoriais ou ambientes simulados com controle térmico.

6.3. Escolha da emissividade

Considerou-se uma emissividade de 0,8 nas simulações realizadas no *COMSOL Multiphysics*, assumindo uma condição superficial oxidada do disco

metálico. Essa escolha visa representar com maior fidelidade o comportamento térmico em ambientes reais, como instalações offshore, onde a oxidação por exposição ao ar, umidade e salinidade é comum. A adoção desse valor impacta o balanço de energia nas fronteiras radiativas, influenciando a distribuição de temperatura e a profundidade de penetração térmica prevista pelos modelos.

6.4. Diâmetro do spot size

O diâmetro do *spot size* adotado neste trabalho foi definido com base na lente instalada no sistema óptico utilizado. Embora a fibra óptica acoplada ao laser tenha um núcleo compatível com diâmetros inferiores, a lente atual foi escolhida intencionalmente para gerar um feixe de maior diâmetro, adequado ao projeto original de dissociação de hidratos. Essa escolha permitia uma distribuição mais ampla de energia, evitando perfurações profundas em estruturas sensíveis.

Dessa forma, foram estudados dois valores de *spot size*: 2 mm e 4 mm. Esses valores são superiores àqueles tradicionalmente usados em aplicações industriais de corte térmico, que costumam variar entre 90 μm e 150 μm ([6],[8],[9]). A principal limitação, neste caso, decorre do tamanho do foco gerado pela lente atual. Para permitir a utilização de *spot sizes* menores — condição desejável para aumentar a densidade de potência e a eficiência de corte —, seria necessário substituir a lente por uma com foco mais estreito.

Essa modificação futura é recomendada para tornar o sistema mais versátil, ampliando sua aplicabilidade para cortes mais exigentes. No presente estudo, entretanto, optou-se por trabalhar com a lente existente e verificar, por meio das simulações, até que ponto é possível alcançar perfuração térmica eficiente mesmo com *spot sizes* ampliados. O objetivo é, portanto, explorar os limites do sistema atual, ao mesmo tempo em que se apontam caminhos para sua melhoria técnica.

6.5. Pontos de medição do disco

Para avaliar a propagação térmica provocada pelo feixe de laser, foram definidos pontos de medição estrategicamente posicionados no disco. A escolha desses pontos considerou a simetria da peça e a espessura da chapa, permitindo uma

análise representativa da distribuição de temperatura ao longo da espessura e das superfícies frontal e posterior. Essa abordagem visa capturar os principais gradientes térmicos gerados durante o processo de aquecimento, facilitando a interpretação dos efeitos térmicos sob diferentes configurações de *spot size* e condições de contorno.

Foram definidos pontos de medição na parte frontal e posterior do disco.

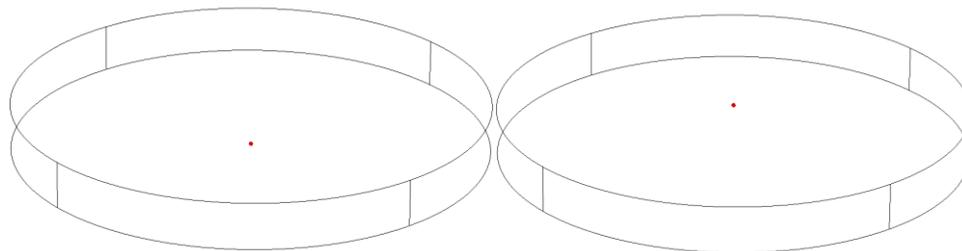


Figura 6.5-1 - Pontos de Medições na Parte Inferior do Disco e Superior do Disco.

Também foi avaliado pontos na variação de espessura do disco no centro dele.

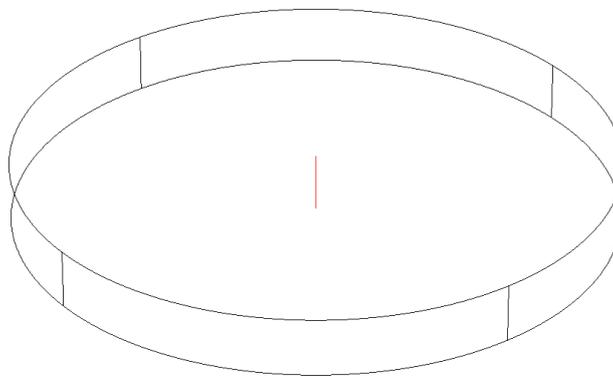


Figura 6.5-2 - Linha de Medição ao longo da espessura no centro do disco.

Além disso, foram definidos também linhas de medições na parte superior e inferior do disco, as linhas possuem o diâmetro do disco.

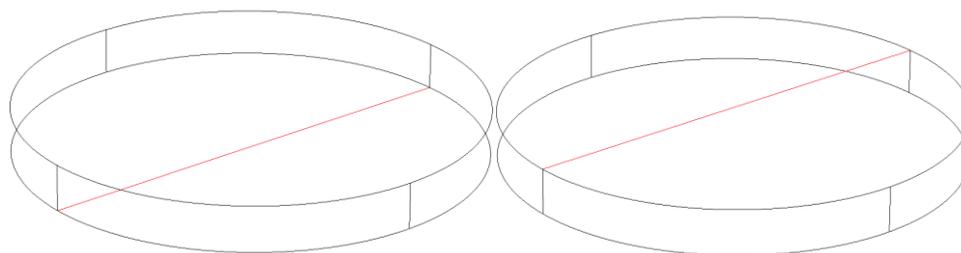


Figura 6.5-3 - Linhas de Medições na Parte Superior e Inferior do Disco.

6.6. Geração da malha

A geração da malha é uma etapa crítica em simulações numéricas via elementos finitos, pois influencia diretamente a acurácia e o desempenho computacional dos resultados obtidos. Nesse contexto, optou-se por uma malha do tipo triangular livre para a discretização do domínio físico, tendo como base a simulação do feixe de laser com 4 mm de diâmetro, espessura de 12.7 mm e potência máxima de 1800 W.

Para avaliar a sensibilidade da solução à discretização espacial, foram testadas cinco configurações distintas de malha, com variações de refinamento. O ponto de medição adotado foi o centro da superfície superior do disco — região onde o feixe incide diretamente. As malhas utilizadas foram: (A) Malha com 2520 elementos; (B) Malha com 7376 elementos; (C) Malha com 21672 elementos; (D) Malha com 59008 elementos; (E) Malha com 134712 elementos; e (F) Malha com 508464 elementos.

Tabela 6.6.1: Tabela com as medidas das malhas.

| Malhas | Elementos de domínio | Elementos de limite | Elementos de borda |
|--------|----------------------|---------------------|--------------------|
| 2520 | 2520 | 1500 | 136 |
| 7376 | 7376 | 4056 | 200 |
| 21672 | 21672 | 11476 | 336 |
| 59008 | 59008 | 30560 | 544 |

| | | | |
|--------|--------|--------|------|
| 134712 | 134712 | 68924 | 800 |
| 508464 | 508464 | 257384 | 1592 |

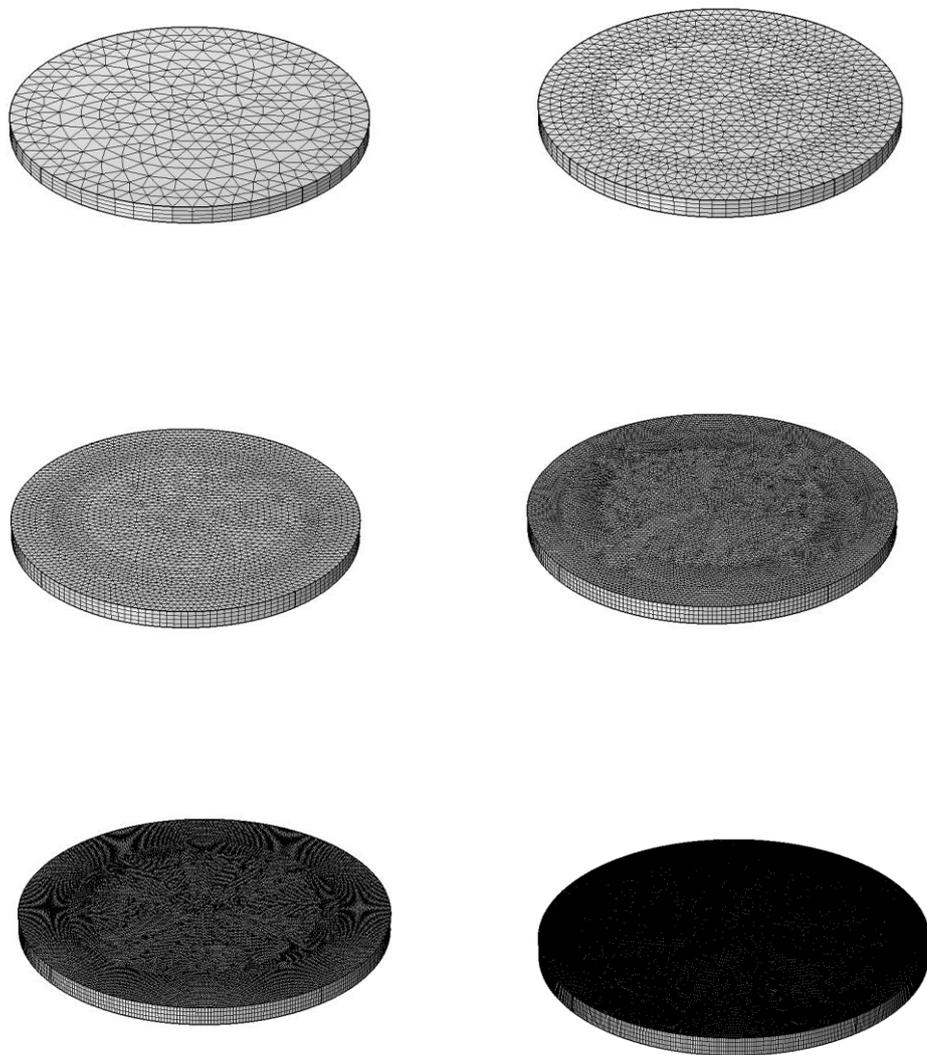


Figura 6.6-1 - Seis Tipos de Malhas usadas para Estudo: (A) Malha com 2520 elementos; (B) Malha com 7376 elementos; (C) Malha com 21672 elementos; (D) Malha com 59008 elementos; (E) Malha com 134712 elementos; e (F) Malha com 508464 elementos.

