



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Internalização superficial de contaminantes após ablação laser nanossegundo**

**WAGNER STIPP DE SOUZA**

**Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Materiais**

**Orientador:  
Prof. Dr. Marcus Paulo Raele**

**São Paulo  
2023**



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Internalização superficial de contaminantes após  
ablação laser nanossegundo**

**Wagner Stipp de Souza**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Orientador: Prof. Dr. Marcus Paulo Ruele**

**SÃO PAULO**

**2023**



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Wagner Stipp de Souza**

**Internalização superficial de contaminantes após  
ablação laser nanossegundo**

Tese apresentada como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de Mestre em  
Ciências na Área de Tecnologia Nuclear –  
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marcus Paulo Raele

**SÃO PAULO**

**2023**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Internalização superficial de contaminantes após ablação laser nanossegundo**

**Versão Corrigida**

**Versão Original disponível no IPEN**

**WAGNER STIPP DE SOUZA**

**Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Materiais**

**Orientador:  
Prof. Dr. Marcus Paulo Raele**

**São Paulo  
2023**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho,  
para fins de estudo e pesquisa, desde que seja citada a fonte

Como citar:

STIPP DE SOUZA, W. ***Internalização superficial de contaminantes após  
ablação laser nanossegundo***. 2023. XX p.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo. Disponível em: (data de  
consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da  
Biblioteca IPEN/USP, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Stipp de Souza, Wagner

Internalização superficial de contaminantes após ablação laser  
nanossegundo / Wagner Stipp de Souza; orientador Marcus Paulo Raele. –  
São Paulo, 2023.

XX p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia  
Nuclear (Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São  
Paulo, 2023.

1. Laser. 2. Nanossegundos. 3. Internalização. 4. Contaminantes I Raele  
Paulo, orient, II. Título

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: Wagner Stipp de Souza

Título: Internalização superficial de contaminantes após ablação laser nanossegundo

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais

Data: \_\_/\_\_/\_\_\_\_

### Banca Examinadora

Prof. Dr.:

\_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr.:

\_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr.:

\_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Simone, meus filhos Ana Luisa e Leonardo Henrique e aos meus pais Luiz Carlos e Leila *in memoriam* e minha madrasta Francis

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, proteção, conquistas e resiliência na elaboração deste trabalho.

A toda minha família e familiares, em especial a minha esposa Simone pelo apoio, incentivo, carinho e paciência em mais uma etapa vencida na vida.

Ao meu orientador, Dr. Marcus Paulo Raele, pela atenção, orientação, paciência, pelo conhecimento compartilhado e pela grande importância na realização desse trabalho.

Ao prof. Dr. Wagner de Rossi pelas valiosas contribuições no desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Dr. Nathanael Wagner Sales Moraes pelo incondicional suporte nos trabalhos realizados nos laboratórios do CCTM e pelo valioso ensinamento dividido.

Ao prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi pela preciosa colaboração e disponibilidade dos laboratórios do CCTM.

A Dra. Jéssica Dipold pelo suporte e disponibilidade do laboratório de corte de materiais e preparação de amostras.

Ao Dr. Marcos Antônio Scapin pelas orientações e suporte no laboratório multiusuário do CLA.

Ao técnico José Vinicius Martins do laboratório da Geociências da USP por disponibilizar o equipamento LA-ICP-MS para caracterização das amostras.

Ao IPEN, pela disponibilidade de toda infraestrutura para o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa.

Ao CLA, por ceder as instalações e pela completa disponibilidade dos laboratórios e equipamentos.

Ao pessoal do CLA, todos sempre solícitos e proativos.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) e especialmente ao câmpus de Itaquaquecetuba por promover e incentivar a pesquisa, desenvolvimento e qualificação dos seus colaboradores.



## RESUMO

O avanço no desenvolvimento da tecnologia a laser possibilitou a aplicação no processo de descontaminação em materiais radioativos. Os resíduos são provenientes de materiais que são aplicados em diversas áreas de atividades como usinas nucleares, procedimentos médicos, experimentos laboratoriais. Porém, nessas situações, esses materiais precisam ser reciclados ou reutilizados. Como uma opção mais tecnológica e segura para esse processo, podemos usar a ablação por pulso laser de nanossegundo para estimular a evaporação do contaminante radioativo presente no material, trazendo alguns benefícios como descontaminar geometrias complexas e promover a segurança do operador. Nesse caso, os estudos mostraram que a descontaminação pode não ser completamente eficiente devido ao fenômeno de internalização do contaminante inerente a alta temperatura da energia aplicada durante a ablação. O objetivo desse trabalho foi confirmar a internalização desses contaminantes com fluências entre 1 – 10 J/cm<sup>2</sup> nas seguintes ligas de aço: inox 304, inox duplex AISI 2205, inox dual-phase Usibor e baixa liga ASTM A36, sendo este último o escolhido para continuidade dos testes laboratoriais por apresentar melhor visualização da faixa de alteração do tamanho de grão bem como a refusão na região da borda. Para a simulação da contaminação, também nesse material, foi aplicado um revestimento com filme de ouro. Para esse experimento, foi utilizado o laser Q-Switched Nd:YAG com duração de pulso de 7 ns e comprimento de onda de 1064 nm. Na identificação da alteração de fase, tamanho de grão e refusão na borda foi utilizado para a caracterização o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e para a identificação da internalização de contaminantes o espectrômetro de massa LA-ICP-MS. Esse estudo confirmou a presença de partículas de ouro internalizados na faixa de refusão do material ASTM A36 após o processo com as fluências determinadas. A finalidade deste trabalho foi contribuir para o desenvolvimento de métodos de tratamento de rejeitos radioativos, no Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares- IPEN.

Palavras-chaves: internalização; contaminantes; laser nanossegundo; materiais metálicos; refusão; microscópio eletrônico de varredura (MEV)

## ABSTRACT

Advances in the development of laser technology enabled its application in the decontamination process of radioactive materials. These wastes come from materials that are applied in different areas of activities such as nuclear power plants, medical procedures and laboratory experiments. This situation, these materials need to be recycled or reused. As a more technological and safer option for this process, we can use nanosecond laser pulse ablation to stimulate the evaporation of the radioactive contaminant present in the material, bringing some benefits such as decontaminating complex geometries and promoting operator safety during the process. However, this present study has shown that decontamination may not be completely efficient due to the phenomenon of internalization of the contaminant inherent to the high temperature of the energy applied during ablation. The aim of this work was to confirm the internalization of these contaminants with fluences ranging from 1 – 10 J/cm<sup>2</sup> in the following steel alloys: 304 stainless steel, AISI 2205 duplex stainless steel, Usibor dual-phase stainless steel and ASTM A36 low alloy, being this chosen for the continuity of laboratory tests due to better visualization of the grain size change range as well as the boundary refused material. To simulate the contamination, also in this material, a gold film coating was applied. For this experiment, a Q-Switched Nd:YAG laser with a pulse duration of 7 ns operating at 1064 nm. In order to identify the phase structural material, grain size and boundary refused, was used the scanning electron microscope (SEM) to measure the contaminant internalization and the ionized coupled plasma mass spectrometry LA-ICP-MS. This study confirmed the presence of internalized gold particles in the boundary refused of the ASTM A36 material after the process with the selected fluences. The purpose of this work is to contribute to the development of radioactive waste treatment methods at the Radioactive Waste Management Service of the Institute for Energy and Nuclear Research - IPEN.

Key words: internalization; contaminants; nanosecond laser; metallic materials; refusion; scanning electron microscope (SEM)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>18</b>
2.1	Principal	18
2.2	Específico	18
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
3.1	A História e Características do <i>Laser</i>	19
3.2	<i>Q-Switched</i> Pulsos Curtos (Nanossegundos)	20
3.3	Focalização, cintura de feixe, fluência e intensidade	21
3.4	Os Processos de Descontaminação de materiais radioativos	23
3.5	Ablação laser em metais e a descontaminação	24
3.6	Aço Inoxidável	27
3.7	Aço de baixo carbono ASTM A36	30
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>36</b>
5.1	Caracterização do feixe laser	36
5.2	Curva de energia do laser	36
5.3	Determinação do diâmetro do feixe (Kapton®)	37
5.4	Determinação da diâmetro de dano em ligas de inox	38
5.5	Metodologia e testes para visualização da camada fundida em ligas inox	39
5.6	Influência da fluência na espessura da camada fundida	51
5.7	Caracterização da internalização do contaminante no aço	54
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As aplicações nucleares e radioativas no Brasil estão presentes nos mais diversos setores, por exemplo: medicina nuclear, geração de energia elétrica, propulsão naval, aplicações industriais (gamagrafia e sensores) e até mesmo sensores de incêndio e para-raios. A população brasileira, colhe direta ou indiretamente os benefícios do domínio das tecnologias relativas às reações nucleares ou aplicações de radioisótopos.

Os radioisótopos ou radionuclídeos são as formas radioativas de um determinado elemento químico e essas substâncias podem trazer vários benefícios ao meio ambiente e à população quando utilizadas de forma controlada e acompanhadas por técnicos especializados. No Brasil, são vários os campos que se beneficiam dos radioisótopos e tais atividades são controladas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Na área médica, por exemplo, os radioisótopos são usados para obter diagnósticos em exames e de acordo com os dados da CNEN. Aproximadamente 2 milhões de exames com a utilização de radioisótopos são realizados por ano no Brasil. Também podemos citar o uso de radiação no tratamento de doenças, especialmente o câncer uma vez que a radioterapia consiste na destruição das células do tumor cancerígeno pelo uso de fontes radiativas (ZIESSMAN; O'MALLEY; THRALL, 2014).

Os radioisótopos na indústria possuem também uma grande utilização na esterilização de materiais odontológicos e médicos, gamagrafia, dispositivos e sensores. Um exemplo são os para-raios radioativos produzidos e importados para uso no Brasil, principalmente na década de 80 (MARUMO, 2006).

Tanto na fase de produção quanto na fase de descarte (pós uso), essas aplicações inevitavelmente geram rejeitos que devem ser propriamente destinados. Os rejeitos radioativos são classificados e geridos pela norma CNEN-NN-8.01 (NORMA, 2014) e abrangem um grande espectro e vão desde combustível nuclear até luvas.

Os processos de manipulação dos materiais radioativos devem ser gerenciados de maneira segura com objetivo de proteger o meio ambiente e seres

humanos. No caso, a gerência de rejeitos radioativos é o conjunto de atividades técnicas e administrativas responsável por todo ciclo, desde a coleta, segregação, transporte, armazenagem e rastreabilidade até o seu ciclo final.

O processo de armazenagem é um item de preocupação, principalmente quando os respectivos locais estão com capacidade limitada.

O contaminante é composto por um ou mais radioisótopos, também conhecidos por radionuclídeos, que são átomos que apresentam núcleos instáveis, ou seja, precisa se rearranjar até encontrar uma configuração estável (processo conhecido como decaimento).

Radioisótopos são núcleos atômicos instáveis que precisam se reconfigurar em busca de sua estabilidade, emitindo assim energia na forma de partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  ou radiação eletromagnética (fótons) radiação  $\gamma$ .

As partículas alfa ( $\alpha$ ) possuem um alcance no ar que não chegam a 10 cm e são interrompidas por roupas, papel e pele. Elas não oferecem perigo ao organismo quando provenientes de uma fonte externa. Como característica, são constituídas por 2 prótons e 2 nêutrons, e ionizantes, pois arrancam elétrons dos átomos e moléculas do meio, transformando-se em átomos de hélio.

Como as partículas beta ( $\beta$ ) são constituídas de elétrons, mais leves e de maior velocidade que as partículas alfas, elas conseguem uma penetração maior na matéria. O risco dessas partículas provenientes de fonte interna ou externa pode ser moderado. A partícula beta é aproximadamente 7.000 vezes mais leve que a partícula alfa e sua velocidade pode alcançar até 95% da velocidade da luz.

Os raios gama ( $\gamma$ ) possuem um poder de penetração muito maior que os demais por não possuir massa ou carga elétrica.

A radiação por conta de seu poder de ionização e deposição de energia, pode ser altamente prejudicial à saúde e ao meio ambiente. Sua coleta, tratamento e destinação requer operações de alta complexidade e custos.

O recente relatório da IAEA cita algumas informações importantes quanto ao gerenciamento de rejeitos num cenário mundial, como: mais de 80% de todo o volume de rejeitos sólidos radioativos sendo descartados, em volume total, cerca de 95% dos rejeitos radioativos existentes têm radioatividade de nível muito baixo (VLLW) ou de baixo nível (LLW), enquanto cerca de 4% são rejeitos de nível

intermediário (ILW) e menos de 1% são rejeitos de alto nível (HLW) (IAEA, 2022). Os custos de salvaguarda desses volumes são altos e assim a descontaminação, quando possível, é um processo extremamente atraente.

O processo de descontaminação de materiais contaminados superficialmente também viabiliza reuso/reciclagem do material, sendo comum nas aplicações radioativas e nucleares o emprego de matérias primas nobre e caras, como o cobre, ligas de aço inox, chumbo etc.

O processo de descontaminação pode ser realizado de várias maneiras: ataque químico, ataque abrasivo, transferência, ou jato d'água. Nesse caso, o ataque químico é um dos métodos mais utilizados e disponíveis para a descontaminação de superfície impregnada por material radioativo (SEVERA; BÁR, 1991), onde se promove uma reação química dissolvendo o contaminante. No entanto, a maioria desses processos geram rejeitos radioativos secundários e ou subprodutos cujo tratamento pode até inviabilizar economicamente um processo de descontaminação.

Um dos métodos propostos mais recentes de descontaminação superficial de rejeitos radioativos é a ablação a *laser* (WON et al., 2013), processo ilustrado na figura 1, onde o resultado da interação luz-matéria (STAFE; MARCU; PUSCAS, 2013) é a ejeção e vaporização de material superficial resultante do depósito de uma quantidade expressiva de energia entregue por um feixe *laser* que em geral deve ser operado em regime pulsado. Há vantagens no uso do *laser* para descontaminação (TAM; PARK; GRIGOROPOULOS, 1998), porque o *laser* conta com fótons como insumo, ou seja, utiliza de luz para descontaminar.

No processo de ablação, a energia *laser* absorvida aquece primeiramente a superfície alvo até ao ponto de fusão e depois à temperatura de vaporização (CHICHKOV et al., 1996), sendo a energia entregue para que ocorra esse fenômeno o limiar de ablação do material e com os parâmetros do pulso *laser* acima do limiar de ablação, ocorre a retirada de algumas centenas de nanômetros em profundidade da superfície em tratamento através de um único pulso sendo, em muitos casos, o suficiente para a retirada do material contaminado e do material radioativo fixado na superfície ou no óxido superficial.

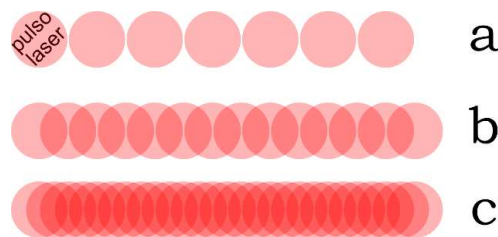
**Figura 1:** Processo de ablação em diferentes fases.



Fonte: Autor

Em se tratando de processamento *laser*, uma das formas mais tradicionais de processar uma superfície é transladando o material ou o feixe, resultando ou não na sobreposição de pulsos, de acordo com a taxa de repetição e a velocidade de translação, conforme figura 2.

**Figura 2:** Diferentes configurações de processamento, promovendo desde nenhuma sobreposição (a), aproximadamente 50% de sobreposição (b) e aproximadamente 75% de sobreposição (c).



