

Descontaminação de rejeitos radioativos por ablação com laser

RELATÓRIO TÉCNICO DO PÓS-DOCTORADO

Priscila Costa

Orientador: Roberto Vicente

Contribuição de: Marcus Paulo Raele

JUNHO /2021

**Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear
São Paulo**

**GRR – Gerência de
Rejeitos Radioativos**



Descontaminação de rejeitos radioativos por ablação com laser

RELATÓRIO TÉCNICO DO PÓS-DOCTORADO

Priscila Costa

Orientador: Roberto Vicente

Contribuição de: Marcus Paulo Raele

JUNHO /2021

**Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear
São Paulo**

**GRR – Gerência de
Rejeitos Radioativos**



Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN
Presidente: Paulo Roberto Pertusi
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Ipen-Cnen/SP
Superintendente: Wilson Aparecido Parejo Calvo
Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos - GRR
Gerente: Júlio Takehiro Marumo

O Serviço de Gerência de Rejeitos Radioativos é o departamento do Ipen-Cnen/SP que tem como Missão promover a gestão segura dos rejeitos radioativos gerados no Brasil, dentro dos princípios éticos de proteção ao homem e ao meio ambiente. O objetivo da gestão dos rejeitos radioativos é assegurar um nível adequado de proteção à população e às gerações futuras e a preservação do meio ambiente, protegendo, além do Homem, as outras espécies e os recursos naturais.

O SEGRR presta serviços de gestão de rejeitos aos usuários de materiais radioativos das áreas industrial, médica e outras. Desenvolve atividades de pesquisa e desenvolvimento conduzidas no sentido de se aprimorar os métodos, as técnicas e as estratégias de gestão para reduzir os custos e melhorar a segurança no tratamento dos rejeitos. As atividades de P&D estão voltadas para as áreas de caracterização, tratamento e deposição final. Além disso, o SEGRR participa das atividades de ensino, formação e treinamento nas diversas áreas de aplicação da tecnologia nuclear.

O presente relatório técnico foi preparado para divulgar, da forma mais ampla possível, as informações contidas nos resultados das atividades de pesquisa e desenvolvimento da GRR, para a administração do Estado, para a comunidade acadêmica, e para o público em geral.

Comentários e sugestões sobre este ou outros relatórios da GRR são bem vindos e devem ser dirigidos a SEGRR – Ipen-Cnen/SP

*Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária
CEP 05508-000 – São Paulo, SP*

Fone: 11 2810-8145

Junho/2021

Página do Ipen-Cnen/SP na Internet: <http://www.ipen.br>

Página da CNEN na Internet: <https://www.gov.br/cnen/pt-br>

Sugestão de referência deste relatório:

Costa, P.; Vicente, R.; Raele, M.P. Descontaminação de rejeitos radioativos por ablação com laser. Ipen-Cnen/SP, São Paulo, junho de 2021. (IPEN/GRR-REL-06/21)

Palavras-chave: descontamination, laser ablation, radioactive material.

NOTA: Nem o Ipen-Cnen/SP nem a GRR dão garantias, expressas ou implícitas, da exatidão, completeza ou utilidade de quaisquer informações, produtos ou processos descritos neste relatório, ou de que seu uso não infrinja direitos privados. A referência, neste relatório, de qualquer produto comercial, processo ou serviço pelo nome comercial, marca ou fabricante não constitui nem implica necessariamente a recomendação ou favorecimento pela GRR ou pelo Ipen-Cnen/SP.

As conclusões e pontos de vista apresentados neste relatório são do autor.

Para cópias deste documento, contatar:

Biblioteca Terezine Arantes Ferraz

*Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária
CEP 05508-000 – São Paulo, SP*

Fone: 11 3133-9094

bibl@ipen.br

Para contatos sobre o conteúdo:

Roberto Vicente

*Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária
CEP 05508-000 – São Paulo, SP*

Fone: 11 2810-5879

rvicente@ipen.br

Descontaminação de rejeitos radioativos por ablação com laser

Resumo

O presente trabalho tem como finalidade 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, direcionados à descontaminação superficial dos rejeitos radioativos via ablação a laser. Esta técnica permite a redução no volume desse material a ser tratado e também a possibilidade de reuso. Os materiais escolhidos neste trabalho visam simular os mesmos utilizados nas instalações nucleares.