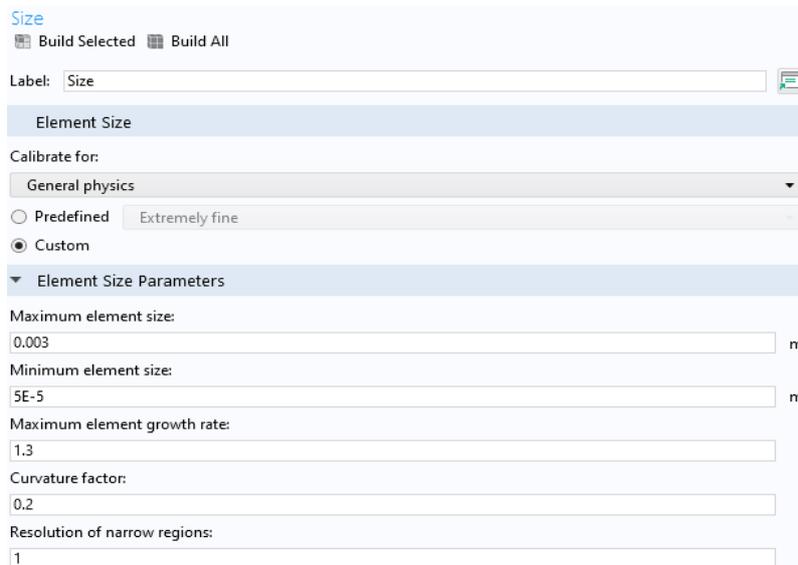


Figura 6.6-2 - Malha 59008.

A diferença entre as malhas 59008, a 134712 e a 508464, foi apenas no tamanho máximo do elemento. Para a malha 134712, o máximo do elemento foi 0.002, para a malha 59008, o tamanho máximo do elemento foi de 0.001.

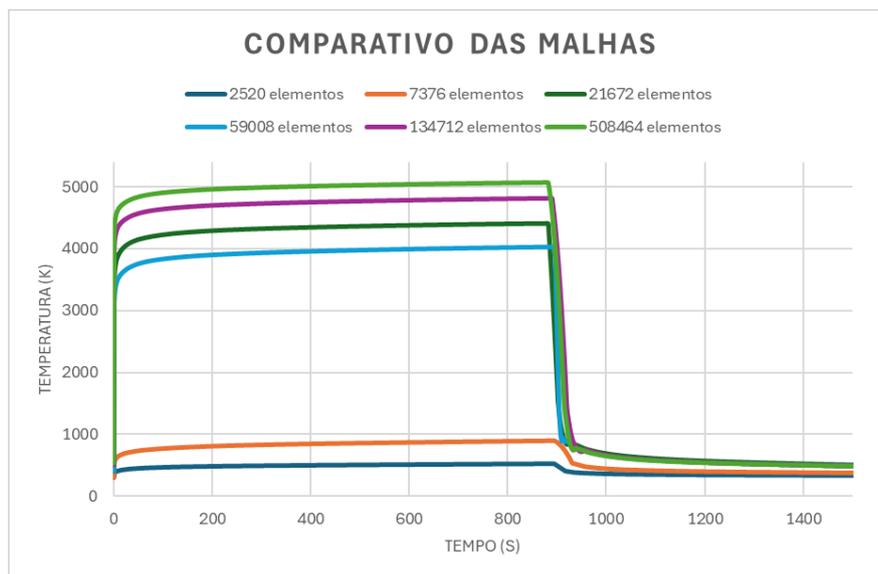


Figura 6.6-3- Comparativo dos Resultados das Malhas

Os resultados mostraram que apenas a partir da malha 21672 (malha mais fina padrão fornecida pelo *COMSOL*) foi possível capturar com precisão os gradientes térmicos induzidos pelo feixe de laser. A malha 7376 (penúltima malha mais fina fornecida pelo *COMSOL*), apesar de mais leve, apresentou discrepâncias

notáveis nos valores de temperatura, indicando uma resolução inadequada. Visando refinar ainda mais a discretização, foram desenvolvidas três novas malhas personalizadas a 59008, a 134712 e a 508464, que apresentaram comportamento similar ao da malha 21672, porém com custos computacionais significativamente mais elevados.

Durante os testes, constatou-se que a malha 508464, embora muito precisa, exigiu cerca de 100 GB de espaço em disco e aproximadamente 3 horas para conclusão da simulação no caso do laser estático. No entanto, ao se tentar realizar um refinamento ainda maior — além da malha 508464 — houve falha na simulação devido às limitações computacionais. Esse refinamento adicional chegou a utilizar mais de 250 GB de espaço em disco antes mesmo de completar metade do tempo simulado, levando à interrupção do processo por falta de memória disponível.

Diante disso, concluiu-se que a Malha 508464 seria ideal em termos de fidelidade numérica, mas inviável para simulações com o laser em movimento, nas quais a carga computacional se tornava excessiva e os resultados não podiam ser obtidos. Assim, optou-se pela Malha 134712 como padrão em todas as simulações. Essa decisão representou um equilíbrio entre precisão e viabilidade computacional, permitindo a comparação consistente entre os diferentes cenários simulados sem comprometer a qualidade dos dados.

7. Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas para avaliar a capacidade de corte térmico do sistema de laser adotado. As simulações foram divididas em dois conjuntos principais: (1) laser estacionário aplicado no centro do disco e (2) laser em movimento linear sobre a superfície. Para cada cenário, analisaram-se diferentes configurações de *spot size* (2 mm e 4 mm) e ambientes (ar e água), com o objetivo de verificar as condições nas quais a perfuração ou fusão do material é viável. Abaixo, cada situação é comentada individualmente, com apoio visual das figuras geradas pelo *COMSOL*.

7.1. Laser apontado para o centro do disco no ar com máxima potência (1800W)

Para entender o comportamento térmico ao longo da superfície superior do disco em contato com o ar, apresenta-se a seguir o perfil de temperatura registrado ao longo de uma linha de medição central em ambos os *spot sizes*, conforme mostrado na metodologia (figura 6.5-1).

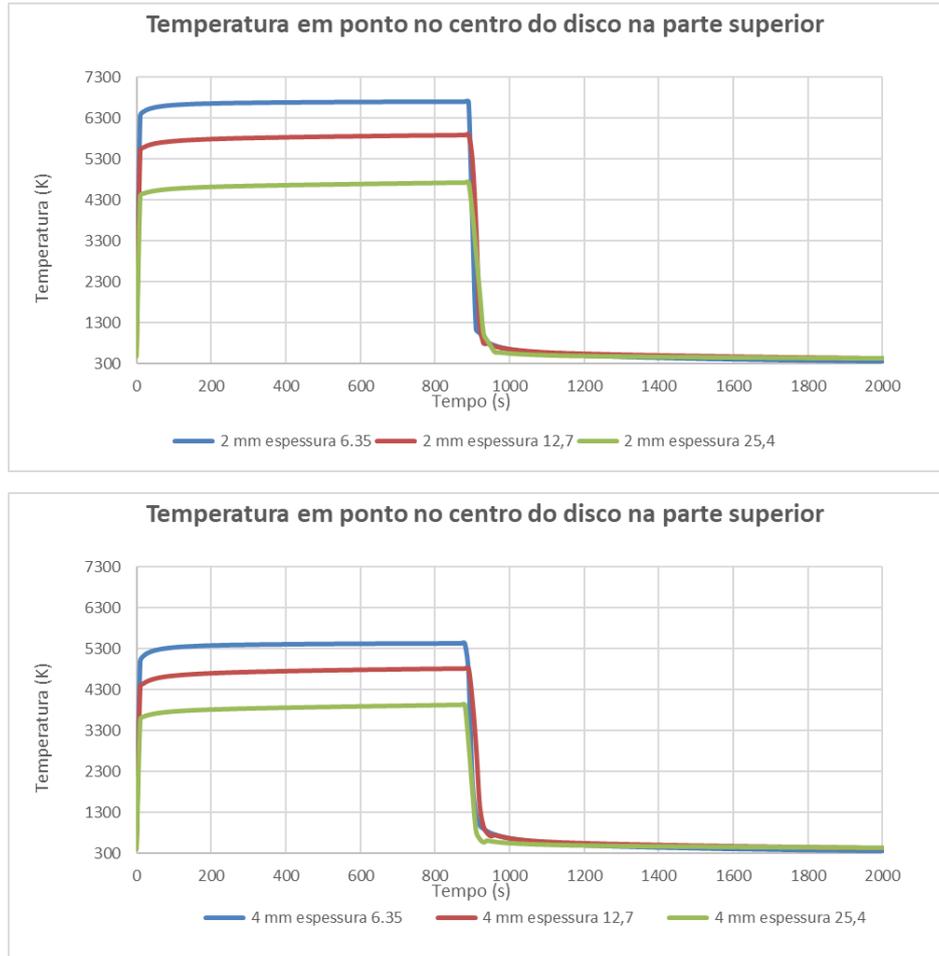


Figura 7.1-1 - Temperatura ao Longo de Um Ponto Posicionado na Parte Superior do Disco no Ar.