Fonte: Autor

Em resumo, ao descontaminar um material, o *laser* não gera resíduo além do material sob processo, pois não são utilizados insumos adicionais (materiais abrasivos, por exemplo) além de luz. Ao final do processo, apenas gases e algum material particulado são ejetados, que podem ser fixados e aspirados em filtros adequados, fazendo com que uma grande quantidade de material possa ser descontaminado gerando quantidades ínfimas de rejeitos que, ao fim do processo, podem ser compactados e armazenados em espaços reduzidos. Um fator importante que pode ser considerado nesse processamento é o tempo de descontaminação, bem menor que em outras modalidades disponíveis.

Historicamente foi no Brasil, mais precisamente no IPEN, o primeiro registro na aplicação do *laser* para descontaminação em uma parceria do Centro de Lasers e Aplicações (CLA) e da Gerência de Rejeitos Radioativos (GRR) (da instalação), com resultados positivos e eficientes em partes contaminadas de para-raios

radioativos. Essa ação consistiu na remoção da tinta que continha o contaminante apenas com a aplicação de laser e 98% do material contaminante foi removido (POTIENS JR et al., 2014). Na figura 3 podemos verificar a área de armazenamento dos rejeitos no GRR do IPEN.

**Figura 3:** Área de tratamento e armazenamento dos rejeitos radioativos no GRR do IPEN.



Fonte: Autor

Num outro estudo piloto realizado junto ao Centro do Reator de Pesquisas (CRPq) do IPEN, a aplicação da ablação *laser* nos dutos retirados do reator IEA-R1 foi realizada utilizando pedaços da tubulação (COELHO et al.). Os fatores de descontaminação foram em média de 85% (medidos por meio do decaimento beta da  $^{110m}\text{Ag}$ ) para os dutos do reator, em uma única aplicação. Porém, nas amostras de chumbo não obtiveram um grau de descontaminação satisfatório, ficando por volta de 60% de retirada de contaminantes em relação a atividade inicial.

A descontaminação de chumbo é de interesse da comunidade, pois o Pb é utilizado em blindagens de radiação (gama principalmente). No decorrer do uso dessas blindagens, ocorrem contaminações, seja por acidentes ou mesmo pelo uso rotineiro, como podemos verificar na figura 4.



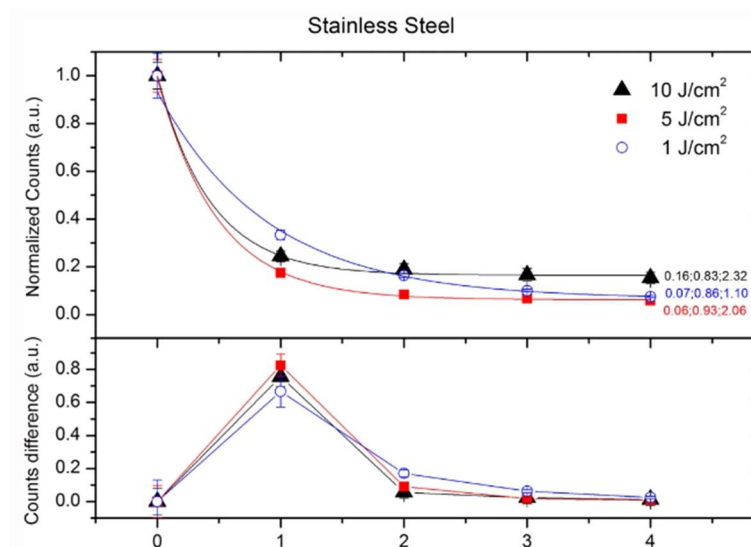
**Figura 4:** Blindagens Inutilizadas de chumbo devido contaminação no setor de radioquímica/radiofarmácia do IPEN.



Fonte: Autor

Em um estudo recentemente realizado pelo grupo de pesquisa no IPEN (COSTA; VICENTE; RAELE, 2021) mostrou que intensidades de *laser* mais altas, dependendo do metal selecionado, poderiam levar a uma descontaminação não satisfatória e que foi observado uma contaminação residual resiliente que não diminuiu após sucessivas irradiações a *laser*, conforme podemos observar na figura 5. Para esse estudo, foi utilizada uma fluência de 10 J/cm<sup>2</sup>.

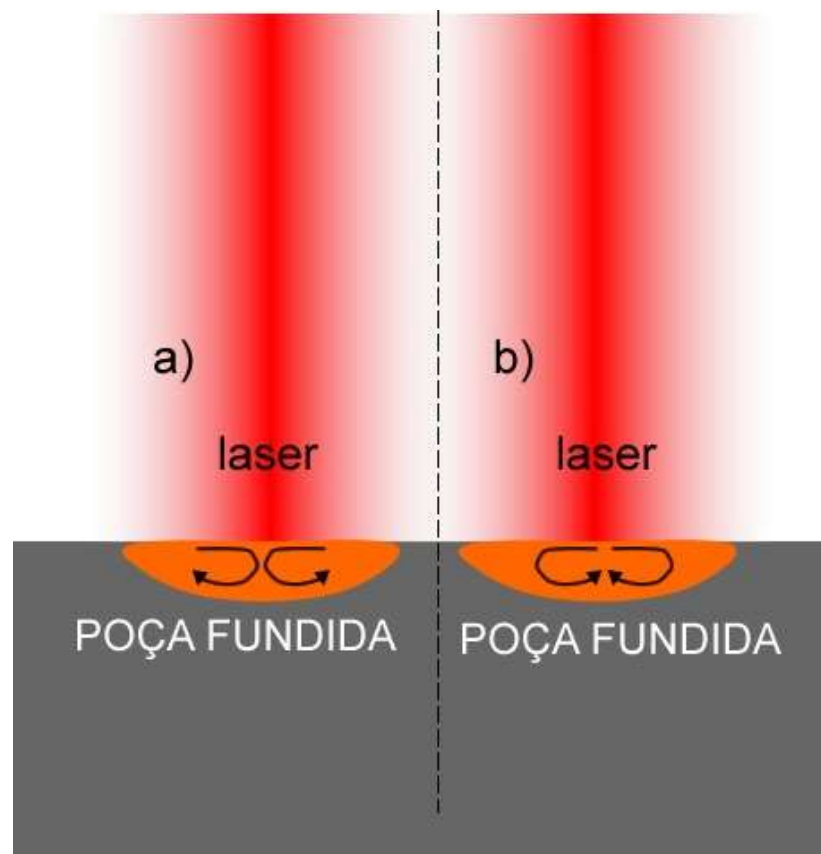
**Figura 5:** Estudo demonstrado que para fluência de 10J/cm<sup>2</sup> a descontaminação atinge um limite após duas irradiações. As irradiações subsequentes não foram capazes de remover o contaminante.



Fonte: COSTA,2021

Conforme esses resultados preliminares obtidos na aplicação de *laser* para descontaminação, existem indícios de alguns casos que o contaminante possa ter sido internalizado após a irradiação *laser*. Levando então o contaminante da superfície para o interior da amostra, agravando o problema de contaminação. Isso pode ter sido causado por efeitos convectivos como o de Rayleigh-Bernard-Marangoni (YILBAS; SHUJA, 2013), exemplificado na figura 6, onde não só o gradiente de densidade promove a circulação de um material líquido, mas também seu gradiente de tensão superficial. Esse efeito pode ainda ser agravado pela baixa temperatura de fusão do material em questão e também efeitos decorrentes de diferentes densidades em razão de diferentes temperaturas.

**Figura 6:** Suspeita do efeito Rayleigh-Bernard-Marangoni, com o surgimento de correntes convectivas decorrente do gradiente térmico.



Fonte: Autor

Assim, vislumbra-se a necessidade de compreender e verificar a existência do fenômeno de internalização de contaminantes primordialmente superficiais em decorrência de efeitos convectivos da ablação *laser* em metais para que, em caso positivos, novos protocolos e cuidados possam ser estudados a fim de minimizar os processos convectivos e maximizar a descontaminação.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Principal

O objetivo desse trabalho é a verificação da internalização de contaminantes em decorrência dos efeitos convectivos gerados pela ablação *laser* de nanossegundos em materiais metálicos.

### 2.2 Específico

Para os objetivos específicos, devemos avaliar os principais resultados através das ações abaixo:

- Caracterização do feixe *laser*;
- Determinação das condições de irradiação;
- Determinação das amostras;
- Determinação da região de refusão;
- Desenvolvimento de metodologia e quantificação de internalização de contaminante;

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 A História e Características do *Laser*

Desenvolvido em 1960 por Maiman, o primeiro equipamento *laser*, era constituído de um cristal de Rubi como meio *laser* ativo, bombeado opticamente por uma lâmpada de xenônio de forma pulsada (BLOEMBERGEN, 1999). Com o passar do tempo, os equipamentos *laser* evoluíram tecnologicamente proporcionando, atualmente, uma grande variedade de comprimentos de onda, regimes de operação, potências etc., que proporcionaram sua utilização em inúmeras áreas da ciência.

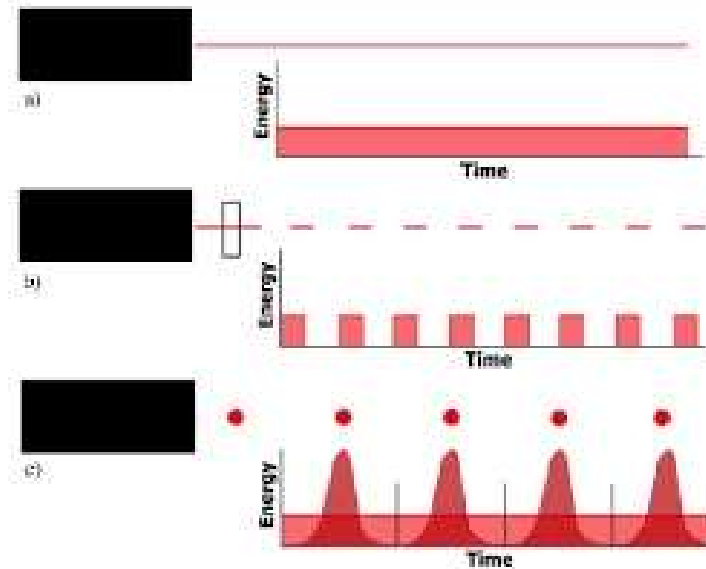
Para que tenhamos a emissão de um feixe *laser*, são necessárias algumas condições básicas, como: um meio ativo; que este meio tenha inversão de população; e que exista uma retroalimentação óptica resultando em uma oscilação *laser*.

Entre as características do feixe *laser* estão: 1) A monocromaticidade: é caracterizada pela emissão de fótons com o mesmo comprimento de onda, fótons de mesma energia; 2) A coerência: é a medida da correlação entre as fases medidas em diferentes pontos de uma onda, isto é, as ondas caminham de forma similar no espaço e no tempo e 3) A baixa divergência ou colimação: a luz emergente do *laser* pode variar de metros a quilômetros.

Podemos ainda caracterizar os *lasers* quanto ao seu regime temporal de operação, que pode ser dividido em emissão contínua que têm potência de saída constante durante todo período de tempo e emissão pulsada que apresentam potência de saída oscilante, que pode variar entre um valor máximo e zero durante determinado período de tempo (HITZ; EWING; HECHT, 2012).

Para os regimes de operação para a emissão do *laser*, podemos referenciar três tipos, como o contínuo, pulsado e chaveado (Q-Switched). Para um *laser* pulsado, podemos usar um chaveador, que impedirá a ação do *laser* até que o meio de ganho acumule bastante energia e depois ele a libere para o seu funcionamento. Sendo este último, largamente utilizado em processos de gravação e limpeza *laser*. Os tipos de emissão podemos verificar na figura 7.

**Figura 7:** Desenho esquemático dos tipos de emissão laser (a) contínuo, (b) pulsado e (c) chaveado.



Fonte: Autor

### 3.2 Q-Switched Pulsos Curtos (Nanossegundos)

O nome *Q-Switched* trata-se de um método que está relacionado ao mecanismo usado para controlar a “saída” de luz, uma vez que concentra toda a energia em intensos pulsos, através do chaveamento de emissão desses pulsos.

O conceito de operação resulta em deixar o bombeamento efetuar-se para além do limiar de funcionamento, e permitir a emissão *laser* somente quando o bombeamento tiver prosseguido até um número suficiente. A chave Q é um dispositivo para melhorar a qualidade da emissão gerada dentro da cavidade ressonante do *laser*. Assim, é produzido um pulso de energia maior que no caso do funcionamento do *laser* de onda contínua (CW) e na sequência encerra-se a emissão. Também resultam pulsos de curta duração, na ordem do nanossegundo a até algumas dezenas de nanossegundos, com consideráveis potências de picos.

O *Q-Switched* do *laser* não permite que o fóton iniciante, que poderia excitar o decaimento, chegue até o espelho, amplificando e estimulando a população estimulada, assim decaindo-a. Os *lasers* pulsados permitem que mesmo com uma

potência média baixa, obtenha-se elevada intensidade de pico, pois a energia é entregue num curto intervalo de tempo. Dessa maneira, significa que o *Q-Switched* permite um acúmulo maior de átomos no estado excitado, com o objetivo de decair uma população muito maior, gerando uma energia maior. Por isso, esse processo transforma quase toda energia acumulada nos átomos bombeados para o nível superior em fótons que agora circulam no ressonador.

Conforme mencionado acima, a largura do pulso dada pelo *Q-Switched* depende do tempo decorrido durante a abertura da chave e do tempo que toda a população demora para decair.

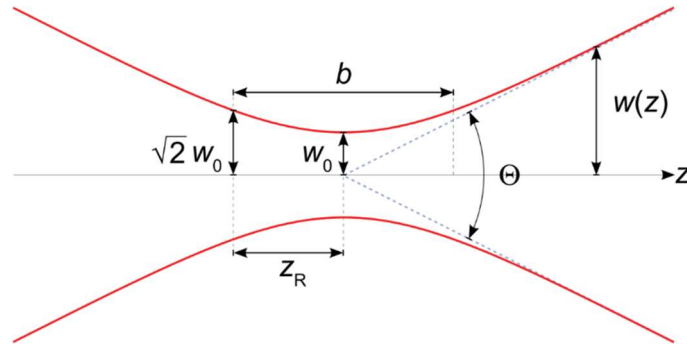
### **3.3 Focalização, cintura de feixe, fluência e intensidade**

Na óptica, um feixe gaussiano é um feixe de radiação eletromagnética monocromática cujos perfis de amplitude do campo magnético e elétrico transversais são dados pela função gaussiana (FOWLES, 1989), isso também implica um perfil de intensidade Gaussiana (irradiância).

O modo transversal gaussiano (TM<sub>00</sub> ou  $M^2=1$ ) descreve o resultado pretendido na maioria dos *lasers*, nesta configuração a área focal é a menor possível segundo a teoria da óptica clássica.

O perfil de intensidade campo elétrico (e magnético) de amplitude ao longo de qualquer feixe Gaussiano (para um determinado comprimento de onda e polarização) é determinado por um único parâmetro: o chamado cintura  $w_0$ , conforme podemos verificar na figura 8.

**Figura 8:** Largura do feixe Gaussiano  $w(z)$  em função da distância  $z$  ao longo do feixe  $W$ : cintura do feixe,  $b$ : profundidade de foco,  $z$ : comprimento de Rayleigh,  $\Theta$ : propagação angular total.



Fonte: SAMAD et al.,2012

$$d_{min} = 2\omega_0 = \frac{4 \cdot M^2 \cdot \lambda}{\pi} \cdot \left(\frac{f}{d}\right) \quad (1)$$

Onde  $f/d$  é a abertura numérica, e  $M^2$  é a qualidade de feixe (o quanto o perfil de intensidade se aproxima de um perfil gaussiano).

É então definida como fluência a energia do pulso *laser* pela área (Equação 2) e intensidade a fluência pela duração de pulso (equação 3):

$$F = \frac{E_{Pulso}}{A_{Focal}} \quad (2)$$

$$I = \frac{F}{\tau_{pulso}} \quad (3)$$

Sendo que frequentemente a fluência é dada em  $J/cm^2$  e a intensidade em  $W/cm^2$ .