Descontamination of radioactive waste by laser ablation

Abstract

The purpose of this work is to contribute to the development of methods of treatment in the Radioactive Waste Management Department of IPEN, aimed at the superficial decontamination of radioactive waste via laser ablation. This technique allows the reduction in the volume of this material to be treated and also the possibility of reuse. The materials chosen in this work aimed to simulate those used in nuclear installations.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	08
2. OBJETIVOS.....	13
3. MATERIAIS DE INTERESSE PARA DESCONTAMINAÇÃO.....	14
4. ARRANJO EXPERIMENTAL.....	15
5. CONTAMINAÇÃO DOS MATERIAIS.....	16
5.1. Especificações dos materiais.....	16
5.2. Contaminação.....	17
6. ANÁLISE DOS MATERIAIS.....	19
6.1. Diâmetro de ablação.....	19
6.2. Profundidade linha.....	20
6.3. Pulso único.....	21
6.3.1. Metais.....	21
6.3.2. PVC, polietileno e vinil.....	23
6.3.3. Concreto.....	24
7. DESCONTAMINAÇÃO.....	26
7.1. Acrílico.....	27
7.2. Alumínio.....	29
7.3. Aços.....	30
7.3.1. Duto inox.....	31
7.3.2. Placa inox.....	32
7.3.3. Galvanizado.....	34
7.3.4. Carbono.....	35
7.4. Cobre.....	37
7.5. Concreto.....	38
7.6. Concreto espelhado.....	40
7.7. Chumbo.....	41
7.8. Polietileno.....	43
7.9. PVC.....	44
7.10. Vinil.....	46
8. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....	47
APÊNDICE A – LASERS.....	50
A.1 – Caracterização.....	50
APÊNDICE B - REJEITOS RADIOATIVOS.....	55
APÊNDICE C – DADOS EXPERIMENTAIS.....	57
C.1 - Contagens líquidas dos materiais.....	57
C.2 - Valores médios da taxa contagem normalizada, porcentagem de descontaminação, do fator de descontaminação e da diferença de contagem.....	64
Apêndice D – Análise dos materiais.....	70
D.1 - Diâmetro de ablação.....	70
D.2 - Profundidade linhas.....	77
Apêndice E – Ajuste das contagens normalizadas.....	78
E.1 - Contagens normalizadas médias.....	78
E.2 - Aços (inox, galvanizado e carbono).....	79
E.3 - Metais (alumínio, cobre e chumbo).....	80
E.4 – PVC.....	80
E.5 – Polietileno.....	81
E.6 – Acrílico.....	81
E.7 – Vinil.....	81
E.8 – Concreto.....	82
E.9 - Concreto espelhado.....	82
Anexo – Manual laser.....	83
REFERÊNCIAS.....	85

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas foram realizados investimentos expressivos em pesquisa e desenvolvimento voltados para o gerenciamento dos rejeitos radioativos gerados no país e para sua destinação final [1]. O problema brasileiro não é pequeno por causa das múltiplas aplicações de tecnologia nuclear na geração de energia, na medicina e na indústria, mas também por causa da extensa atividade de mineração no país.

O gerenciamento dos rejeitos radioativos ficará, certamente, ainda mais complicado num futuro próximo, quando algumas instalações nucleares encerrarão sua vida útil e serão, inevitavelmente, descomissionadas. Esse é o caso, por exemplo, do reator do CERPq (Centro de Reator de Pesquisas) do IPEN, que já ultrapassou seis décadas de funcionamento e já demanda pesados investimentos em manutenção para a continuidade de suas operações. Além disso, com a construção do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), o funcionamento do reator do CERPq sofrerá pressão adicional para seu desligamento.