7.1.1. Disco com ¼ de polegada de espessura:

Nesta simulação, o laser de 1800 W incide de forma estacionária no centro de um disco com 6,35 mm de espessura, em meio aéreo. Os resultados indicam que, mesmo com o *spot size* de 4 mm — que possui menor densidade de potência — as temperaturas na face inferior ultrapassam os 1800 K, valor acima do ponto de fusão

do aço AISI 4340. Já com o *spot size* de 2 mm, observa-se uma concentração ainda maior de energia, resultando em temperaturas que superam 4000 K na superfície frontal e promovem forte penetração térmica ao longo da espessura.

Esses dados sugerem que a perfuração completa da chapa é viável para ambas as configurações, com maior eficiência observada no caso do spot menor. A combinação entre tempo prolongado de exposição (900 s), acúmulo térmico e remoção progressiva do material fundido favorece a formação de cavidades e reforça o potencial da técnica para aplicações de corte térmico em espessuras finas.

A temperatura ao longo da parte superior e inferior do disco utilizam as linhas mostradas na figura 6.5-2. Já o gráfico com a temperatura ao longo do centro do disco utiliza a linha do gráfico 6.5-3.

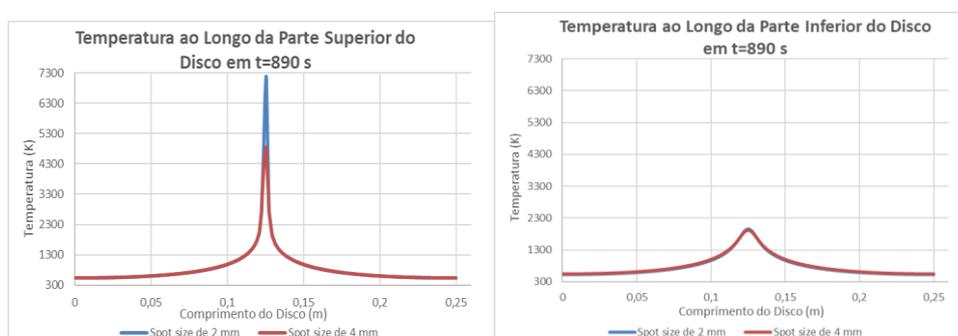


Figura 7.1.1-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, Disco de 6,35 mm de Espessura.

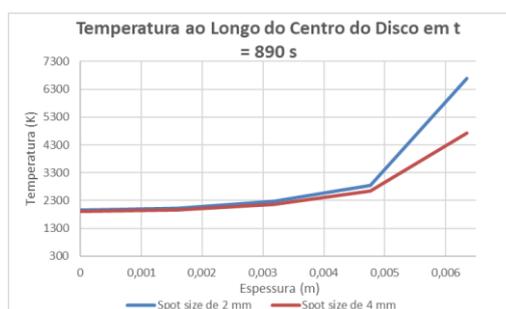


Figura 7.1.1-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 6,35 mm de Espessura.

7.1.2. Disco com meia polegada de espessura:

Mesmo com o aumento da espessura para 12,7 mm, a simulação com feixe estacionário no ar revelou temperaturas elevadas na superfície superior e moderadas

na inferior. O *spot size* de 2 mm demonstrou maior capacidade de penetração térmica, aproximando a temperatura da face oposta ao ponto de incidência dos níveis de fusão. Isso indica que a perfuração pode ocorrer, ainda que com menor eficiência comparada ao disco de 6,35 mm.

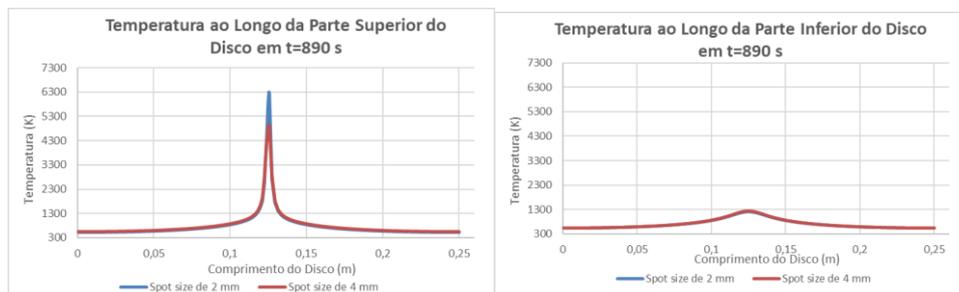


Figura 7.1.2-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, disco de 12,7 mm de espessura.

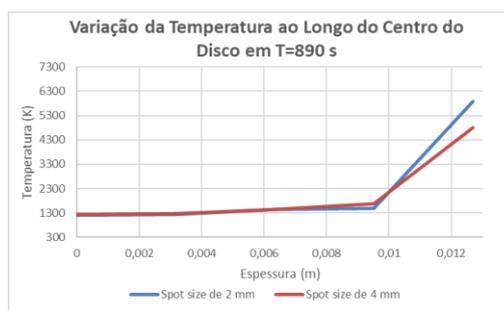


Figura 7.1.2-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 12,7 mm de Espessura.

7.1.3. Disco com uma polegada de espessura:

Com 25,4 mm de espessura, a simulação revelou um comportamento térmico limitado na propagação até a base do disco. O feixe com 2 mm ainda atinge temperaturas críticas na superfície, mas a face inferior permanece abaixo do ponto de fusão, mesmo após 900 s. Isso sugere que a perfuração total não ocorreria sem considerar a remoção progressiva de material fundido.

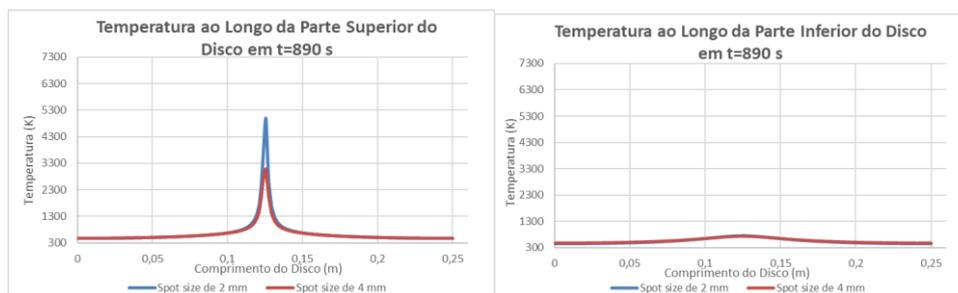


Figura 7.1.3-1 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 25,4 mm de espessura.

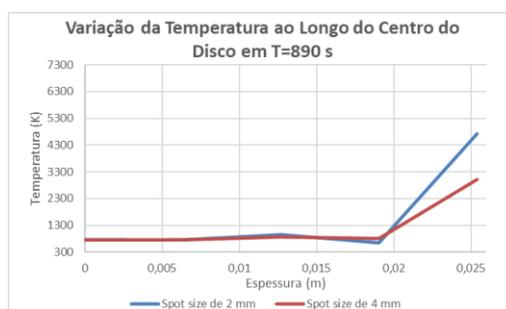


Figura 7.1.3-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 25,4 mm de espessura.

Nos experimentos numéricos com o feixe de laser estacionário operando a 1800 W e incidindo no centro do disco em meio de ar, foi possível observar um comportamento térmico altamente favorável à perfuração, especialmente quando se considera o tempo prolongado de exposição (900 s) e os efeitos acumulativos da fusão. O gráfico de temperatura na superfície superior (Figura 7.1-1) evidencia que, ao longo da simulação, a região sob o feixe atinge temperaturas que ultrapassam 7000 K nos casos com *spot size* de 2 mm e 4500 K com *spot size* de 4 mm. Tais valores estão muito acima do ponto de fusão do aço AISI 4340 (cerca de 1698 a 1733 K), o que implica fusão intensa e contínua da superfície irradiada.

No caso do disco com $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura (6,35 mm), as temperaturas na face inferior ultrapassaram 1800 K mesmo com *spot size* maior, indicando forte penetração térmica. Esses resultados, por si só, já validam a viabilidade da perfuração completa. Porém, para os discos de maior espessura — 12,7 mm e 25,4 mm — o modelo numérico tradicional mostrou temperaturas mais moderadas nas regiões internas e inferiores, especialmente com o *spot size* de 4 mm, sugerindo que a fusão não teria atingido toda a espessura. No entanto, tal

interpretação se baseia na hipótese de que a geometria da chapa se mantém constante ao longo da exposição, o que não reflete o comportamento físico real.

Ao longo de uma exposição contínua, é razoável supor que a porção superior da chapa funde e seja parcialmente removida, reduzindo progressivamente a espessura efetiva do material. Esse processo, conhecido na literatura como remoção progressiva por fusão ou ablação térmica [6], [4], favorece a penetração do feixe ao eliminar a resistência térmica do material já fundido. Esse efeito foi reforçado na simulação com a observação do gráfico da Figura 7.1-1, no qual se nota um crescimento contínuo da temperatura com tendência ao regime estacionário tardio, sugerindo acúmulo térmico compatível com a formação de cavidades profundas (*keyholes*), típicas de processos de perfuração a laser.

Mesmo nos casos em que a face inferior permaneceu abaixo da temperatura de fusão, a combinação de tempo prolongado, alta densidade de potência (especialmente com *spot size* de 2 mm) e remoção progressiva da barreira sólida permite concluir que a perfuração completa seria tecnicamente viável em todas as espessuras analisadas. Essa conclusão é coerente com os regimes de interação térmica por vaporização mostrados no gráfico de densidade de potência (Figura 5.3.7-1), que indicam que densidades superiores a 10^6 W/cm² são capazes de induzir remoção volumétrica significativa.

Dessa forma, os resultados obtidos nas simulações com o feixe estacionário no ar demonstram que, mesmo em espessuras de até 25,4 mm, a formação de um furo por fusão contínua é possível, sobretudo com o *spot size* mais concentrado. A análise reforça a importância de considerar a dinâmica de remoção de material ao longo do tempo em simulações térmicas de processos de corte com laser.