Experimentalmente pode-se medir o diâmetro do feixe através de câmeras\CCD (*beam profilers*), pelo chamado método da faca (*knife edge*) (KHOSROFIAN; GARETZ, 1983) ou através de filmes ou materiais especiais como por exemplo o filme de Kapton.



### 3.4 Os Processos de Descontaminação de materiais radioativos

Nas áreas ou aplicações em que os materiais radioativos são utilizados, em um determinado momento dependendo da meia vida do material, haverá a necessidade de realizar o seu descarte. Esse processo deve ser gerenciado de forma que proteja a saúde humana de forma segura e minimize o impacto no meio ambiente. Isso significa isolar, de maneira que a concentração de qualquer radionuclídeo devolvido ao meio ambiente seja inofensiva. E também todos os rejeitos gerados através da energia nuclear são regulamentados de maneira que nenhum deles devam causar poluição (HIROMOTO et al., 1999).

Os rejeitos dos materiais radioativos são oriundos de diversas áreas como em medicina, agricultura, pesquisa e, portanto, essas atividades não são exclusividade do ciclo de combustível nuclear.

Para a escolha do tipo correto da atividade a ser executada, devemos levar em consideração e realizar um estudo preliminar das informações abaixo:

- O tipo de superfície a ser descontaminada;
- O tipo de material a ser descontaminado;
- Determinar a fluência e tempo de processo;
- Identificar o contaminante que está nesse material;
- Avaliar método de aspiração e captura do contaminante ejetado no processo de ablação;
- A segurança dos usuários;
- Possibilidade de impactos ambientais;
- O custo-benefício para o processo de descontaminação;
- Os volumes de rejeitos secundários gerados.

Porém, atualmente, as técnicas disponíveis e praticadas no mercado para o processo de descontaminação em materiais contaminados, são:

- Remoção química - dissolução que podem ser usados reagentes não corrosivos, como detergentes, ácidos diluídos ou produtos químicos;

- Processos com abrasivos mecânicos - como escovação, jateamento de areia ou abrasivo e jato de água a alta pressão.

Para assegurar a proteção de todos os profissionais e a segurança de toda a área, é devido um processo completo de descontaminação que consiste em segregação de material contaminado conforme sua natureza e forma física, a separação de isótopos contaminantes do material e rejeitos devidamente embalados e armazenados em local seguro até sua deposição para a CNEN (NORMA, 1985).

No caso do processo em descontaminação a *laser*, é importante que o elemento filtrante que esteve acoplado ao equipamento, seja segregado e descartado de maneira correta, uma vez que fazem parte da classe 7 (radioativos perigosos) e não pode ser armazenado em qualquer lugar em nenhuma hipótese.

Os rejeitos radioativos, dependendo das suas características físicas, necessitam ser segregados (estados sólido, líquido ou gasoso) e acondicionados em recipientes adequados, como por exemplo em tambores de metal.

É importante ter a informação que a radiação causa vários efeitos biológicos às pessoas em contato com ela, tornando-se mais severo dependendo da dose de exposição e para evitar todos os efeitos da radiação ionizante no ambiente de trabalho, é necessário um serviço e plano de radioproteção bem preparados e eficientes.

### **3.5 Ablação laser em metais e a descontaminação**

A descontaminação de superfícies pelo *laser* se dá pelo processo conhecido como ablação. Ablação é um termo utilizado para denominar a retirada de material de objeto ou corpo. Assim a ablação a *laser* pode ser entendida como retirada de material através da irradiação *laser*.

No processamento de materiais, o *laser* possui uma característica importante que é de fornecer altos valores de energia em uma reduzida área focalizada sobre uma determinada amostra, resultando assim, um rápido aquecimento nessa região. Ocorre que, na interação *laser*-matéria, a energia do *laser* é absorvida pelo material e revertida em calor na respectiva amostra. É importante compreender os processos

físicos que acontecem durante essa interação para entender as capacidades e também as limitações no processamento de materiais usando um *laser*.

A radiação *laser* quando entra em contato com a superfície da amostra, uma parte dela é absorvida pelo material e outra parte é refletida e transmitida. Nesse caso, a energia que é absorvida se transforma em calor em uma fina camada próxima a superfície.

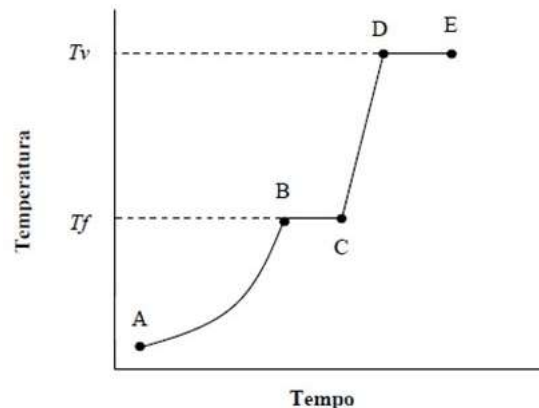
A refletividade, por definição, é a razão da radiação *laser* refletida da superfície pela radiação incidida sobre a superfície, sendo um número adimensional entre 0 e 1. A luz que é refletida é perdida, assim não podendo produzir aquecimento na superfície ou na amostra como um todo. Depende também de vários fatores o exato valor da refletividade, como: o comprimento de onda e ângulo de incidência do feixe de luz na superfície (READY, 2001), bem como, o acabamento e estado de oxidação da superfície.

Com o aumento da sua temperatura, o material pode sofrer algumas alterações em seu estado físico, que dependendo da quantidade de energia requerida para ocasionar essas alterações, como aquecimento do material ou também, uma mudança de fase (fusão e vaporização) (CHIAVERINI, 1977).

O comportamento da variação de temperatura em relação ao tempo de absorção da energia do *laser* é demonstrado na figura 9 (DE OLIVEIRA, 2006), considerando que não há perdas. A variação de temperatura inicia-se em A, onde o metal está na fase sólida e eleva-se até B, onde o material alcança a temperatura de fusão,  $T_f$ . Nota-se que a curva da temperatura tem uma inclinação que é controlada pelo calor específico  $c_p$ . Na representação gráfica, inicia-se a fusão no ponto B.

Como o material continua absorvendo energia, ele segue de B para C, sofrendo a mudança da fase sólida para a fase líquida pelo calor latente de fusão,  $L_f$ . Na sequência, como ainda continua absorvendo mais energia, a temperatura novamente aumenta até D. E já no ponto D alcança a temperatura de vaporização,  $T_v$ . No ciclo final, em E, o material completa sua transformação para vapor e, a partir daí, não há mais absorção da energia do *laser* – exceto no caso onde a radiação seja tão alta que ocorra a formação do plasma.

**Figura 9:** Variação da temperatura em relação ao tempo de absorção da energia do laser



Fonte: DE OLIVEIRA, 2006

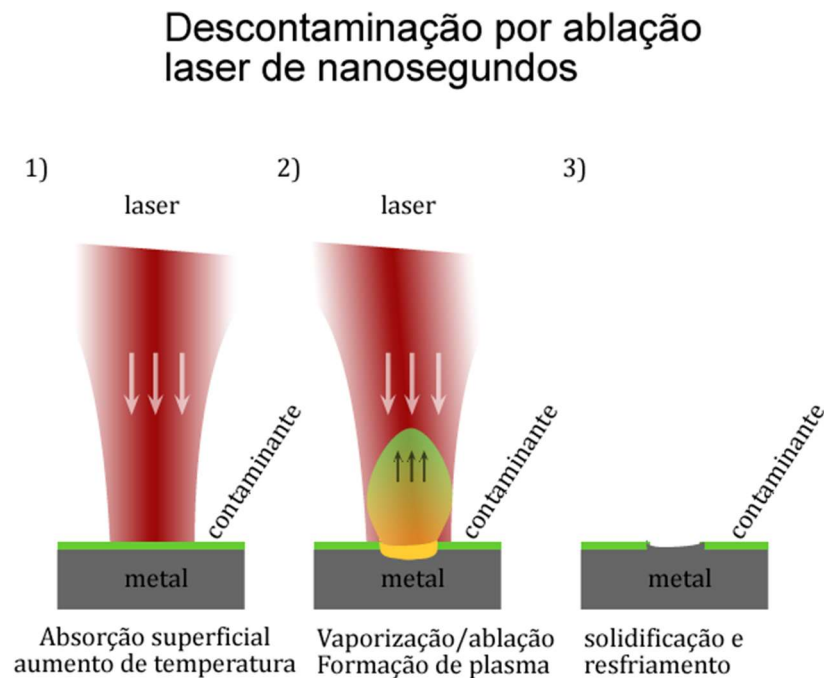
Para pulsos de nanossegundos, este processo é bastante rápido, e dependendo da fluência pode-se pular diretamente da fase sólida para a fase gasosa, ou ainda produzir uma poça fundida superaquecida (acima da temperatura de ebulição) resultando em uma explosão de fase no instante que esse líquido passa ao estado gasoso (VON DER LINDE; SOKOLOWSKI-TINTEN, 2000).

Os processos termodinâmicos relacionados à deposição de calor e seus efeitos em um metal é dependente da condutividade térmica, do calor específico e calor latente do material. Mudanças de fase se dão apenas se a energia depositada permanecer “confinada” em um volume de material suficientemente pequeno para que as condições de temperatura necessárias sejam atingidas. Assim, por exemplo, materiais com altos valores de condutividade térmica dificultam o processo de vaporização, pois o calor é difundido, dificultando a conversão de energia em retirada de material.

Em termos gerais, a difusividade térmica de ligas é mais baixa do que de um metal puro, exemplificando o aço inoxidável, que possui a característica de baixa difusividade térmica, limitando assim a penetração do calor no material (CHARSCHAN, 1993).

Em relação ao processo de descontaminação, a temperatura elevada durante o processo de ablação na superfície do material faz com que o substrato seja evaporado, carregando com ele o contaminante presente na superfície, conforme podemos verificar na figura 10.

**Figura 10:** Fases do processo de descontaminação na temperatura elevada na ablação



Fonte: Autor

Como mencionando anteriormente, a variação de densidade devido aos gradientes térmicos existentes na poça fundida, ou até, em virtude do efeito de Marangoni, correntes convectivas surgem em razão da diferença de tensão superficial decorrente também do gradiente térmico.

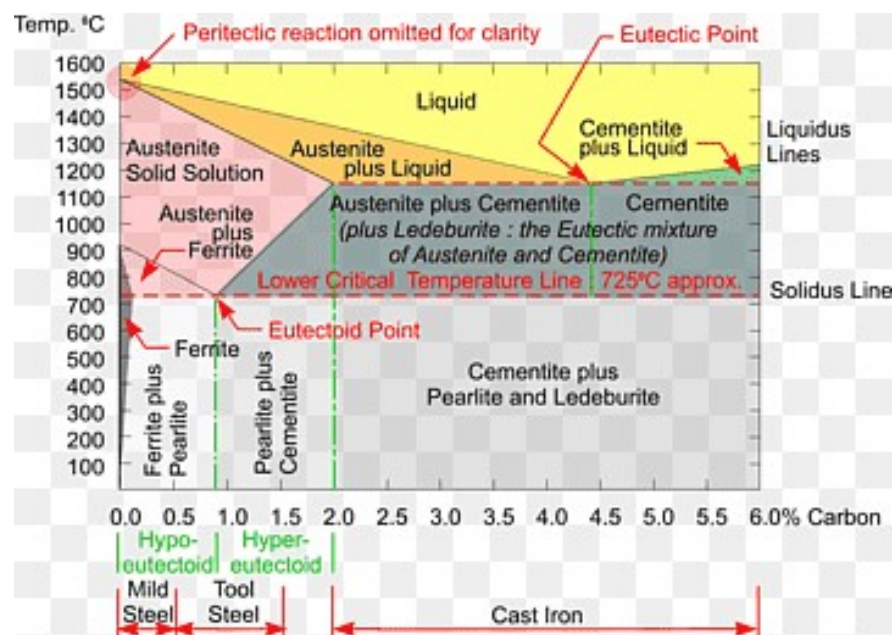
### 3.6 Aço Inoxidável

Os metalurgistas Monnartz, Guillet, Giesen e A.M. Portevin foram os descobridores dos aços inoxidáveis e historicamente os países França, Inglaterra e a Alemanha são os pioneiros nos estudos sobre aços inoxidáveis, seguido pelos EUA que, no ano de 1911, desenvolveram o aço inoxidável ferrítico com as pesquisas dos metalurgistas Christian Dantsizen e Frederick Becket (PADILHA; PLAUT; RIOS, 2003). O principal objetivo desses estudos foi conseguir, de alguma maneira, aumentar a resistência à corrosão e oxidação dos aços e, também, alcançar um menor custo de manutenção das estruturas de aços.

A liga do aço inoxidável é composta de ferro, carbono e cromo, contendo em sua composição química no mínimo 10,5% (em peso) de cromo, seu principal componente. Uma camada protetora formada de óxido de cromo que impede o

metal base de fazer contato com a atmosfera oxidante ou corrosiva, reforça a resistência à corrosão desses aços. Podemos também adicionar aos aços inoxidáveis, de acordo com as propriedades almejadas para um determinado propósito (CIMM, 2019), vários elementos de ligas como níquel, titânio, silício, molibdênio, alumínio, nióbio, nitrogênio e selênio. A figura 11 demonstra no diagrama de fases Fe-C a classificação e características desses aços, principalmente quanto a porcentagem de carbono em função da temperatura.

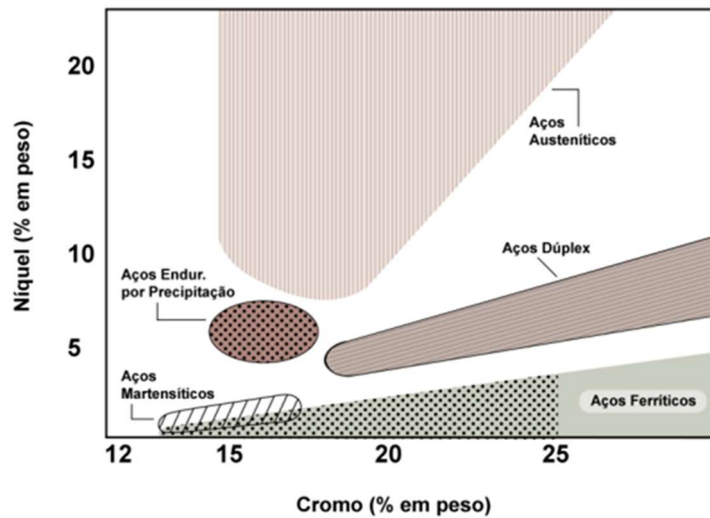
**Figura 11:** Diagrama de fases Fe-C



Fonte: [www.pngwing.com](http://www.pngwing.com)

Os aços inoxidáveis podem ser classificados da seguinte maneira: Aços Inoxidáveis Austeníticos; Aços Inoxidáveis Ferríticos; Aços Inoxidáveis Martensíticos; Aços Inoxidáveis Duplex; Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação. Os aços inoxidáveis da classe 300 são todos austeníticos, já os da classe 400 podem ser tanto ferríticos quanto martensíticos (CHIAVERINI, 1977). A Figura 12 apresenta os principais tipos de aços inoxidáveis considerando os teores de cromo e de níquel.

**Figura 12:** Faixas de concentração de cromo e níquel (em % de peso) dos principais tipos de aços inoxidáveis.



Fonte: Padilha, 2002

Quando nos referimos a produção, no campo dos aços inoxidáveis, o volume em maior escala são os inoxidáveis duplex, que possuem maiores resistências mecânica e à corrosão do que os tradicionais aços inoxidáveis austeníticos e sua principal aplicação é em tubos flexíveis para a exploração de petróleo.