7.2. Laser apontado para o centro do disco na água com potência máxima(1800W)

O gráfico a seguir representa o perfil de temperatura dos dois *spot sizes* ao longo da parte superior do disco submerso em água, sob ação contínua do feixe de laser.

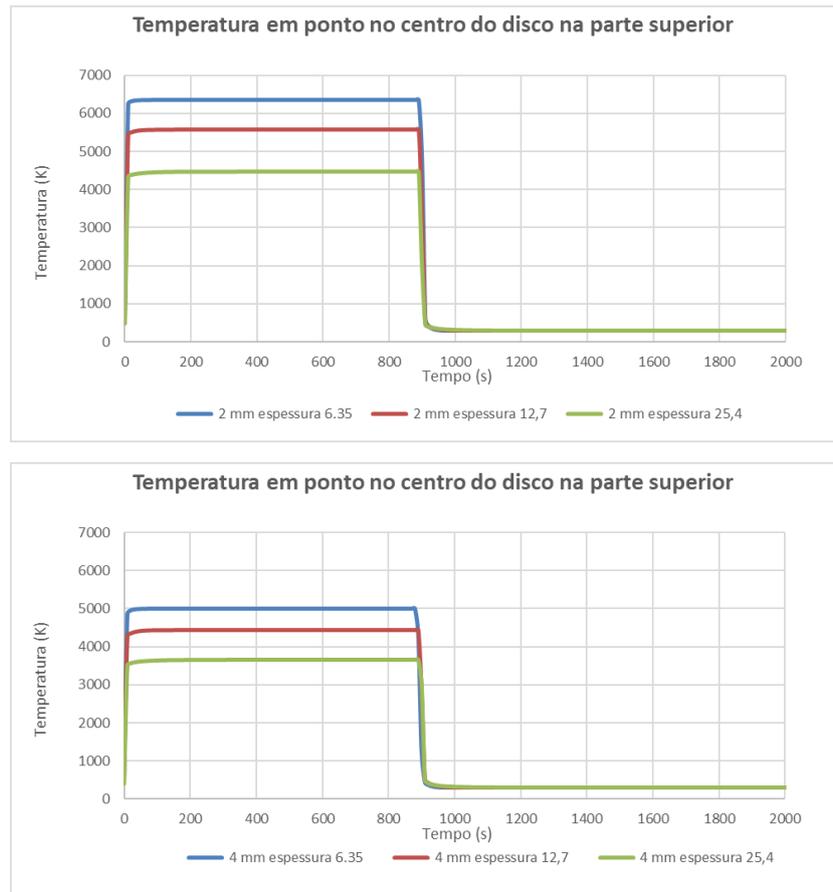


Figura 7.2-1 - Temperatura ao Longo de Um Ponto Posicionado na Parte Superior do Disco na água.

7.2.1. Disco com $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura:

Em meio aquoso, o feixe de 1800 W estacionário sobre o disco de 6,35 mm ainda foi capaz de gerar temperaturas superiores a 3000 K na superfície frontal, mesmo com intensa dissipação. As temperaturas na parte inferior foram menores, mas o tempo de exposição favorece a remoção progressiva do material, indicando a possibilidade de perfuração térmica.

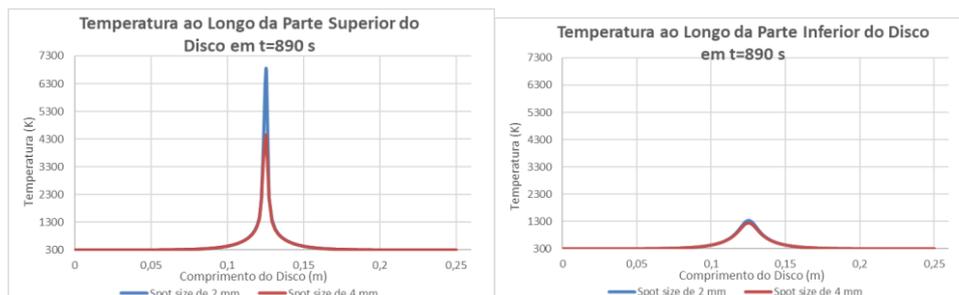


Figura 7.2.1-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, Disco de 6,35 mm de Espessura.

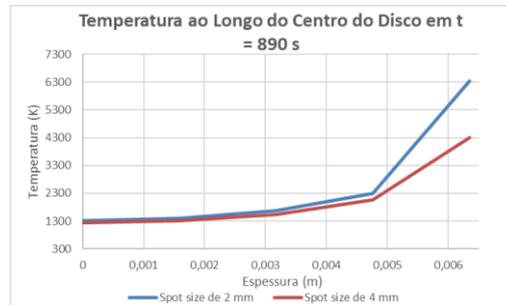


Figura 7.2.1-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 6,35 mm de espessura.

7.2.2. Disco com meia polegada de espessura:

Com espessura de 12,7 mm, a dissipação térmica na água limitou a propagação de calor, especialmente com o spot de 4 mm. Já com 2 mm, a energia foi mais concentrada, resultando em temperaturas mais altas no centro, mas ainda insuficientes para atravessar toda a espessura de forma eficiente sem a hipótese de remoção progressiva.

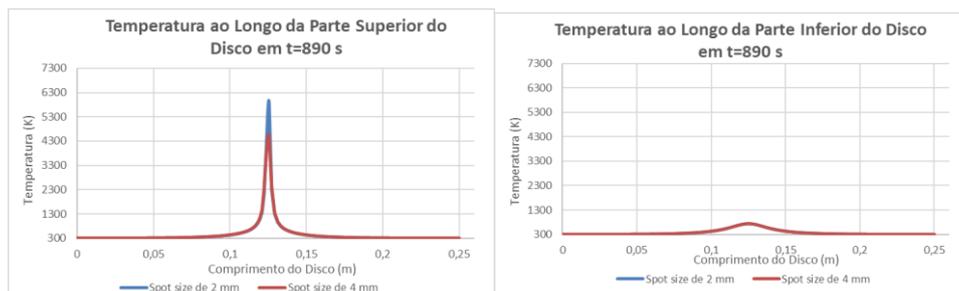


Figura 7.2.2-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, Disco de 12,7 mm de Espessura.

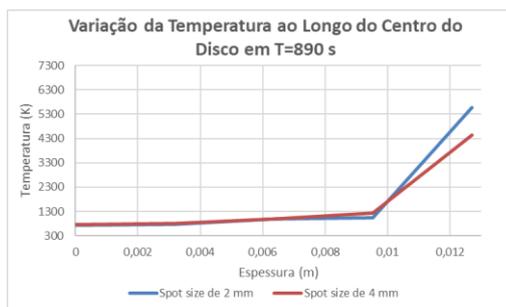


Figura 7.2.2-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 12,7 mm de espessura.

7.2.3. Disco com uma polegada de espessura:

O disco de 25,4 mm mostrou desempenho mais restrito em meio aquoso. As temperaturas simuladas não alcançaram o ponto de fusão na face oposta, mesmo após longo tempo de exposição. A atuação do feixe foi mais localizada, reforçando que, para espessuras elevadas na água, o corte térmico seria inviável sem ajustes nos parâmetros.

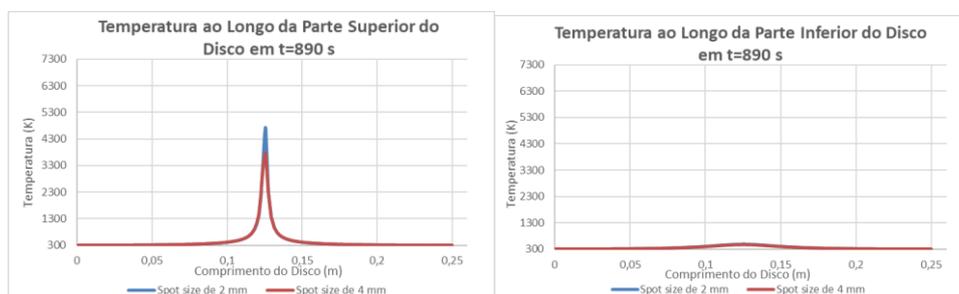


Figura 7.2.3-1 - Temperatura em diferentes linhas do disco, Disco de 25,4 mm de Espessura.



Figura 7.2.3-2 - Temperatura ao longo do centro do disco, disco de 25,4 mm de espessura.

Nas simulações realizadas com o feixe de laser estacionário operando a 1800 W em meio aquoso, observou-se um padrão térmico distinto daquele encontrado nas simulações conduzidas no ar. Devido à maior eficiência térmica da água, representada por um coeficiente de convecção natural de $500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, houve forte dissipação de calor nas superfícies externas da chapa, limitando a propagação térmica para o interior do material. No entanto, os gráficos de temperatura indicam que a superfície superior ainda atingiu valores elevados ao longo da simulação, conforme ilustrado na Figura 7.2-1.

Para o disco de 6,35 mm de espessura ($\frac{1}{4}$ de polegada), os resultados apontam temperaturas elevadas na superfície frontal, superando 3000 K, e valores mais contidos na face inferior. Apesar disso, a hipótese de remoção progressiva de material fundido, associada à persistência da fonte de calor por 900 segundos (como pode ser visto na Figura 7.2-1), permite considerar que a espessura efetiva da chapa tenha se reduzido significativamente ao longo do tempo, favorecendo a penetração do feixe em direção ao fundo da peça.

Esse efeito se torna ainda mais relevante nas configurações com *spot size* de 2 mm, que concentram mais energia por unidade de área e, portanto, promovem maior acúmulo térmico localizado. Mesmo para espessuras maiores, como 12,7 mm e 25,4 mm, embora as temperaturas simuladas na parte inferior não ultrapassem os limites de fusão do aço AISI 4340, os valores observados no centro e na superfície frontal permanecem elevados por um longo período, o que sugere a formação de cavidades fundidas em progressão vertical.