De uma maneira geral, os aços inoxidáveis são utilizados em ambientes degradantes, sejam oxidantes ou corrosivos. Os equipamentos que utilizam estes aços incluem turbinas a gás, caldeiras a vapor de alta temperatura, fornos de tratamento térmico, aeronaves, mísseis e unidades geradoras de energia nuclear (CALLISTER, 2000). A Tabela 2 classifica alguns aços inoxidáveis mais comuns e disponíveis no mercado, com suas respectivas composições químicas e propriedades em tração.

**Tabela 2:** Aços inoxidáveis mais comuns com suas respectivas composições químicas e propriedades medidas em tração.

TIPOS	%C MAX.	%Mn MAX.	%Si MAX.	%Cr	%Ni	% OUTROS ELEMENTOS	LIM. ESC. (MPA)	LIM. RESIST. (MPA)	Along- Total %
304 (A)*	0,08	2,0	1,0	18,0 20,0	8,0 10,5	-----	205	515	40
316 (A)*	0,08	2,0	1,0	16,0 18,0	10,0 14,0	Mo-2,0 3,0	205	215	40
405 (F)*	0,08	1,0	1,0	11,5 14,5	-----	Al-0,10 0,30	275	480	20
430 (F)*	0,12	1,0	1,0	16,0 18,0	-----	-----	275	480	20
410 (M)*	0,15	1,0	0,5	11,5 13,0	-----	-----	620	825	12
431(M)*	0,20	1,0	1,0	15,0 17,0	1,25 2,50	-----	1030	1370	16

Fonte: Padilha,2002

### 3.7 Aço de baixo carbono ASTM A36

O aço ASTM A36 é um aço de baixo carbono (máximo 0,27%), e conhecido também como aço estrutural, com ampla utilização na indústria devido a suas características inerentes ao seu processo siderúrgico, como, a exigência de ser um aço acalmado de acordo a norma técnica da American Society for Testing and Materials (ASTM) A36/A36 (INTERNATIONAL, 2019) . Esse tipo de aço apresenta boa soldabilidade, baixa resistência mecânica e baixa usinabilidade. São em grande maioria produzidos por laminação convencional ou laminação controlada e aplicados em componentes estruturais de pontes, edifícios, torres eólicas, máquinas agrícolas e implementos rodoviários. A composição química desse aço pode ser verificada conforme tabela 3.



**Tabela 3:** Composição do aço ASTM A36 em porcentagem de massa.

Espessura da chapa (mm)	Composição química (%)					
	C (máx.)	Mn	P (máx.)	S (máx.)	Si	Cu (mín.)
Até 19,05	0,25	-	0,04	0,05	0,40 máx.	0,20
De 19,05 a 38,10	0,25	0,80 – 1,20	0,04	0,05	0,40 máx.	0,20
De 38,10 a 63,50	0,26	0,80 – 1,20	0,04	0,05	0,15 – 0,40	0,20
De 63,50 a 101,60	0,27	0,85 – 1,20	0,04	0,05	0,15 – 0,40	0,20
Acima de 101,60	0,28	0,85 – 1,20	0,04	0,05	0,15 – 0,40	0,20

Fonte: Padilha,2002

Como esse aço possui baixas quantidades de carbono (hipoeutetóide), e ser balanceado com ferro (99% Fe), e demais elementos de liga, tem como característica uma tendência à oxidação na ausência de uma proteção superficial. Podemos considerar como uma das maiores limitações desse aço a sua susceptibilidade a ambientes marítimos, já que sua resistência à corrosão é relativamente baixa (SMITH, 1981).

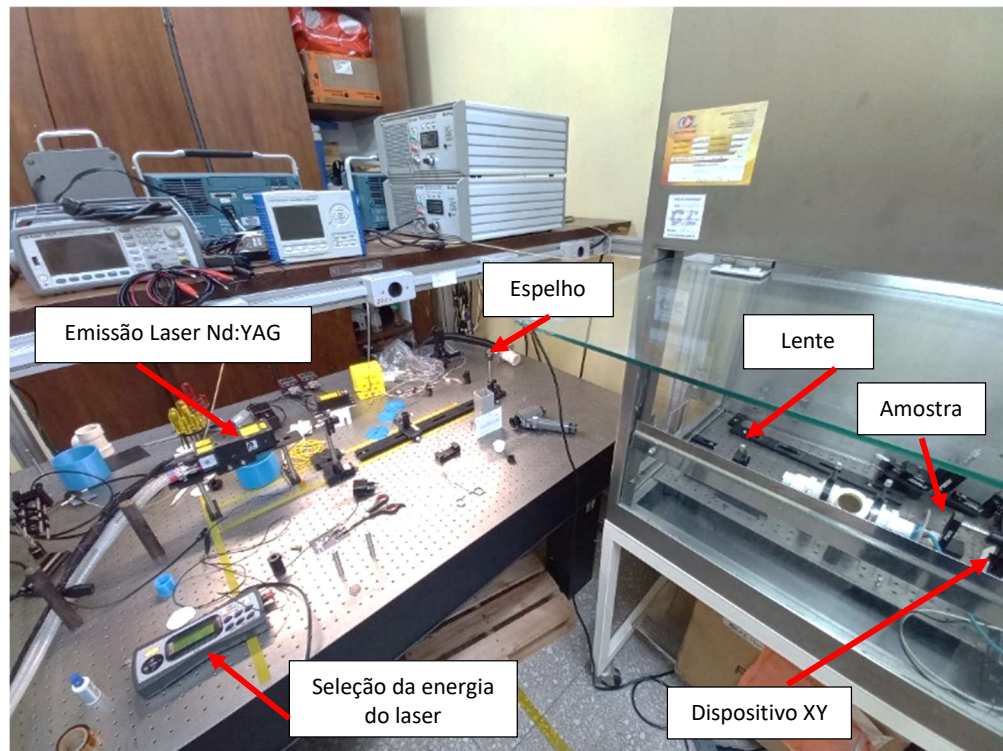
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### **Materiais:**

Os metais utilizados para esse trabalho, foram os aços Inox AISI 304, Inox Duplex AISI 2205, Inox dual-phase Usibor e ASTM A36 de baixo carbono. Esses metais foram escolhidos em razão de sua similaridade com material utilizado no estudo de (COSTA; VICENTE; RAELE, 2021) no qual há indícios de internalização de contaminantes.

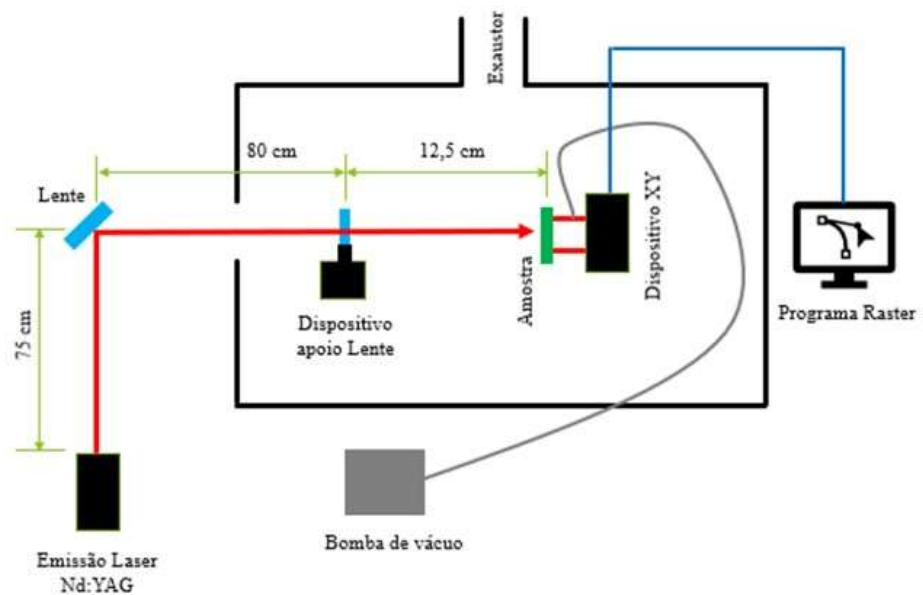
O projeto foi desenvolvido no Centro de Lasers e Aplicações do IPEN, mais precisamente no Laboratório de Aplicações Laser em Ciências Nucleares (Laplacianu), através do *laser* com pulso de nanossegundos (Nd:YAG), da marca Quantel Ultra 100 com 7 ns de duração de pulso e com faixa de repetição a 20Hz, operando com comprimento de onda de 1064nm, com uma energia nominal por pulso de 100 mJ e perfil multimodo. Está situado entre o feixe gaussiano e *tophat*. O equipamento é complementado por dois motores modelo Thorlabs LTS300/m com configuração XY para locomover o porta amostra operado por vácuo. O porta amostra trata-se de um dispositivo de fixação da amostra a ser irradiada. Nas figuras 13 e 14, visualizamos os equipamentos utilizados bem como o layout do arranjo experimental da estação de trabalho.

**Figura 13:** Estação de laser Nd:YAG no laboratório do CLA.



Fonte: Autor

**Figura 14:** Layout do arranjo experimental na Estação de laser Nd:YAG.



Fonte: Autor

### **Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)**

Foi utilizado no laboratório multiusuário do Centro de lasers e aplicações o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo Hitachi TM 3000: Para análise das condições da superfície, quanto aos tipos e tamanhos dos grãos, bem como a verificação da refusão na face pulsada. O processo de refusão ocorreu devido a alta temperatura durante a ablação do *laser* na superfície do metal, ou seja, ocorreu uma nova fusão. O microscópio também possui um sensor EDS (sistema de energia dispersiva) para caracterização qualitativa da composição química de amostras.

### **Microscópio óptico**

Os resultados foram analisados através de um microscópio óptico, disponível no laboratório multiusuário do CLA no IPEN para inspeção visual qualitativa da região irradiada. Nesse caso, identificamos com maior clareza a mudança de fase nos materiais irradiados.

Modelo do equipamento: Microscópio Leica polarizado (modelo DMLP) com diversos filtros, iluminação dupla e câmera CCD.

### **Espectrômetro de massa LA-ICP-MS**

Para analisar a quantidade de contaminante internalizado no material metálico, nesse caso partículas de ouro, foi utilizado o espectrômetro de massa LA-ICP-MS (iCAP Q e CETAC LSX-213 G2+) localizado no laboratório da Geociências da USP. O parâmetro de processo utilizado nesse equipamento, para remoção da porção para análise, foi com diâmetro do feixe *laser* de 30  $\mu\text{m}$  e uma fluência de 10,4 J/cm<sup>2</sup>.

**Métodos:**

A fim de mapear as influências das variáveis presentes neste projeto de pesquisa (fluência, sobreposição de pulso e energia do pulso *laser*) sobre os materiais de interesse, as amostras seguiram os seguintes processos:

As amostras foram confeccionadas em formato retangular com medidas 8 x 16 mm e espessura de 3 mm para adaptação ao dispositivo de fixação XY da estação *laser* do CLA com auxílio da bomba de vácuo. Apenas para o aço Inox AISI 304, as amostras estavam em formato circular com diâmetro de 50 mm e espessura de 1mm. Inicialmente em chapas com formatos diversos, as amostras foram confeccionadas manualmente por corte convencional na cortadora modelo Buehler Isomet. As arestas foram limadas para remover qualquer possibilidade de rebarbas e obter uma superfície homogênea para não influenciar no processo de ablação. Na sequência, as amostras foram limpas com álcool isopropílico.

No processamento, as amostras foram submetidas à ablação com 50% de sobreposição espacial entre pulsos na área de dano (região fundida). Nesse estudo inicial foi utilizado o diâmetro do feixe *laser* como elemento para determinação da fluência, que para efeito experimental, foi de 10 J/cm<sup>2</sup>.

No laboratório do Centro de Ciência e Tecnologia dos Materiais (CCTM) do IPEN, as amostras foram embutidas, polidas e também processadas por ataque químico que auxiliaram na identificação dos tipos e tamanhos de grãos dos materiais e diferenciar da região irradiada com a não irradiada.

Na utilização do MEV, a espessura da região refundida foi inspecionada para avaliar qualitativamente o aspecto da usinagem, bem como tamanho de grão e alteração de fase no material. Também foi muito importante para avaliar a presença ou influência de rebarbas na confecção das amostras. O microscópio óptico serviu como suporte na caracterização das análises.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Testes laboratoriais foram realizados com os seguintes materiais: aço inoxidável AISI 304, aço inoxidável duplex 2205, aço inoxidável duplex Usibor e o aço de baixa liga ASTM A36.

### 5.1 Caracterização do feixe laser

No processo de ablação a *laser* é importante conhecer o valor da fluência, parâmetro dado em  $J/cm^2$  que relaciona a energia (QE, J) em função da área do feixe (A,  $cm^2$ ), conforme a equação 4.

$$F = \frac{QE_{Pulso}}{A_{Focal}} \quad (\text{equação 4})$$

Para o cálculo da fluência, foi considerado o feixe em formato circular. Desse modo, o valor do diâmetro desse feixe foi obtido utilizando a técnica da fita Kapton. Essa fita foi posicionada no dispositivo de fixação da amostra, assim, após do pulso *laser*, gerando a formação de furos na fita.

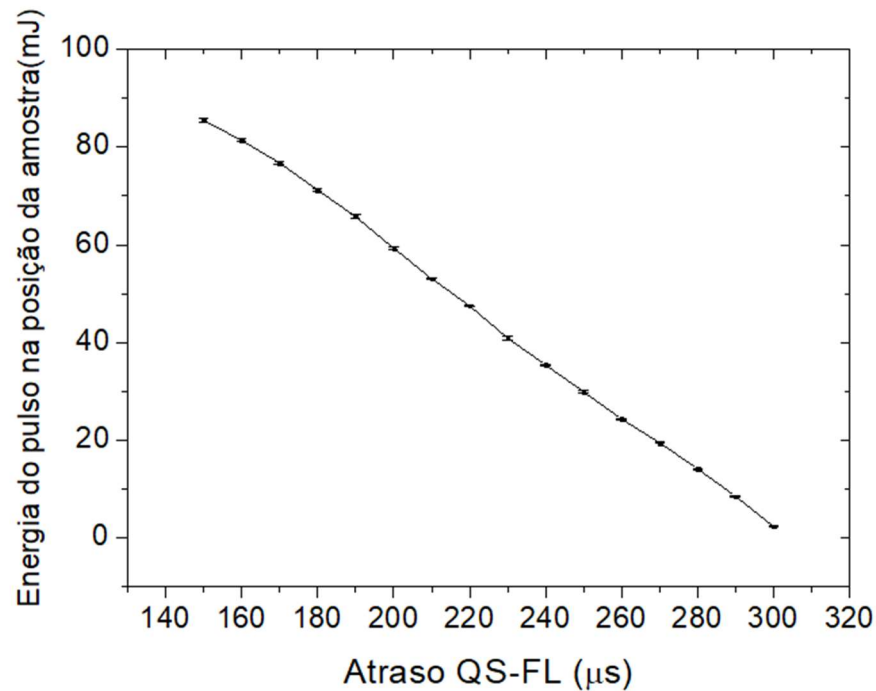
### 5.2 Curva de energia do laser

O controle da energia do pulso do *laser* é realizado através do tempo decorrido entre o pulso da lâmpada de bombeio e o chaveamento óptico, Q-Switch (FL-QS delay).

É necessário então tabular essa relação a fim de controlar as condições experimentais.

Através do detector de potência Power Meter FieldMax II da marca Coherent e sensor J-50MB-YAG, foi realizada uma simulação da medição da energia, na mesma posição da amostra, assim coletando os resultados, conforme apresentados na figura 15.

**Figura 15:** Valores das energias dos pulsos (mJ) em função do atraso QS-FL ( $\mu\text{s}$ ).



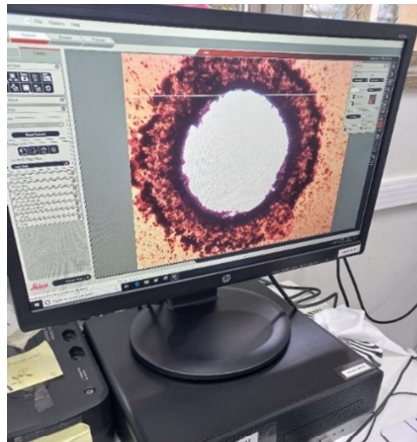
Fonte: Autor

### 5.3 Determinação do diâmetro do feixe (Kapton®)

Outro parâmetro crucial para o processamento de amostras é o diâmetro do feixe ou foco, com o qual é possível determinar a fluência numa dada área. Para isso foram realizados experimentos de pulso em uma fita Kapton® (FUERSCHBACH et al., 2004), com o objetivo de medir a área afetada pelo feixe. A característica da fita Kapton® é de obter alta absorção da região do espectro, ter baixa condutividade térmica e de também ser um processo padrão para esse tipo de experimento. Nesse pulso experimental, obtivemos um furo com diâmetro de 566  $\mu\text{m}$ , conforme figura 16. Utilizou-se uma energia de 80 mJ e uma irradiação de 10 segundos (200 pulsos) para perfurar a fita.

Para dimensionar o resultado dessa atividade, foi utilizado um microscópio Leica polarizado (modelo DMLP). Nesse caso, a área central corresponde ao local onde o *laser* incidiu. A borda da área irradiada e da área de dissipação é uniforme, o que garante que o *laser* está bem alinhado.

**Figura 16:** Fotografia exemplificando o processo de medição do diâmetro do feixe laser através da microscopia óptica da fita Kapton perfurada pelo laser.



Fonte: Autor

#### 5.4 Determinação do diâmetro de dano em ligas de inox

Para esse experimento, uma amostra polida de inox 304 foi irradiada em 5 fluências em pulso único.

Na sequência, utilizando um MEV, o diâmetro do dano foi determinado, ver tabela 4 e figura 17.

**Tabela 4:** Diâmetros dos danos medidos na amostra e respectivas fluências utilizadas.

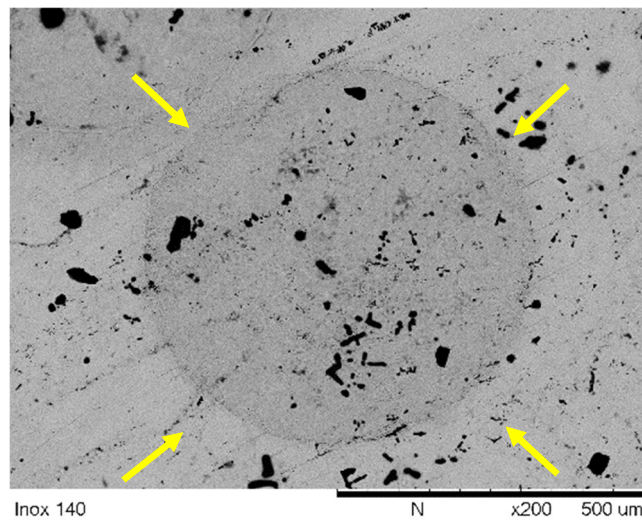
$\varnothing$ $\mu\text{m}$	Fluência $\text{J}/\text{cm}^2$
435	1,00
467	2,50
579	5,00
597	7,50
620	10,00

Fonte: Autor

Essa etapa, foi realizada em uma única liga e seus resultados serão estendidas para ligas similares deste estudo.



**Figura 17:** Aço inox AISI 304, único pulso e fluência de 10 J/cm<sup>2</sup> caracterizado no MEV, imagem representativa do experimento.



Fonte: Autor

### 5.5 Metodologia e testes para visualização da camada fundida em ligas inox

Após serem medidos os diâmetros dos pulsos nas respectivas energias, determinamos a velocidade e a distância do deslocamento para a sobreposição do pulso. Para esse primeiro estudo, selecionamos a fluência do pulso com valor mais alto, nesse caso com 10 J/cm<sup>2</sup>, com objetivo de melhor visualização da faixa de refusão. A estação de trabalho com *laser* Nd:YAG do laboratório foi parametrizada para realizar o processo de pulso *laser* por nanossegundos (ns) com sobreposição de 50%.

Os parâmetros foram inseridos no programa Raster da estação de trabalho para o início do processo, que ocorreu em toda superfície do aço inox AISI 304, conforme figura 18.

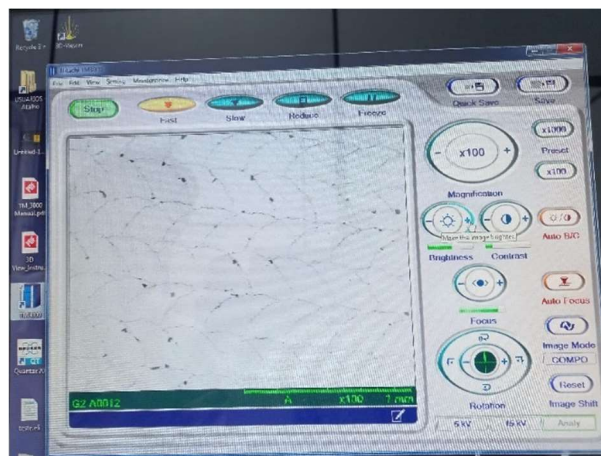
**Figura 18:** Aço inox AISI 304 irradiado para checagem inicial dos parâmetros.



Fonte: Autor

Na figura 19 é possível iniciar os estudos quanto as características dos pulsos sobrepostos. Para a verificação do resultado da ablação com sobreposição de 50% na superfície do material, foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com contraste de elétrons retro espalhados (BSE).

**Figura 19:** Pulsos sobrepostos no aço inox AISI 304 caracterizado no MEV.



Fonte: Autor

O próximo passo para a análise da amostra irradiada consiste na preparação, com o objetivo final de melhorar imagem a ser capturada no MEV, porém, para isso, deve-se primeiramente cortar transversalmente o material, uma vez que é necessário avaliar os efeitos dessa ablação na face da secção cortada da amostra. Para esse corte, utilizamos o equipamento de precisão Buehler Isomet com a especificação do disco de corte de precisão diamantado e seleção da velocidade 8 da cortadeira com 240 rpm com tempo de operação em 1 hora. A escolha desse tipo

de processo para o corte deve-se ao fato de minimizar os efeitos da rebarba gerada, fenômeno este que está intrínseco ao processo, como podemos verificar na figura 20.

**Figura 20:** Processo de corte da amostra no equipamento Buehler Isomet.



Fonte: Autor

Nesse processo de corte convencional, por mais minucioso que seja, existe a geração da rebarba, que deve ser removida para não interferir na análise final da amostra no MEV. Para minimizar o tamanho da rebarba gerada, o sentido de corte deve ocorrer na face irradiada. Dessa maneira, direcionamos a maior rebarba na face oposta não irradiada.

Na etapa seguinte, a amostra foi submetida ao processo de embutimento no laboratório do CCTM do IPEN. Para conseguir manter o alinhamento e paralelismo da amostra, foi necessário fixá-la com uma presilha e colocá-la num recipiente plástico apropriado ao processo. Posteriormente, com a amostra já fixada dentro do recipiente (figura 21), foram adicionados os materiais Aradur 2963 BR e Araldite GY 260 BR para solidificar com a amostra e assegurar a fixação e sua posição perpendicular. Esse detalhe é importante para garantir a qualidade da imagem quando for caracterizada no MEV.

O tempo para a solidificação desse material é de aproximadamente trinta minutos com auxílio de um secador. Após a completa secagem, retiramos a amostra embutida do recipiente plástico.

**Figura 21:** Imagem do processo no laboratório do CCTM do IPEN com embutimento da amostra irradiada em aço inox AISI 304. Posteriormente a retirada do recipiente plástico.



Fonte: Autor

Com a amostra já embutida, o próximo passo foi realizar o polimento na face para remover possíveis rebarbas e melhorar a qualidade da superfície do aço inox com objetivo final de verificar os possíveis danos causados pela ablação bem como conseguir identificar a composição química e também os tamanhos de grãos. Para essa atividade, utilizamos duas politrizes da Arotec modelo Aropol 2V, com lixa gramatura 600 e três estágios para o polimento, auxiliados com partículas de alumina tamanhos de 1, 0,5 e 0,05  $\mu\text{m}$  respectivamente, sendo esta última para o acabamento final, conforme figura 22. A limpeza após o processo de polimento, pode ocorrer com auxílio de álcool isopropílico e secador manual.

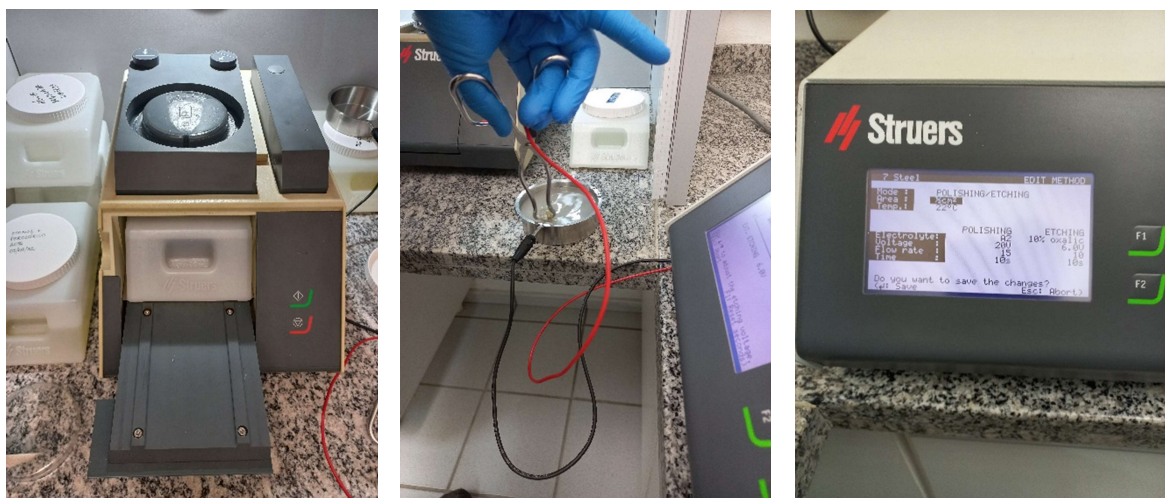
**Figura 22:** Processo de polimento da amostra após embutimento realizado em duas fases com auxílio da Alumina de 0,05  $\mu\text{m}$  no acabamento final.



Fonte: Autor

O próximo passo, foi direcionar a amostra para um polimento eletrolítico com ataque químico no equipamento Lectropol-5 Struers (figura 23), pois esse tipo de processo auxilia a identificar os grãos austenítico para análises posteriores. Foi utilizada uma solução com 20% de ácido perclórico em álcool etílico P.A. Esse procedimento foi realizado no laboratório CCTM do IPEN.

**Figura 23:** Imagem do processo de polimento eletrolítico por ataque químico no equipamento Struers no laboratório CCTM do IPEN.

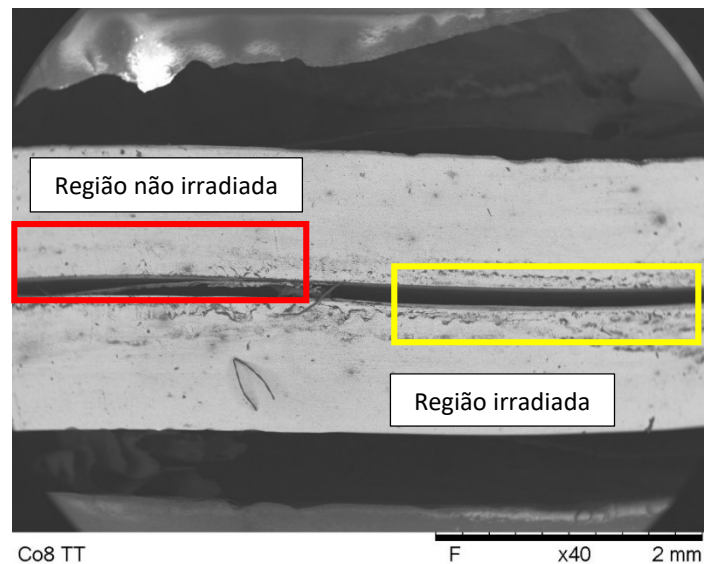


Fonte: Autor



A figura 24 obtida no MEV evidencia a segunda amostra confeccionada para continuidade dos estudos. Porém, nessa amostra, houve uma alteração no processo de fabricação para tentar minimizar a geração das rebarbas, sendo essas, inerente ao processo de corte. Nesse caso, o material foi primeiramente cortado e rebarbado, para somente após isso receber os pulsos sobrepostos. Outra alteração no processo consistiu em irradiar 50% do diâmetro da amostra, com o objetivo de conseguir fazer o comparativo da região irradiada e não irradiada na mesma amostra.

**Figura 24:** Imagem ampliada em 40x mostrando o comparativo da região irradiada e não irradiada, obtida no MEV, no aço AISI 304.

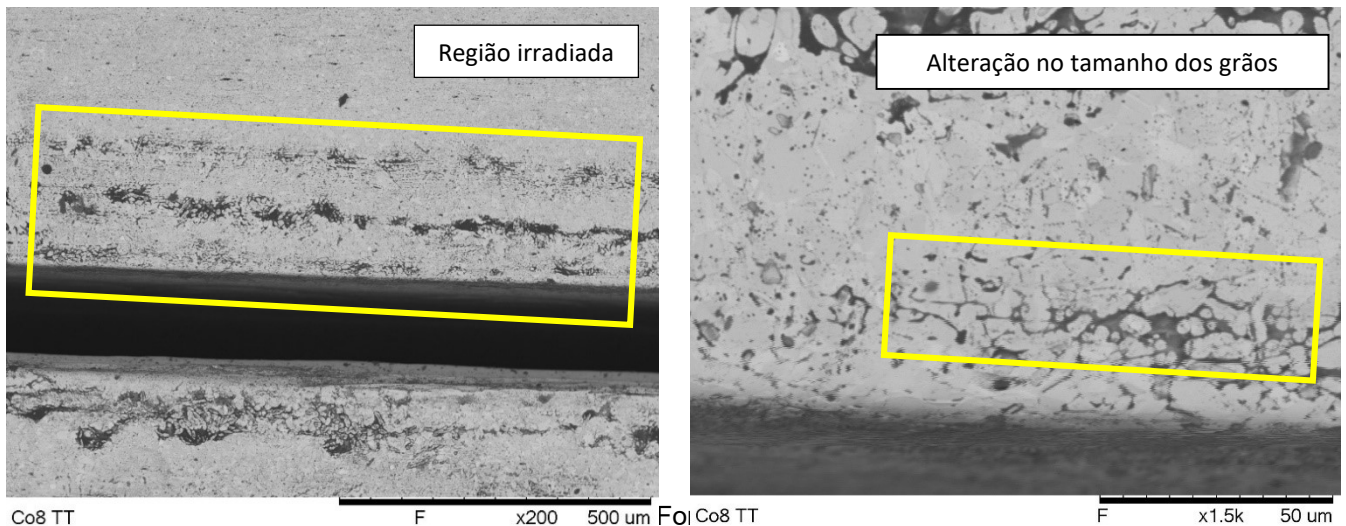


Fonte: Autor

Na figura 25, já foi possível constatar na imagem a diferença na superfície entre a região irradiada e não irradiada, na qual foi afetada pela energia de pulso de nanossegundos. Nessa região que recebeu o pulso *laser* houve a alteração nos tamanhos de grãos na zona termicamente afetada (ZTA), principalmente à medida que se aproxima da região da borda do material. A profundidade na qual o material tem essa mudança na composição química, dependendo do tipo de aço, pode chegar a 150  $\mu\text{m}$ . Porém, até como objetivo desse estudo, de verificar a questão da evaporação do material radioativo e também a possibilidade de refusão na superfície do material, devido ao calor gerado durante o processo e a intensidade do *laser*. Essas características serão avaliadas durante os experimentos com os materiais

propostos e analisar seus resultados considerando as propriedades e características entre eles.