Esse comportamento está de acordo com os regimes de interação térmica por vaporização descritos na literatura [4],[6], os quais indicam que, sob densidades de potência elevadas e tempos longos de exposição, é possível ocorrer remoção volumétrica contínua, mesmo em ambientes com alto resfriamento convectivo. Sendo assim, embora os resultados simulados no meio aquoso demonstrem uma maior resistência térmica do sistema, a combinação de tempo prolongado, *spot size* reduzido e remoção progressiva de material reforça a possibilidade de perfuração térmica completa, especialmente nos casos com menor espessura e maior concentração de energia.

7.3. Laser variando linearmente ao longo do disco no ar e máxima potência(1800W)

A figura abaixo ilustra o percurso linear percorrido pelo feixe de laser ao longo do disco, simulando uma condição mais próxima de aplicações industriais reais.

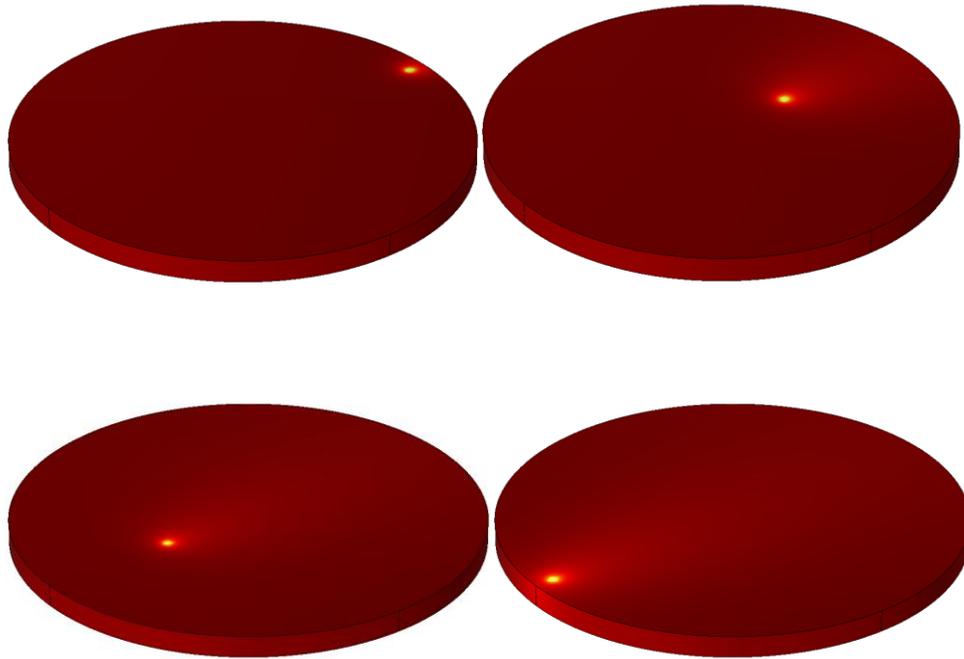


Figura 7.3-1 - Variação do Laser ao Longo do Disco.

O gráfico a seguir compara a temperatura máxima atingida no centro do disco para diferentes combinações de *spot sizes* (2 mm e 4 mm) e espessuras, com o laser em movimento.





Figura 7.3-2 - Temperatura no Centro do Disco com Diferentes *Spot Sizes* e espessuras, com o Laser em Movimento no Ar.

7.3.1. Disco com 1/4 de polegada de espessura:

No cenário com laser em movimento no ar, o disco de 6,35 mm apresentou elevação rápida da temperatura acima de 2000 K, mas por tempo limitado. Isso sugere que o piercing inicial seria possível, mas a sustentação térmica não seria suficiente para completar o corte em toda a espessura.

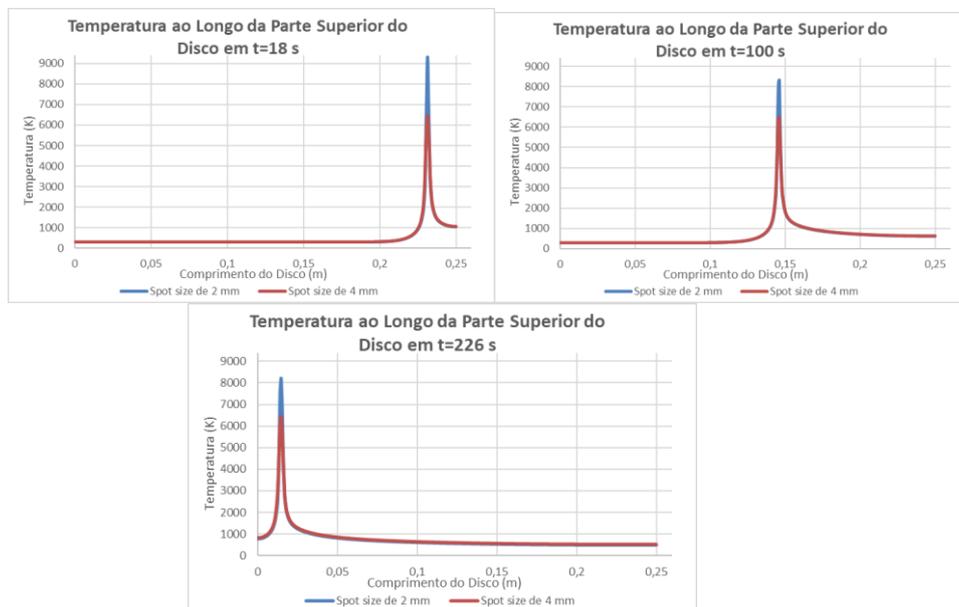


Figura 7.3.1-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 6,35 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar.

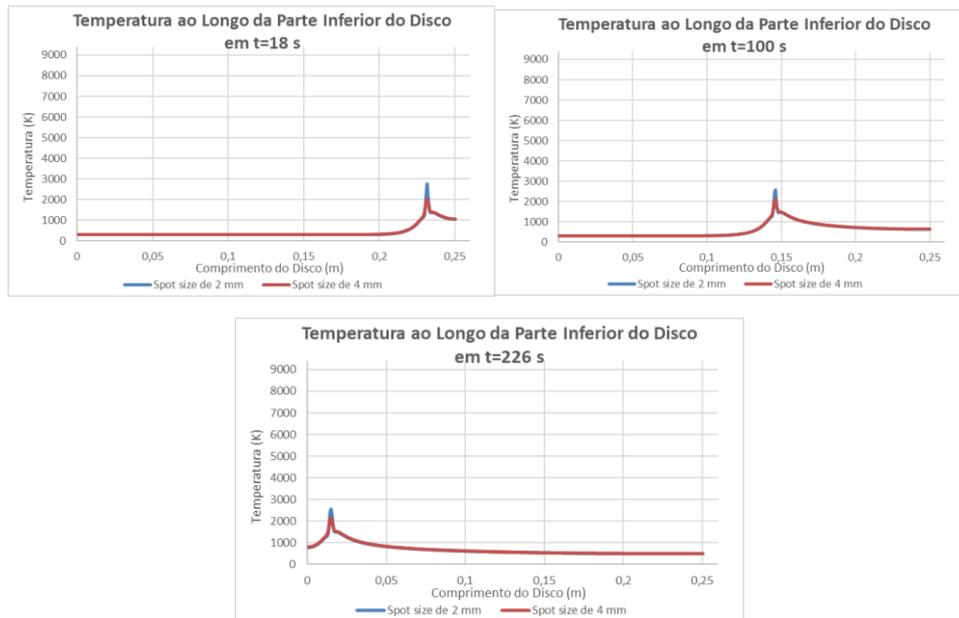


Figura 7.3.1-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 6,35 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar.

7.3.2. Disco com meia polegada de espessura:

Com espessura intermediária (12,7 mm), os dados indicam que, embora haja elevação da temperatura na superfície frontal, a penetração térmica é significativamente reduzida, especialmente com o spot de 4 mm. O tempo acima de 2000 K foi insuficiente para formar um *keyhole* contínuo.

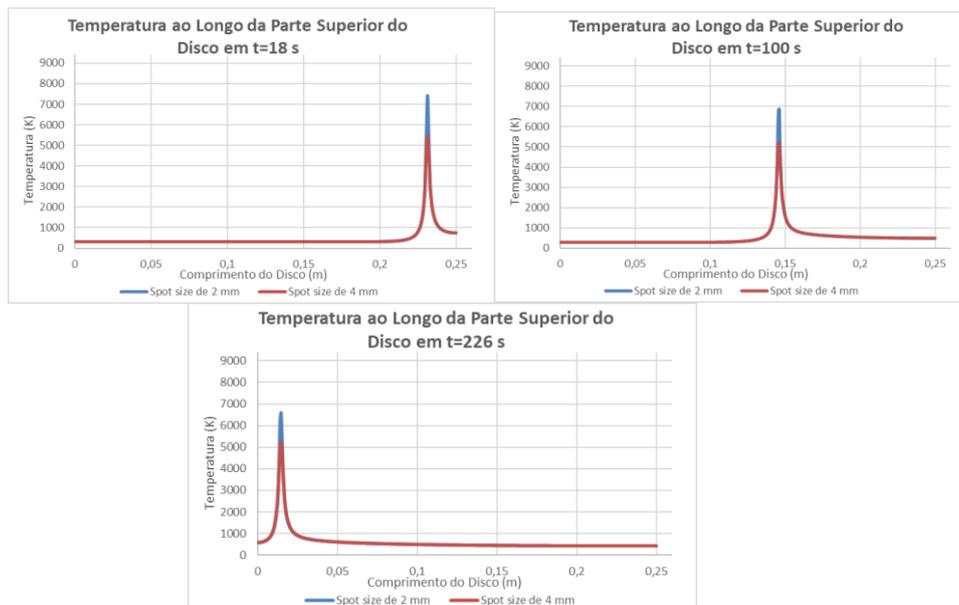


Figura 7.3.2-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 12,7 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar.