**Figura 25:** Imagem da amostra irradiada com ampliações de 200 e 1500x, obtida no MEV, com aço Inox AISI 304, apresentou a zona termicamente afetada com alteração no tamanho dos grãos.

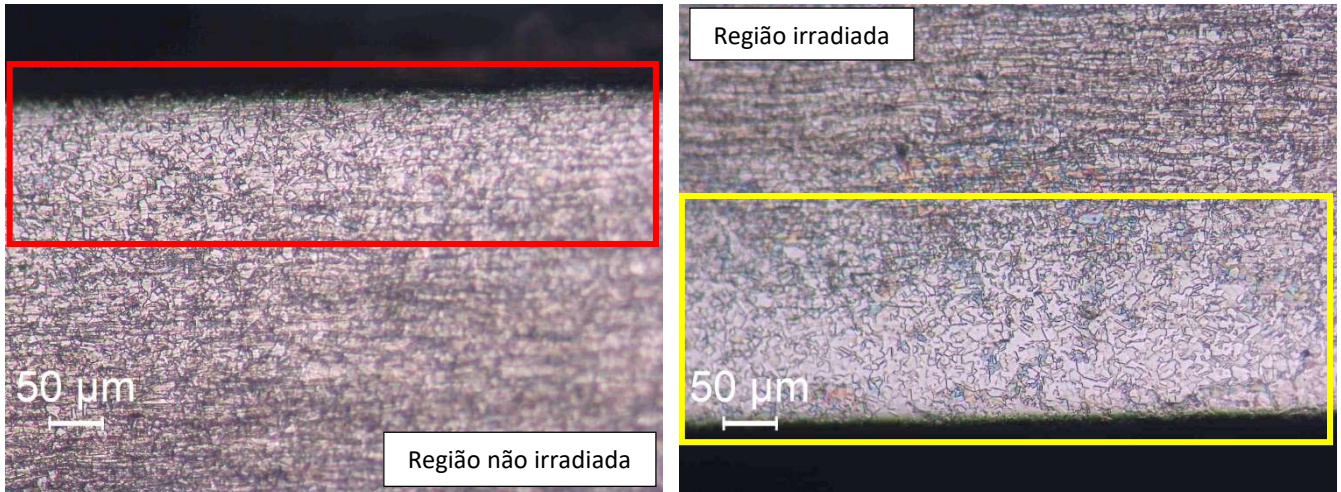


Fonte: Autor

Para conseguir uma análise mais conclusiva dos efeitos do pulso *laser* nesse material, foi realizado um ataque metalográfico utilizando-se uma solução aquosa de ácido nítrico a 40%, com diferença de potencial de 5V por 30 segundos.

As imagens da figura 26 indicam que não houve refusão na aresta da região irradiada, pois em toda essa faixa irradiada o material recristalizou e houve o crescimento no tamanho do grão. Nesse caso, se houvesse a refusão, o material apresentaria dendritas ou granulações extremamente finas, que nessa situação o material funde, a dendrita solidifica e o calor residual recristaliza, fenômeno esse que não foi o caso. Também, não é característica desse material ter duas fases, se tivesse, apareceria no contorno de grão a ferrita secundária. Outra característica verificada é que os grãos mais próximos da região irradiada não possuem nenhuma orientação preferencial, ou seja, não estão deformados em nenhum sentido.

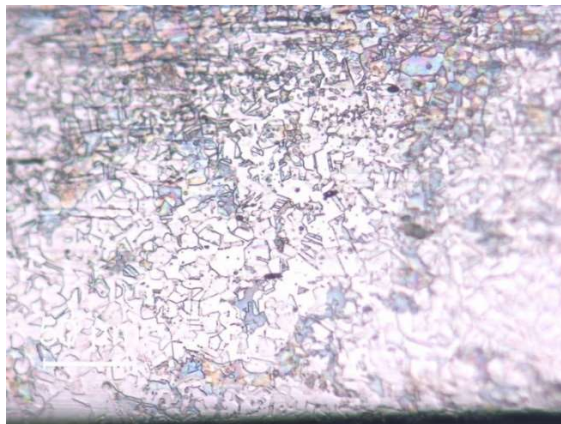
**Figura 26:** Comparativo entre amostras de aço inox AISI 304 não irradiado por laser (esquerda) e irradiado (direita), ambas com ataque de ácido nítrico. Na região irradiada foi possível observar a zona afetada pelo calor em 150  $\mu\text{m}$ . Imagem obtida no microscópio óptico Leica polarizado modelo DMLP.



Fonte: Autor

Na figura 27 é possível visualizar com maior precisão a alteração no tamanho de grão na região irradiada, e se intensifica na medida que fica mais próxima da borda.

**Figura 27:** Imagem da amostra polida no ataque químico com ácido nítrico com alteração nos grãos no aço AISI 304 obtida no microscópio óptico Leica polarizado modelo DMLP.



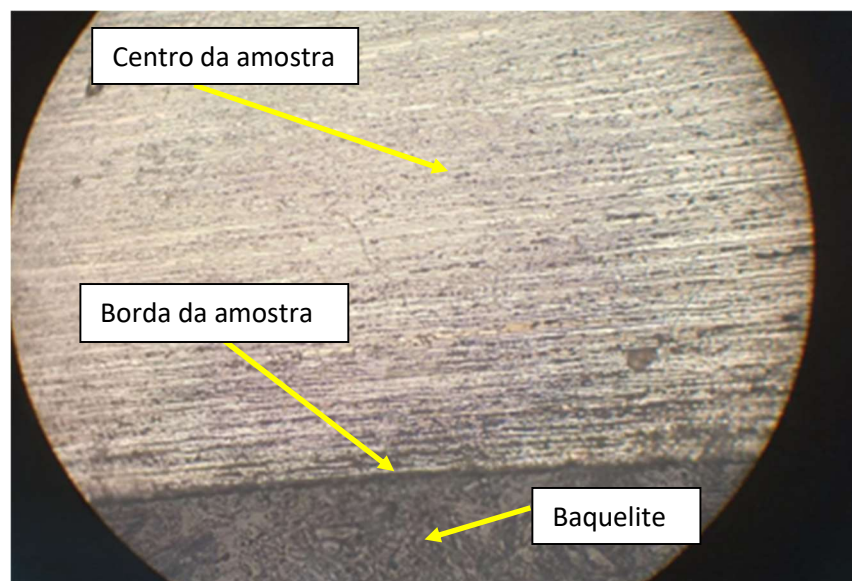
Fonte: Autor



Na sequência dos estudos comparativos dos metais propostos (aço inox AISI 304, aço duplex 2205, Dual phase Usibor e ASTM A36) foi realizado, com os mesmos procedimentos de preparação da amostra inicial e parâmetros de processo da estação *laser* de nanossegundos no CLA, o material aço duplex 2205, sempre repetindo a fluência de  $10 \text{ J/cm}^2$ . Porém, para conseguir uma melhor caracterização e identificação dos grãos, foi utilizada o reagente químico Murakami com o reagente ferricianeto de potássio P.A.

A figura 28 mostra a micrografia ótica do aço duplex 2205 após material irradiado. Nota-se que a região central da amostra tem percentual de 50% de austenita e ferrita. No entanto, na medida que vai se aproximando da borda, próxima da região refundida, esse percentual vai alterando, onde o percentual de ferrita aumenta.

**Figura 28:** Imagem do aço Inox duplex 2205 irradiado. Não houve refusão na borda, porém foi possível identificar a alteração no tamanho de grão devido a zona termicamente afetada (ZTA).

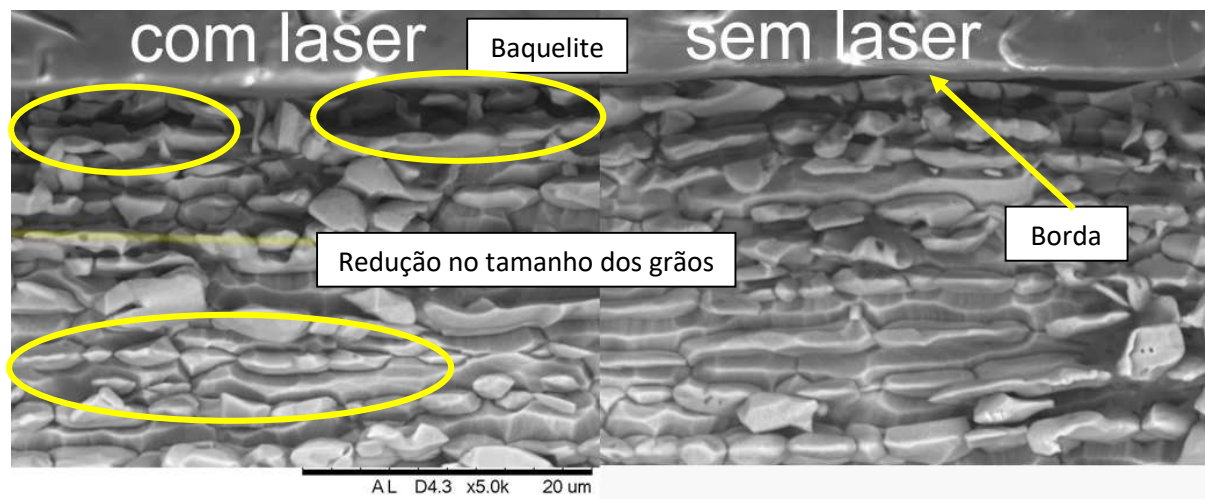


Fonte: Autor

Como a proporção de ferrita e austenita estão diferentes, a região escura corresponde a ferrita que foi atacada preferencialmente pelo reagente utilizado e que foi irradiada com *laser* tem percentual de ferrita maior. Isso se deve a própria característica desse metal e também a alta temperatura aplicada no processo.

Na caracterização realizada no MEV, conforme figura 29, há o comparativo entre uma amostra irradiada e outra sem o pulso *laser* e claramente é possível verificar as diferenças com relação ao tamanho de grão, principalmente quando se aproxima da região da borda. Com relação a refusão, não foi evidenciado, mas nesse caso, verificamos uma maior proporção de ferrita nessa região. O aço inox duplex 2205 solidifica na fase ferrita delta e, posteriormente, parte dessa ferrita transforma-se em austenita. Desse modo, o efeito mostra que o maior percentual de ferrita pode ser um indicativo de fusão superficial.

**Figura 29:** Imagem comparativa entre amostra irradiada e não irradiada do aço Inox duplex 2205. Caracterização realizada no MEV.



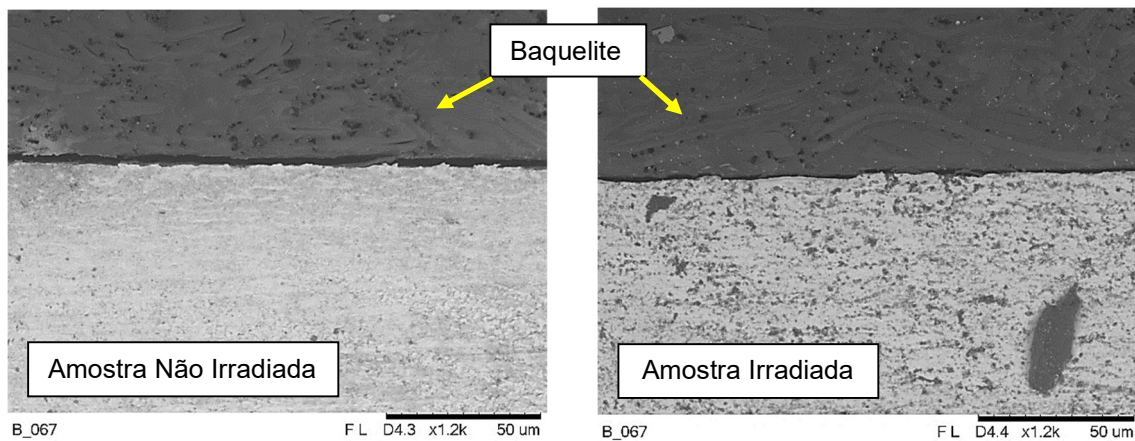
Fonte: Autor

O aço inox dual-phase Usibor foi o outro material que avaliamos nesse trabalho, quanto ao seu comportamento no processo de pulso *laser*. Esse é um aço com maior concentração de boro na sua composição química e revestido de alumínio-silício (AlSi), especialmente desenvolvido pela ArcelorMittal para estampagem a quente e utilizado principalmente na produção de peças estruturais críticas para a segurança e elementos de reforço.

A preparação da amostra seguiu com o mesmo método no corte, embutimento e polimento e utilizado o reagente Nital 5% nesse material para identificação das fases e configuração dos grãos. Na figura 30 é possível verificar a comparação entre a região irradiada e não irradiada e, claramente, é evidenciado a

diferença na região próximo da borda. A diferença na coloração deve-se a grande porcentagem de boro na composição química.

**Figura 30:** Imagem comparativa da amostra irradiada e não irradiada com ampliação de 1200x, obtida no MEV, com aço Inox dual-phase Usibor.



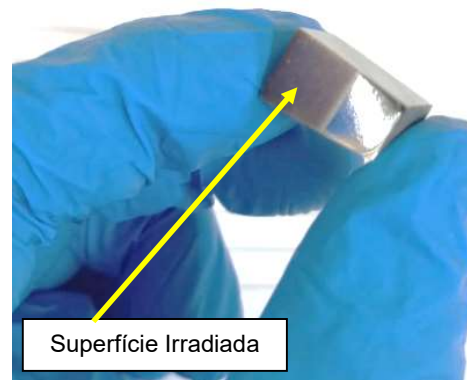
Fonte: Autor

Porém, nesse material não foi possível identificar a refusão na borda, pois a intensidade do pulso aplicado não foi suficiente para alterar a característica inicial da amostra.

O último material pesquisado nesse trabalho foi o aço ASTM (American Society for Testing and Materials) A36, uma liga de ferro e carbono. Sua principal característica é possuir em sua composição química um baixo teor do carbono (0,25 a 0,29%), sendo um material que permite boa conformação mecânica e excelente soldabilidade nos processos industriais e tem aplicação em larga escala em projetos estruturais.

Antes de iniciar o processo com fluência de  $10 \text{ J/cm}^2$ , a amostra foi polida na superfície com o objetivo de regularizar imperfeições na face, como mostra a figura 31.

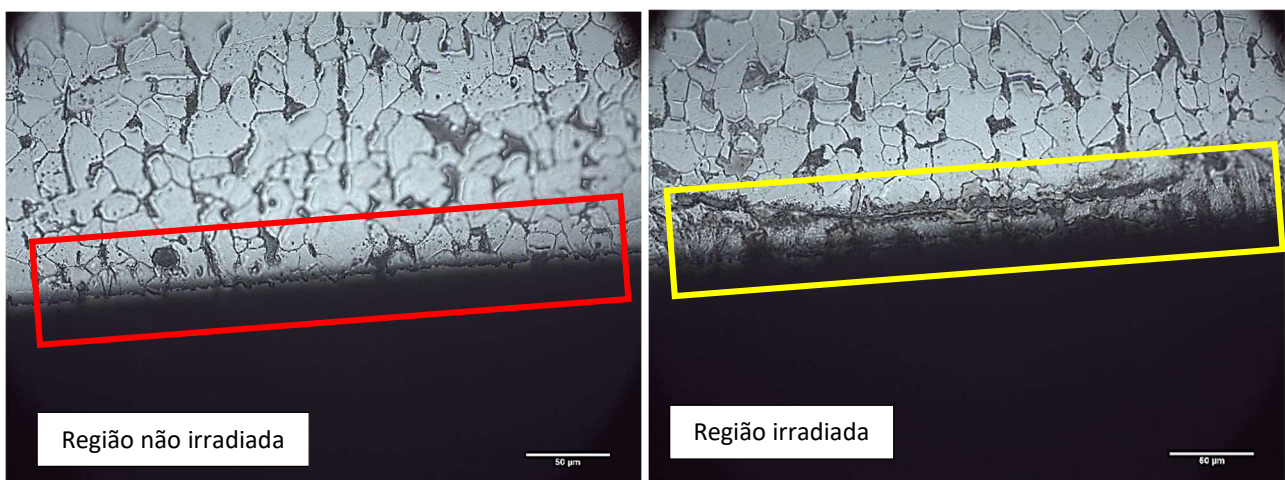
**Figura 31:** Imagem da amostra polida e irradiada no aço ASTM A36 com baixo carbono.



Fonte: Autor

Inicialmente, utilizamos para a primeira análise, o microscópio Leica e claramente foi possível identificar a região afetada pelo pulso *laser* e principalmente a região da borda onde encontramos a presença da refusão do material, isso devido a característica da liga que apresenta baixo carbono. Como o aço ASTM A36 apresenta uma excelente soldabilidade, esse fenômeno ocorreu quando esse material recebeu alta energia no processo de ablação, como podemos verificar na figura 32.

**Figura 32:** Amostra do aço baixo carbono ASTM A36. A esquerda superfície não irradiada e a direita amostra com a superfície irradiada, onde foi possível observar a refusão na borda. Imagem caracterizada no microscópio óptico Leica polarizado modelo DMLP.



Fonte: Autor

Com o objetivo de ter maior assertividade na constatação da região refundida, a amostra foi submetida ao processo de polimento e ao reagente Nital 5%.

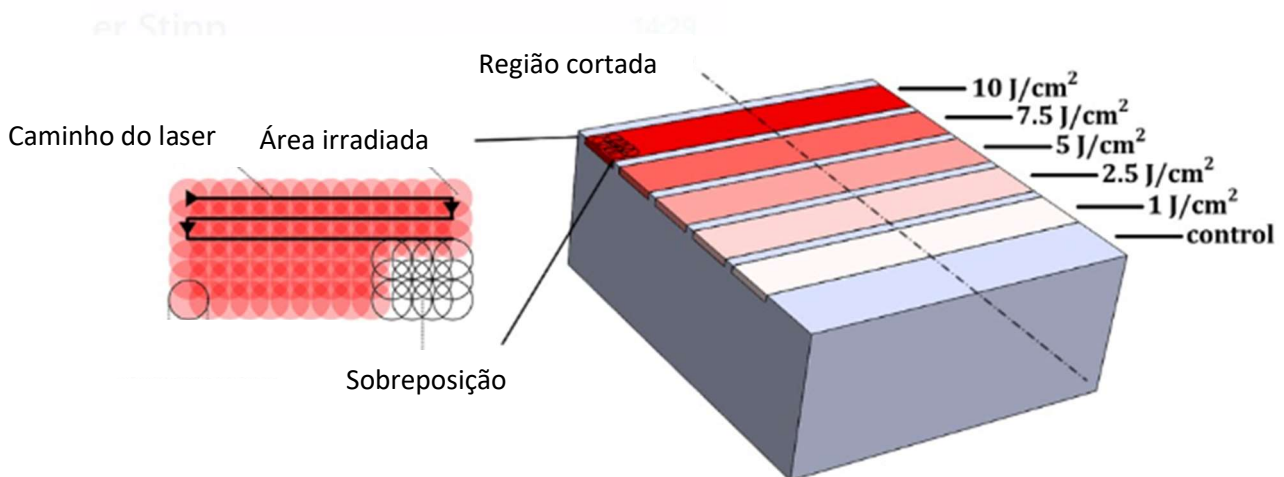
O estudo comparativo realizado nos quatro materiais propostos desse trabalho direcionou para o detalhamento na pesquisa do aço de baixo carbono ASTM A36 pois, com os mesmos parâmetros de processo nos demais aços, ele apresentou o comportamento mais próximo do desejado, que foi a faixa de alteração no tamanho dos grãos, a refusão na região da borda do material e também na fácil visualização da interface entre o material fundido e não fundido. Com isso, as etapas seguintes do trabalho focaram nesse material. Nesse caso, realizado variações nos parâmetros de energia do pulso *laser*.

### 5.6 Influência da fluência na espessura da camada fundida

Determinar a relação entre a fluência e a profundidade da camada fundida, nos fornece uma primeira ideia do quanto um contaminante poderia migrar para o interior da superfície. Assim um experimento com esse intuito foi desenhado.

A Figura 33 ilustra o processo de irradiação variando as fluências que foram utilizadas, com  $1 \text{ J/cm}^2$ ,  $2,5 \text{ J/cm}^2$ ,  $5 \text{ J/cm}^2$ ,  $7,5 \text{ J/cm}^2$  e  $10 \text{ J/cm}^2$ .

**Figura 33:** Imagem do processo de irradiação em cinco fluências diferentes.

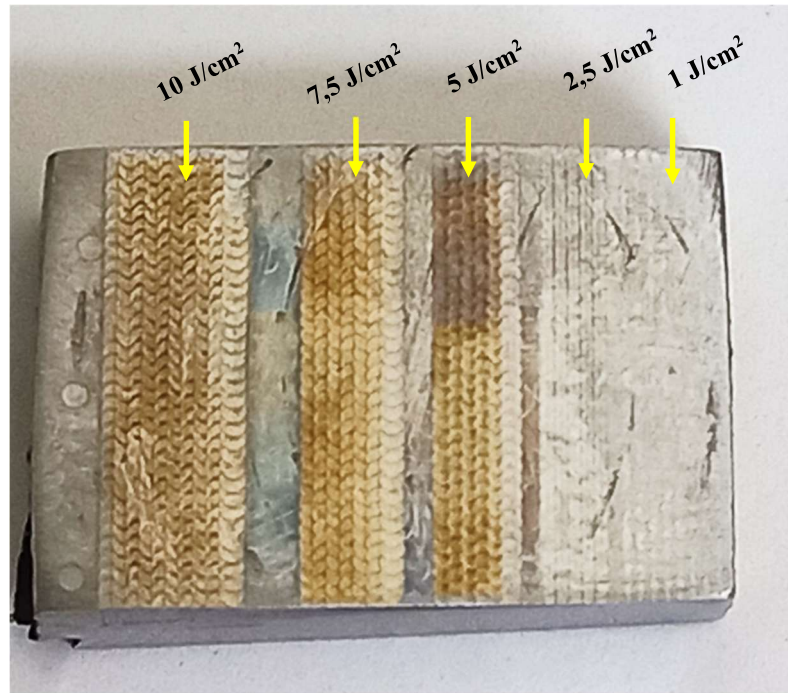


Fonte: Autor



Na figura 34, apresenta-se uma foto da amostra irradiada, posteriormente cortada e polida.

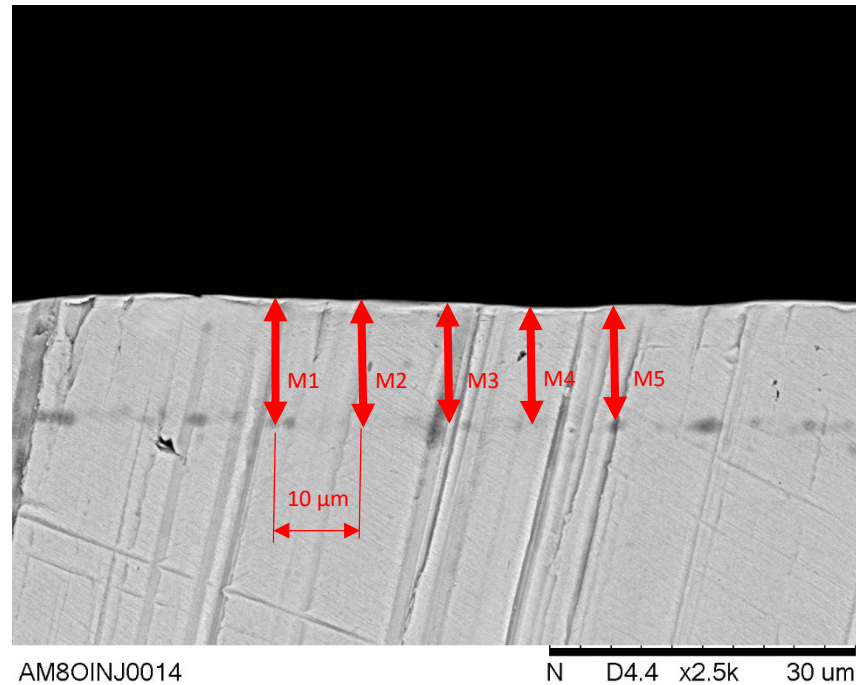
**Figura 34:** Imagem da amostra no aço ASTM A36 com baixo carbono irradiado em cinco fluências diferentes.



Fonte: Autor

Após a caracterização realizada no MEV para as cinco energias diferentes, foi possível identificar a faixa do dano causado bem como a região da refusão. Como metodologia, foi realizado um estudo estatístico com relação as variações de profundidade da zona afetada pelo calor em cinco pontos equidistantes de 10  $\mu\text{m}$  nas cinco diferentes fluências, conforme verificado na figura 35.

**Figura 35:** Amostra do aço ASTM A36 irradiado com  $7,5 \text{ J/cm}^2$  e caracterizado no MEV com ampliação de  $\times 2,5\text{k}$ . Determinação da metodologia para medição das profundidades de refusão na borda. Foram definidas médias de 5 pontos (M1 até M5) equidistantes de  $10 \mu\text{m}$



Fonte: Autor

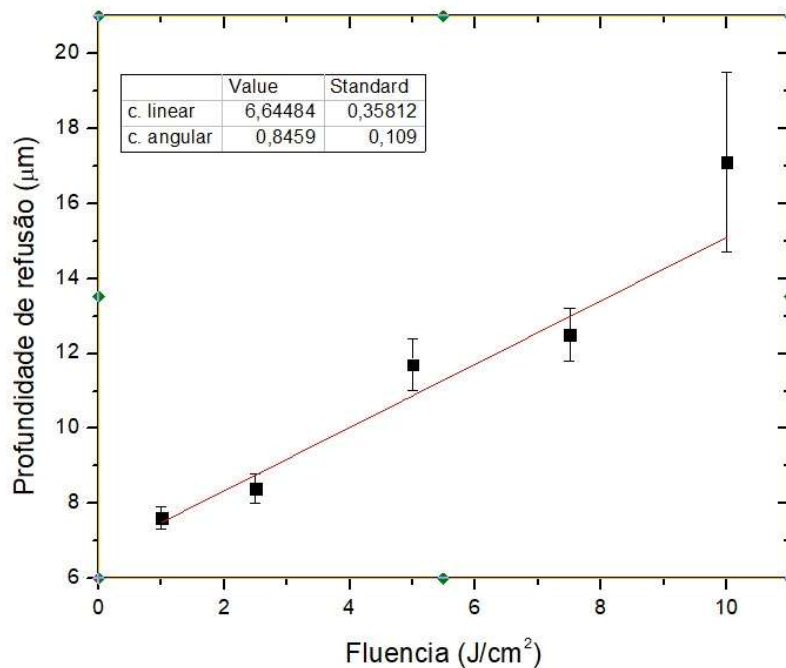
A profundidade média encontrada na amostra foi entre  $7$  a  $17 \mu\text{m}$  para as cinco diferentes fluências, como observado na tabela 5, bem como na figura 36 é possível identificar a evolução das energias aplicadas e as profundidades de refusão na região da borda do material.

**Tabela 5:** Tabela com valores medidos em cinco pontos para as diferentes fluências, com respectivas médias e desvios padrão.

	$1 \text{ J/cm}^2$	$2,5 \text{ J/cm}^2$	$5 \text{ J/cm}^2$	$7,5 \text{ J/cm}^2$	$10 \text{ J/cm}^2$
<b>M1 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	7,8	8,3	12,9	12,9	20,0
<b>M2 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	8,0	8,9	11,2	12,9	19,0
<b>M3 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	7,7	8,7	11,6	13,2	17,3
<b>M4 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	7,3	8,3	11,3	12,3	14,5
<b>M5 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	7,3	7,9	11,3	11,4	14,7
<b>Média (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	7,6	8,4	11,7	12,5	17,1
<b>Desvio Padrão</b>	0,3	0,4	0,7	0,7	2,5

Fonte: Autor

**Figura 36:** Gráfico com a evolução da energia aplicada x profundidade da refusão no material nas cinco diferentes fluências.



Fonte: Autor

O comportamento da região refundida, para a faixa de fluências prospectada, pode em função das incertezas, ser aproximado para uma relação linear. E, para esse caso, o ajuste para a regressão linear obteve um resultado de 0,94. A profundidade da zona fundida está em acordo com outros estudos da literatura (GUSAROV; SMUROV, 2005).

### 5.7 Caracterização da internalização do contaminante no aço

No próximo passo do projeto referente a internalização de contaminantes, foi produzida uma amostra com o aço de baixo carbono ASTM A36 revestido com recobrimento de ouro. Primeiramente, a amostra foi lavada com água e detergente e posteriormente por processo de ultrassom no equipamento Unique Ultracleaner 1600A por 5 minutos posicionada em becker conforme figura 37. Na sequência, a amostra foi limpa com acetona com o objetivo de melhorar a aderência do filme de ouro na amostra.



**Figura 37:** Preparação da amostra com limpeza no equipamento de ultrassom por 5 minutos



Fonte: Autor

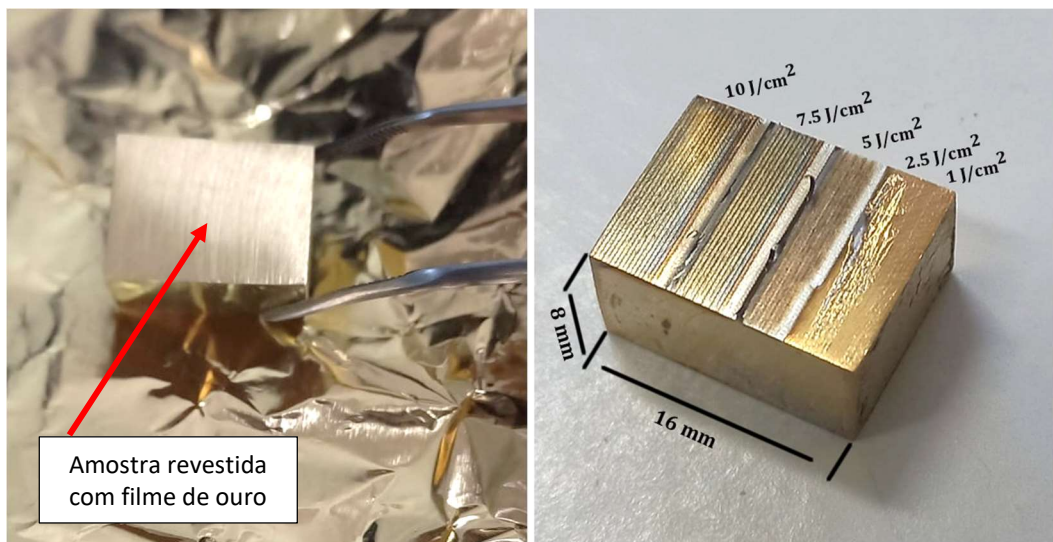
Para essa metodologia foi escolhido o filme de ouro para simular a camada contaminada na superfície do metal. O processo de revestimento utilizou um filme de ouro com espessura de 400 nm, em uma câmara de deposição de filme equipamento Leica ACE 200, como mostrado na figura 38. A amostra já revestida foi irradiada nas cinco diferentes fluências determinadas, ou seja, com 1 J/cm<sup>2</sup>, 2,5 J/cm<sup>2</sup>, 5 J/cm<sup>2</sup>, 7,5 J/cm<sup>2</sup> e 10 J/cm<sup>2</sup>, como mostrada na figura 39.