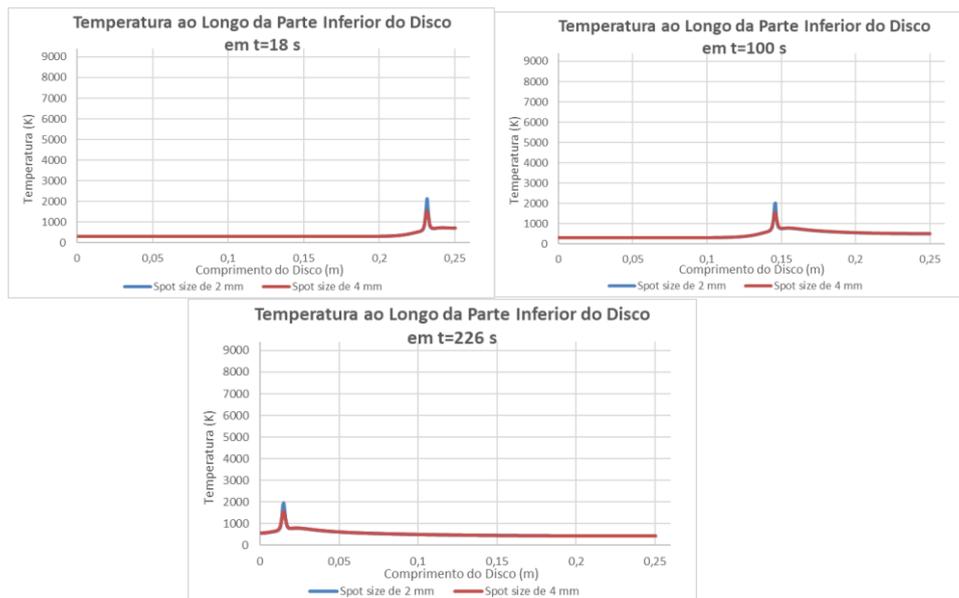


Figura 7.3.2-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 12,7 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar.

7.3.3. Disco com uma polegada de espessura:

Para o disco de 25,4 mm, a simulação com feixe móvel no ar revelou grande limitação térmica. A curta permanência de temperatura elevada inviabiliza o corte completo, demonstrando que a combinação atual de *spot size*, potência e velocidade não é suficiente para chapas espessas nesse regime.

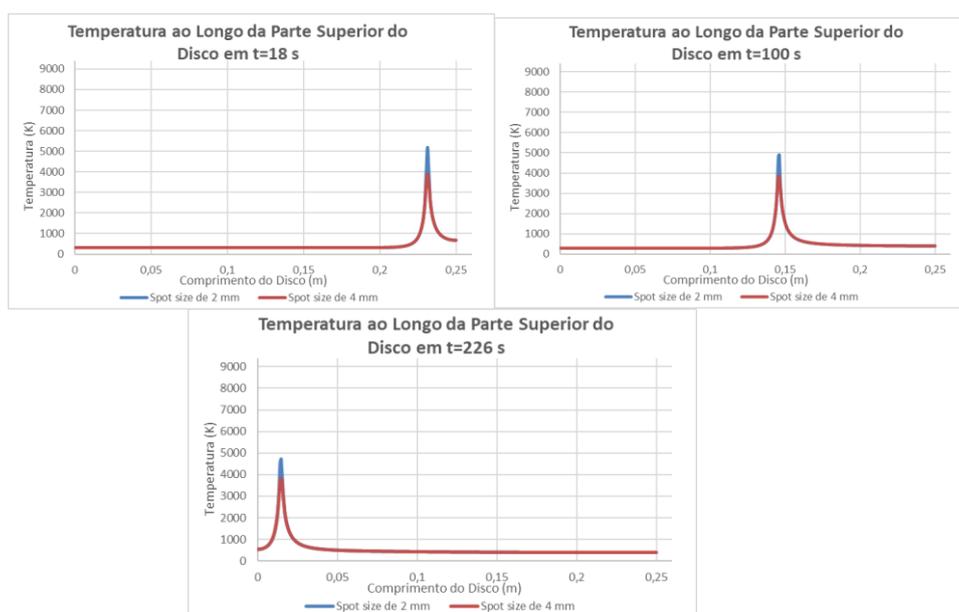


Figura 7.3.3-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 25,4 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar.

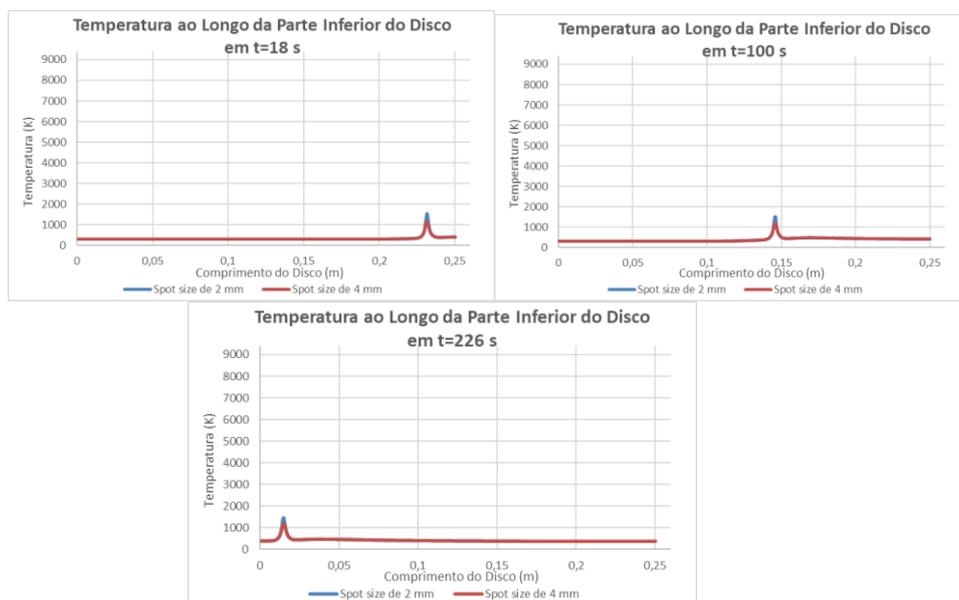


Figura 7.3.3-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 25,4 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Ar.

Segundo a *The Welding Institute* (TWI), o processo de *piercing* — etapa inicial da perfuração em chapas metálicas — em materiais de até cerca de 13 mm de espessura leva aproximadamente 5 a 15 segundos, utilizando lasers de alta potência. Esses valores são amplamente utilizados como referência industrial para indicar o tempo mínimo necessário para gerar uma cavidade fundida (*keyhole*) suficientemente estável que permita o avanço contínuo do corte.

Nas simulações realizadas neste trabalho, observou-se que, mesmo na condição mais favorável (espessura de 6,35 mm com *spot size* de 2 mm), o tempo durante o qual a temperatura no centro do disco permaneceu acima de 2000 K foi em torno de 6 segundos (como pode ser observado na figura 8.3-2). Esse resultado se encontra no limite inferior do intervalo associado ao *piercing*, mas significativamente abaixo do necessário para viabilizar o corte completo em chapas de 6 mm, que também demanda manutenção contínua da cavidade fundida por dezenas de segundos, conforme demonstrado por estudos de Ion (2005) [6] e Steen & Mazumder (2010) [12].

A temperatura de 2000 K foi adotada como critério térmico de referência por estar acima do ponto de fusão do aço AISI 4340, que varia entre 1698 e 1733 K

[10]. Valores acima desse patamar não apenas garantem a fusão do material, mas também representam uma zona de segurança térmica onde ocorrem fenômenos de vaporização parcial e ablação, que são essenciais para a formação e propagação do keyhole, como discutido por Ion (2005) [6] e Oliveira & Araújo (2016) [3].

Conclusão fundamentada: Embora o tempo térmico observado seja suficiente para iniciar a perfuração local (*piercing*), não houve sustentação térmica duradoura capaz de permitir um corte integral em nenhuma das configurações simuladas, considerando que a formação da cavidade fundida não foi mantida por tempo suficiente para atravessar completamente a espessura. Essas evidências reforçam a necessidade de ajustes nos parâmetros operacionais — como redução da velocidade de varredura, aumento da potência do feixe ou maior concentração de energia — para viabilizar o processo de corte em condições reais de aplicação.

7.4. Laser variando linearmente ao longo do disco na água a máxima potência (1800W)

Conforme mostrado nas figuras a seguir, o tempo em que a temperatura se mantém acima de 2000 K é da ordem de 6 segundos em todas as configurações de *spot sizes* e espessuras.





Figura 7.4-1 - Temperatura no Centro do Disco com Diferentes *Spot Sizes* e espessuras, com o Laser em Movimento no Ar.

7.4.1. Disco com ¼ de polegada de espessura:

No meio aquoso, com o laser em movimento, o disco de 6,35 mm apresentou elevação térmica na superfície, mas com dissipação intensa pela água. A permanência da temperatura acima de 2000 K foi ainda menor do que no ar, indicando que o corte é inviável sob essas condições sem otimizações.

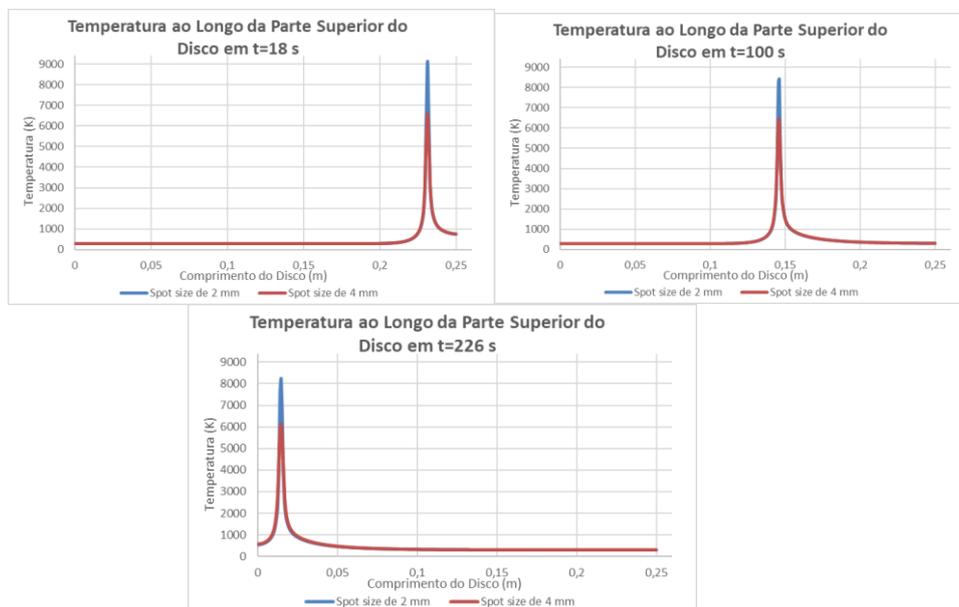


Figura 7.4.1-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 6,35 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água.

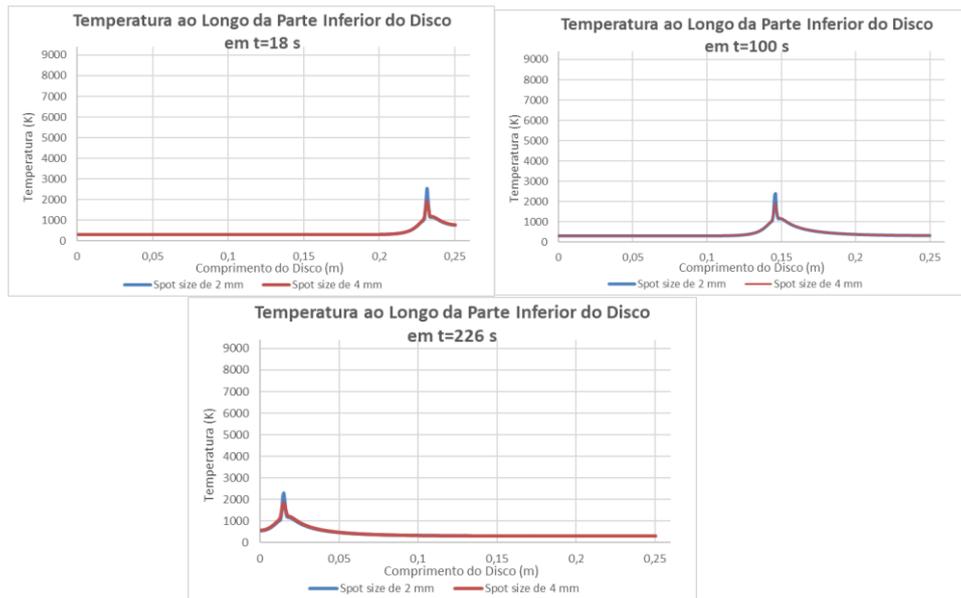


Figura 7.4.1-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 6,35 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água.

7.4.2. Disco com meia polegada de espessura:

Para 12,7 mm em água, mesmo o *spot size* de 2 mm não proporcionou tempo suficiente de aquecimento acima da temperatura de fusão. A dissipação térmica dominante impediu a formação de um canal de perfuração contínuo, limitando severamente o avanço do feixe.

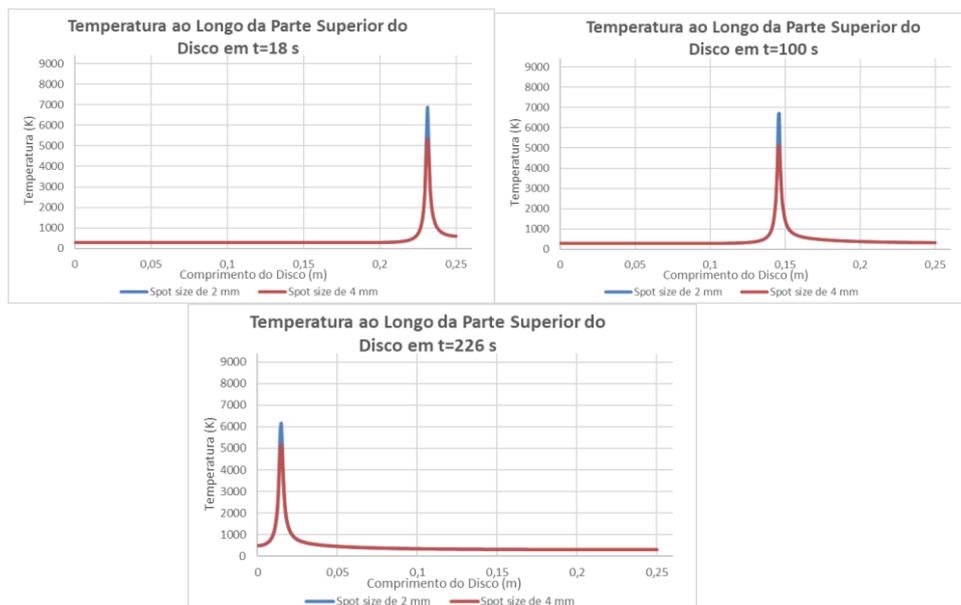


Figura 7.4.2-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 12,7 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água.

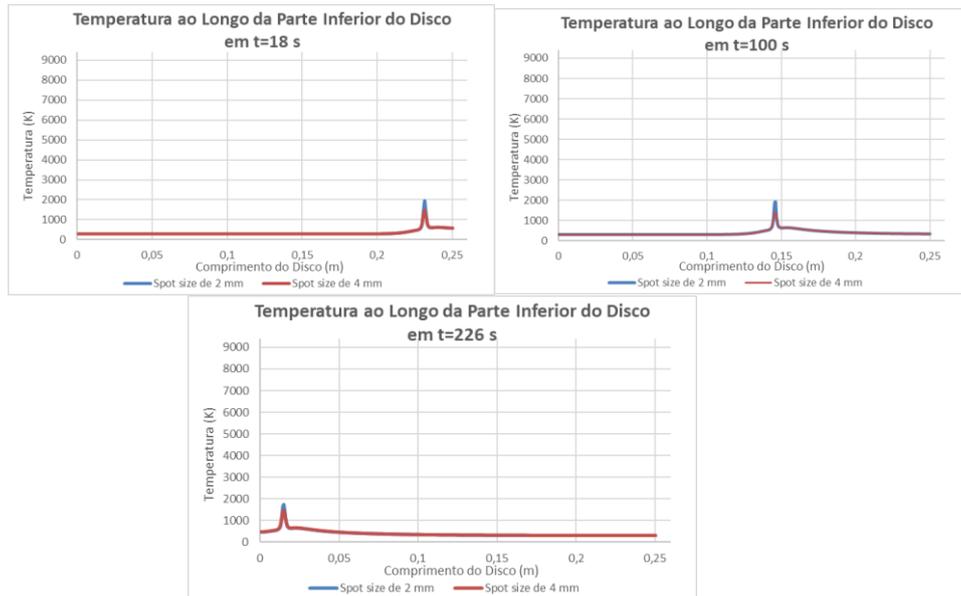


Figura 7.4.2-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 12,7 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água.

7.4.3. Disco com uma polegada de espessura:

Com 25,4 mm de espessura, o resfriamento pelo meio líquido impediu qualquer possibilidade prática de corte térmico. As temperaturas se mantiveram muito abaixo do necessário, mesmo com spot concentrado e máxima potência. Ajustes mais drásticos seriam exigidos nesse cenário.

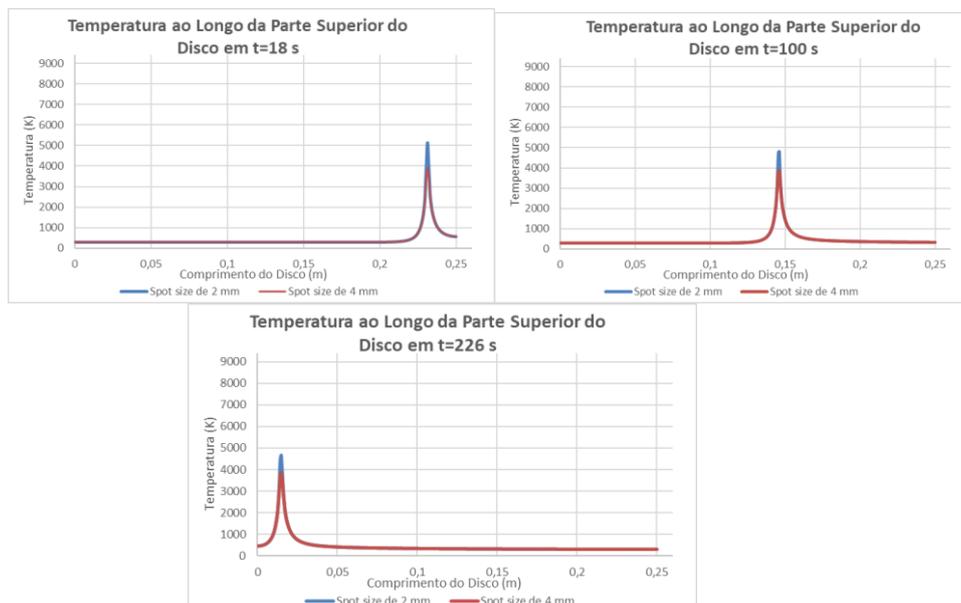


Figura 7.4.3-1 - Temperatura ao Longo da Parte Superior do Disco, Disco de 25,4 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água.