**Figura 38:** Processo de recobrimento com ouro no equipamento Leica Ace 200



Fonte: Autor

**Figura 39:** Amostra do aço ASTM A36 revestido com filme de ouro e irradiado nas cinco diferentes fluências.

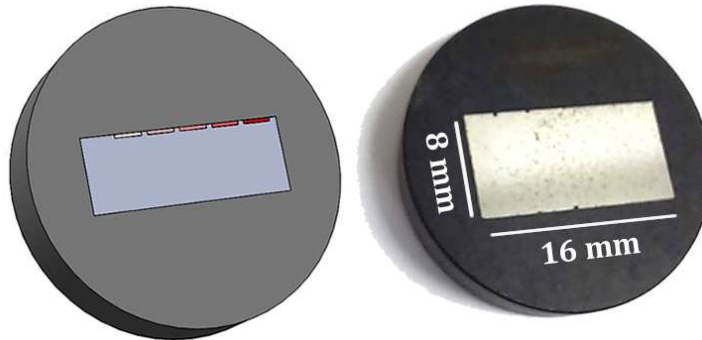


Fonte: Autor

Após o processo de pulso *laser*, a amostra foi fracionada na secção transversal na cortadeira de precisão, realizado o embutimento com baquelite e,

posteriormente, todo o processo de polimento para maior assertividade e visualização nos processos de caracterização, conforme figura 40.

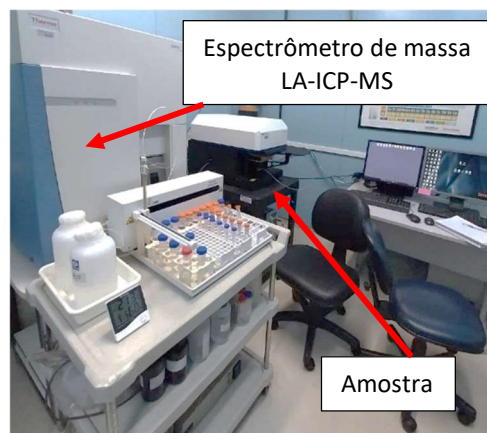
**Figura 40:** Amostra no aço ASTM A36 revestido com folha de ouro e pulsado com as cinco diferentes fluências, que foi embutido para análise no espectrômetro de massa LA-ICP-MS



Fonte: Autor

Para a identificação da internalização de material com amostra revestida com filme de ouro presente na superfície após a irradiação com *laser*, primeiramente desenvolveu-se uma metodologia para conseguir medir a quantidade de átomos que se encontraram difundidos. Nesse caso, o espectrômetro de massa por ablação a *laser* foi o equipamento utilizado para caracterizar a amostra, que foi disposta no dispositivo padrão “porta amostra” para início das análises. O equipamento localizado no laboratório da Geociências da USP é do modelo iCAP Q and CETAC LSX-213 G2+ de acordo com a figura 41.

**Figura 41:** Laboratório da Geociências da USP com Espectrômetro LA-ICP-MS



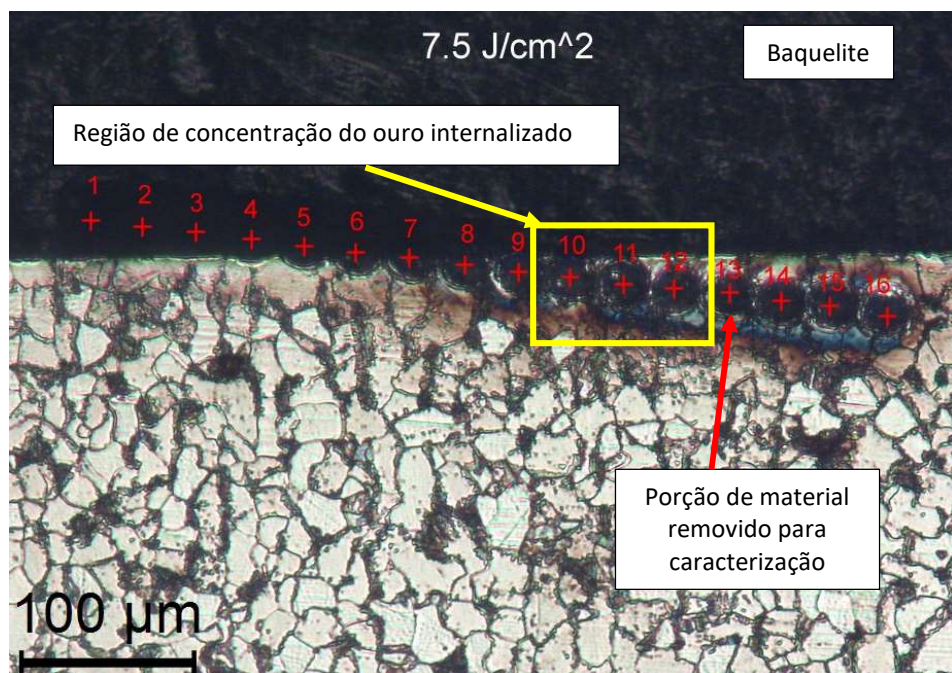
Fonte: Autor

Na sequência, é preciso informar no programa qual a composição química da amostra, nesse caso o aço ASTM A36: Ferro 98%, Carbono 0,29%, Cobre 0,20% e

Manganês 1,03% e também o material que foi revestido na peça, o ouro (Au). Através do pulso *laser* com diâmetro de 30  $\mu\text{m}$  e fluência de 10,4  $\text{J}/\text{cm}^2$ , uma porção de material é removida e enviada para a análise, como podemos observar na figura 42.

Por meio da metodologia determinamos que os 16 pontos de análise estariam equidistantes em 3  $\mu\text{m}$  em formato linear ultrapassando a zona afetada termicamente, em torno de 70  $\mu\text{m}$ . Para cada ponto, ocorreram 300 pulsos para a remoção da porção avaliada pelo equipamento.

**Figura 42:** Imagem da amostra caracterizada no espectrômetro LA-ICP-MS, pulsada com energia de 7,5  $\text{J}/\text{cm}^2$ . A metodologia consistiu em determinar 16 pontos para verificação da internalização e contagem das partículas do contaminante, com maior concentração nos pontos 10, 11 e 12.



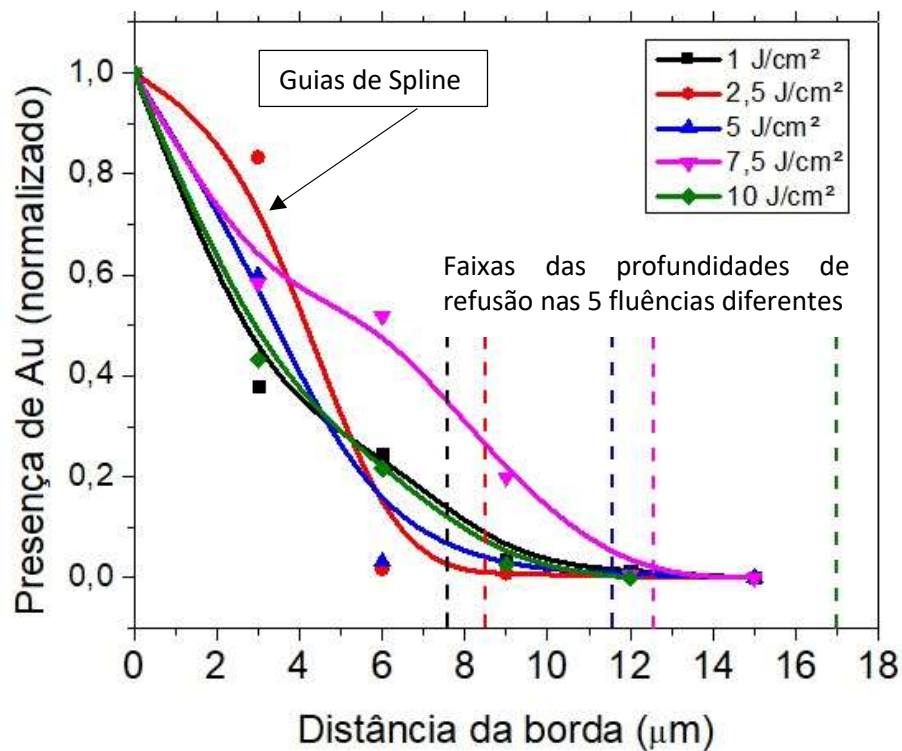
Fonte: Autor

Após a caracterização, foi constatado pelo Espectrômetro de massa LA-ICP-MS a internalização do material ouro na amostra para as cinco faixas de fluências. No início do processo de caracterização, até aproximadamente 20 segundos após a contagem inicial das partículas, o equipamento consegue identificar a composição química original do material, porém, depois desse tempo, já possível identificar a presença do ouro durante a contagem.

Para essa análise, não foi considerada uma variação estatística, porém foi determinado que o método de contagem das partículas seria padronizado para realizar as comparações de comportamento da internalização entre as diferentes fluências.

A quantidade de ouro obtida por meio da caracterização por LA-ICP-MS para cada faixa de fluência é apresentada na figura 43. Também é possível verificar uma similaridade na tendência da curva em função da profundidade a partir da superfície.

**Figura 43:** Contagem de ouro que ocorreu para as cinco faixas de fluências. Essa quantidade obtida na caracterização no LA-ICP-MS está em função da distância da borda.



Fonte: Autor



## 6 CONCLUSÕES

O trabalho possibilitou estudar os efeitos da radiação *laser* em quatro tipos de aços diferentes: inoxidável AISI 304, inoxidável duplex 2205, inoxidável duplex Usibor e o baixa liga ASTM A36. Todos os materiais apresentaram uma faixa de zona térmica afetada quando submetida a fluência de  $10 \text{ J/cm}^2$  na superfície do material e também houveram alterações metalográficas, principalmente quanto ao tamanho de grão. Porém, o aço ASTM A36 apresentou a refusão na borda da amostra irradiada, isso devido a característica desse metal possuir na sua liga um baixo teor de carbono.

Esse material foi o escolhido para a sequência dos estudos e que viabilizou a análise com profundidades de refusão entre  $7\mu\text{m}$  até  $17\mu\text{m}$  para fluências entre  $1 \text{ J/cm}^2$  a  $10 \text{ J/cm}^2$ . O experimento seguiu-se com uma simulação de contaminação através de um filme de ouro na amostra e teve como metodologia para a checagem da presença do ouro internalizado a contagem das partículas através do espectrômetro de massa LA-ICP-MS. Nessa análise, foi possível constatar a migração de material da superfície para camadas internas em todas as fluências propostas, indicando, neste caso, que houve o efeito de internalização.

Os resultados indicaram que, independentemente da fluência de irradiação, a migração desse material foi semelhante para a faixa e condições aplicadas. Isso sugere que o intervalo de migração pode estar relacionado ao tempo de solidificação, que é influenciado por fatores como a condutividade térmica do metal. Outra hipótese que foi considerada é que as correntes convectivas são induzidas apenas até uma certa profundidade, independentemente da profundidade da poça derretida.

O processo de descontaminação por ablação a *laser* é uma alternativa interessante no mercado como proposta de reuso do material. Porém, devemos considerar em algumas situações haver internalização da contaminação abaixo da superfície. Tratando-se de material radioativo, isso pode se tornar um problema caso impossibilite remover o contaminante internalizado em processos subsequentes. É importante averiguar a regulamentação quanto ao tamanho ou quantidade de material internalizado, pois, dependendo do caso, pode-se reusar o material processado.

Uma proposta para a descontaminação, por processo onde o *laser* é usado para induzir ondas de choque para liberar partículas, sem gerar material fundido e evitando a internalização de contaminantes. Após esta etapa inicial de limpeza, a fluência pode ser gradualmente aumentada para o regime de ablação para remover os contaminantes mais difíceis podendo, assim, potencialmente minimizar o risco de internalização de contaminantes.

## REFERÊNCIAS

- BLOEMBERGEN, N. From nanosecond to femtosecond science. Em: **More Things in Heaven and Earth**. Springer, 1999. p. 474–481.
- CALLISTER, W. D. **Fundamentals of materials science and engineering**. Wiley London, 2000. v. 471660817
- CHARSCHAN, S. S. **Guide to laser materials processing**. Laser Inst of America, 1993.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. Abm, 1977.
- CHICHKOV, B. N. et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. **Applied physics A**, v. 63, n. 2, p. 109–115, 1996.
- COELHO, H. P. J. B. et al. Estudo da viabilidade de descontaminação de amostras do tubo de refrigeração do reator do IPEN via laser.
- COSTA, P.; VICENTE, R.; RAELE, M. P. Descontaminação de rejeitos radioativos por ablação com laser. 2021.
- DA INSTALAÇÃO, G. DE R. GERÊNCIA DE REJEITOS RADIOATIVOS.
- DE OLIVEIRA, A. C. **Microssoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-Hbr**. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2006.
- FOWLES, G. R. **Introduction to modern optics**. Courier Corporation, 1989.
- FUERSCHBACH, P. W. et al. Development and evaluation of an in-situ beam measurement for spot welding lasers. **Welding journal**, v. 83, n. 5, 2004.
- GUSAROV, A. V; SMUROV, I. Thermal model of nanosecond pulsed laser ablation: Analysis of energy and mass transfer. **Journal of applied physics**, v. 97, n. 1, p. 14307, 2005.
- HIROMOTO, G. et al. Introdução à gerência de rejeitos radioativos. **São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Departamento de Rejeitos Radioativos**, 1999.
- HITZ, C. B.; EWING, J.; HECHT, J. **Introduction to Laser Technology**.
- INTERNATIONAL, A. **ASTM A36/A36M-19 Standard Specification for Carbon Structural Steel**. American Society for Testing and Materials International West Conshohocken .2019.



KHOSROFIAN, J. M.; GARETZ, B. A. Measurement of a Gaussian laser beam diameter through the direct inversion of knife-edge data. **Applied optics**, v. 22, n. 21, p. 3406–3410, 1983.

MARUMO, J. T. **Avaliação da contaminação provocada por pára-raios radioativos de Americio-241 descartados em lixões** São Paulo, 2006.

NORMA, C. **NN-8.01 “Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio nível de radiação”**. Abril, 2014.

PADILHA, A. F.; PLAUT, R. L.; RIOS, P. R. Annealing of cold-worked austenitic stainless steels. **ISIJ international**, v. 43, n. 2, p. 135–143, 2003.

POTIENS JR, A. J. et al. Laser decontamination of the radioactive lightning rods. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 188–190, 2014.

READY, J. F. **LIA handbook of laser materials processing**. 2001.

SEVERA, J.; BÁR, J. **Handbook of radioactive contamination and decontamination**. Elsevier, 1991. v. 47

SMITH, W. F. Structure and properties of engineering alloys. **McGraw-Hill Book Co.**, xiv+ 512, 23 x 16 cm, illustrated(16. 95), 1981.

STAFE, M.; MARCU, A.; PUSCAS, N. N. **Pulsed laser ablation of solids: basics, theory and applications**. Springer Science & Business Media, 2013. v. 53

TAM, A. C.; PARK, H. K.; GRIGOROPOULOS, C. P. Laser cleaning of surface contaminants. **Applied surface science**, v. 127, p. 721–725, 1998.

VON DER LINDE, D.; SOKOLOWSKI-TINTEN, K. The physical mechanisms of short-pulse laser ablation. **Applied Surface Science**, v. 154, p. 1–10, 2000.

WON, H. et al. Decontamination of Radioactive Material by Nd: YAG Laser. **Asian Journal of Chemistry**, v. 25, n. 10, p. 5819, 2013.

YILBAS, B. S.; SHUJA, S. Z. **Laser surface processing and model studies**. Springer, 2013.

ZIESSMAN, H. A.; O’MALLEY, J. P.; THRALL, J. H. **Medicina nuclear**. Elsevier Brasil, 2014.

---

---

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000  
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908  
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil  
<http://www.ipen.br>

**O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.**

---

---