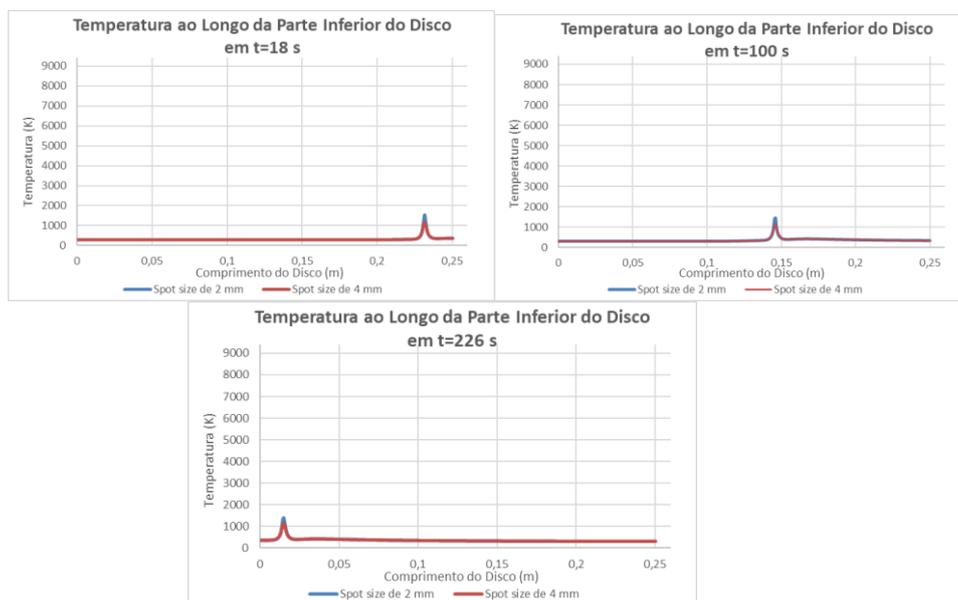


Figura 7.4.3-2 - Temperatura ao Longo da Parte Inferior do Disco, Disco de 25,4 mm de Espessura com o Laser em Movimento no Água.

Os resultados obtidos nas simulações com o laser em movimento no meio aquoso indicam que, mesmo com elevada potência (1800 W) e *spot sizes* de 2 mm e 4 mm, a dissipação térmica promovida pela água impôs uma limitação significativa à elevação sustentada da temperatura nas regiões críticas da chapa. Embora tenham sido observados picos térmicos superiores ao ponto de fusão do aço na superfície frontal do disco, a duração com que essas temperaturas se mantiveram acima de 2000 K foi inferior ao necessário para garantir a formação e manutenção de uma cavidade fundida estável, indispensável para o corte contínuo. A alta taxa de resfriamento convectivo da água impediu o acúmulo de calor ao longo do tempo, comprometendo a viabilidade de perfuração térmica integral nesse cenário. Dessa forma, conclui-se que, sob as condições simuladas, o processo de corte a laser com feixe em movimento no meio aquoso não se mostrou eficaz, sendo necessário otimizar parâmetros como velocidade de varredura, geometria do feixe ou potência aplicada para compensar as perdas térmicas intensas associadas ao ambiente submerso.

8. Conclusão

Este trabalho investigou, por meio de simulações numéricas realizadas no *COMSOL Multiphysics*, a viabilidade do uso de um feixe de laser de 1800 W como alternativa para o corte térmico de chapas metálicas na indústria de petróleo e gás. As simulações consideraram três espessuras de material (6,35 mm, 12,7 mm e 25,4 mm), dois valores de *spot size* (2 mm e 4 mm), e dois meios distintos de atuação (ar e água), contemplando tanto o regime com feixe estacionário quanto o com movimento linear.

Ao comparar os dois regimes operacionais, observou-se que o feixe estacionário apresenta desempenho térmico superior, principalmente pela exposição contínua de 900 segundos, que favorece o acúmulo de calor e a fusão localizada. Já no regime com laser em movimento, o tempo de atuação em cada ponto da superfície é significativamente menor, o que dificulta a manutenção de temperaturas elevadas por tempo suficiente para viabilizar a perfuração completa, sobretudo em espessuras maiores.

Em termos de desempenho térmico, conclui-se que para chapas com $\frac{1}{4}$ de polegada de espessura (6,35 mm), a perfuração completa é tecnicamente viável tanto no ar quanto na água, especialmente quando utilizado o *spot size* de 2 mm, que gera maior densidade de potência. Para espessuras intermediárias, como 12,7 mm, os resultados indicam que apenas o feixe estacionário com menor *spot size* foi capaz de promover temperaturas próximas ao ponto de fusão na base do disco. Já para espessuras de 25,4 mm, nenhuma configuração permitiu a perfuração completa, sendo o regime estacionário ainda o que mais se aproximou desse objetivo.

A escolha dos parâmetros simulados foi guiada por limitações do sistema óptico real, em especial o diâmetro mínimo do *spot size*, restrito a lente instalada no sistema óptico utilizado. As espessuras testadas refletem aplicações industriais comuns, enquanto os meios ar e água foram escolhidos para representar condições com diferentes intensidades de dissipação térmica. Destaca-se que a hipótese de remoção progressiva de material fundido ao longo da exposição contínua foi essencial para justificar o possível furo e corte, mesmo nos casos em que a face inferior não atingiu o ponto de fusão. Tal mecanismo, observado nos perfis de

temperatura simulados, representa uma condição fisicamente plausível e deve ser incorporado de forma mais detalhada em estudos futuros.

Como trabalho futuro, recomenda-se realizar testes experimentais com o mesmo sistema laser e geometrias semelhantes às simuladas, a fim de comparar os resultados e validar os modelos numéricos desenvolvidos. Essa etapa é fundamental para garantir que as simulações reflitam com precisão o comportamento térmico real, permitindo ajustes nos parâmetros de entrada e maior confiabilidade nas conclusões obtidas. Além disso, é sugerido investigar ajustes nos regimes operacionais — como a redução da velocidade de varredura ou o uso de pulsos sobrepostos — para aumentar a permanência térmica nas regiões críticas, ampliando assim a eficácia do processo de corte ou perfuração a laser em ambientes industriais complexos.

Referências bibliográficas

- [1]. PARRA, D. P.; GRECO DE SOUSA, B.; DE FARIA, G. V.; GOUVEA, P. M.; MOURA, L. F.; TEMPORÃO, G. P.; GONCALVES, R. T.; SOLA, ~ A. B.; MEDEIROS, K. A.; PANTA, P. E. ; OTHERS. **Simulations and experimental results for a high-power laser tool to dissociate hydrate on oil and gas production equipment in deep water**. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, p. D041S047R004. OTC, 2023.
- [2]. INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [3]. OLIVEIRA, L. A. de; ARAÚJO, R. T. **Análise Térmica de Processos de Corte a Laser em Chapas Metálicas**. Revista Matéria, v. 21, n. 1, p. 56–68, 2016.
- [4]. ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015.
- [5]. LASER LAB SOURCE. **Fiber Laser Basics and Design Principles**. Laser Lab Source, 2023. Disponível em: <https://www.laserlabsource.com/Solid->

- State-Lasers/fiber-laser-basics-and-design-principles. Acesso em: 10 maio 2025.
- [6]. ION, John C. **Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [7]. SOUSA, Bruno Greco de. **Simulations and Experimental Results for a High-Power Laser Tool to Dissociate Hydrate on Oil and Gas Production Equipment in Deep Water**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2024.
- [8]. TRUMPF. **Technical Guide: Laser Cutting Parameters for Sheet Metal Processing**. Ditzingen: TRUMPF GmbH + Co. KG, 2023. Disponível em: <https://www.trumpf.com>. Acesso em: 31 maio 2025.
- [9]. IPG PHOTONICS. **Application Note – Laser Cutting Guidelines for Fiber Lasers**. Oxford, MA: IPG Photonics Corporation, 2022. Disponível em: <https://www.ipgphotonics.com>. Acesso em: 31 maio 2025.
- [10]. YIJIN METAL. **4340 Steel: Composition, Properties and Applications**. 2024. Disponível em: <https://pt.yijinmetal.com/steel/alloy-structural-steel/4340-steel.html>. Acesso em: 31 maio 2025.
- [11]. SILFEN, H. **História do Laser: Do Conceito Teórico à Realidade**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
- [12]. STEEN, William M.; MAZUMDER, Jyotirmoy. **Laser Material Processing**. 4th ed. London: Springer, 2010.
- [13]. ABRASERVICE. **Corte das chapas antidesgaste Hardox**. Disponível em: <https://www.abraservice.com/-/media/files/pt/hardox/corte-das-chappas-antidesgaste-hardox--1069tv22023.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- [14]. AÇOS NOBRE. **Corte a plasma: vantagens, desvantagens e aplicações**. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/corte-a-plasma/>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- [15]. HUAYI GROUP. **Ultimate guide to waterjet cutting techniques**. Disponível em: <https://www.huayi-group.com/pt/news/ultimate-guide-to-waterjet-cutting-techniques/>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- [16]. JQ LASER. **What is the maximum thickness for metal sheet that fiber laser cutting machines cut?**. Disponível em:

- <https://www.jqlaser.com/pt/what-is-the-maximum-thickness-for-metal-sheet-that-fiber-laser-cutting-machines-cut/>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- [17]. RAPID DIRECT. **Laser cutting service cost: everything you need to know**. Disponível em: <https://www.rapiddirect.com/pt/blog/laser-cutting-service-cost/>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- [18]. RAPID DIRECT. **What is plasma cutting?**. Disponível em: <https://www.rapiddirect.com/pt/blog/what-is-plasma-cutting/>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- [19]. SERRAMETAL. **O que é oxicorte?**. Disponível em: <https://serrametal.com.br/oxicorte/>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- [20]. BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [21]. HOLMAN, J. P. **Heat Transfer**. 10th ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [22]. THE WELDING INSTITUTE (TWI). **What is Laser Cutting?** Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-laser-cutting>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- [23]. RAPIDDIRECT. **Laser Cutting: Examining Advantages and Disadvantages of Laser Technology**. Disponível em: <https://www.rapiddirect.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-laser-cutting>. Acesso em: 10 jun. 2025.