Na Figura 1, se mostra os dutos do sistema de refrigeração que foram substituídos durante a manutenção do reator em 2014 e que estão armazenados aguardando descontaminação para reciclagem dos materiais ou tratamento para deposição como rejeito radioativo. Materiais como esses serão gerados em quantidades muito superiores quando do descomissionamento da instalação.



¹Figura 1: Dutos do circuito primário do sistema de refrigeração, substituídos durante manutenção do reator CERPq, em 2014.

Ainda no IPEN, várias instalações, construídas em escala piloto, resultantes da importante e bem-sucedida empreitada para domínio do ciclo do combustível nuclear, já foram

¹Todas as figuras apresentadas neste relatório sem a fonte foram obtidas pela autora desse relatório.

desmontadas, total ou parcialmente, e os materiais contaminados estão à espera do tratamento. A Figura 2 é uma amostra do montante de materiais contaminados na superfície com radionuclídeos das cadeias de decaimento do urânio e do tório, que resultaram desmontagem. Muito embora esses materiais estejam contaminados em níveis baixos, uma solução definitiva é urgente para evitar o risco de dispersão no ambiente.



Figura 2: Rejeito resultante da desmontagem de instalações piloto do ciclo do combustível nuclear, no IPEN.

Esses rejeitos contaminados na superfície, que são resultantes das diversas práticas que já se encerraram, representam em torno de 80% do volume total de rejeitos radioativos armazenados no IPEN. Em grande parte, esse material pode ser descontaminado e reciclado, diminuindo o volume dos rejeitos radiativos a serem armazenados, e diminuindo, assim, os gastos com a sua gestão. A Figura 3 é uma vista interna do depósito de rejeitos radioativos tratados do IPEN, no qual é limitado o espaço remanescente para armazenar os rejeitos que forem gerados antes da entrada em operação do repositório nacional. A descontaminação dos rejeitos contaminados na superfície, além de poupar espaço de armazenamento, permitirá transforma-los em uma fonte de recursos por meio da venda de materiais valiosos para empresas de reciclagem.



Figura 3: Depósito de rejeitos radioativos do IPEN.

A descontaminação de uma superfície impregnada com material radioativo pode ser realizada de várias formas [2] - simples lavagem, ataque químico, jato de vapor, ataque abrasivo etc..., porém, a maioria desses processos gera rejeitos radioativos secundários, cujo tratamento pode até inviabilizar economicamente a descontaminação.

A ablação das superfícies contaminadas com um feixe de laser, para fins de descontaminação, é, por outro lado, uma alternativa que apresenta uma vantagem muito bem-vinda, pois utiliza apenas fótons como insumo para o processo e evita gerar rejeito radioativo secundário, constituído pelos materiais usados na descontaminação. A deposição da energia do feixe de luz retira o material contaminante da superfície e, ao fim do processo, apenas os aerossóis formados pelo material ejetado precisam ser aspirados e fixados em filtros apropriados. Isso faz com que uma grande área das superfícies contaminadas possa ser limpa, gerando uma quantidade pequena de rejeito – o filtro para aerossol – que pode ser compactado e armazenado em espaço reduzido.

Outras vantagens da ablação com laser são: a) limita a exposição do operador devido à sua aplicação poder ser feita remotamente; b) permite uma melhor prevenção da poluição ambiental ao facilitar o controle do contaminante removido; c) possibilita a limpeza de superfícies com geometria complexa; d) o equipamento é de dimensões reduzidas sendo quase portátil; e) alta qualidade e eficiência de limpeza; f) o tempo de operação pode ser significativamente menor que o de outros processos [3].

A interação luz-matéria que promove a descontaminação, conhecida como ablação laser, deposita uma quantidade expressiva da energia [4] entregue por um feixe laser, a qual aquece, vaporiza e ejeta material superficial. Quando a energia do pulso de laser estar acima do limiar de ablação, o processo retira uma camada com algumas centenas de nanômetros da superfície em tratamento com um único pulso, sendo, em muitos casos, o suficiente para a remoção do contaminante radioativo aderido à superfície. Na Figura 4, se ilustra esse fenômeno.

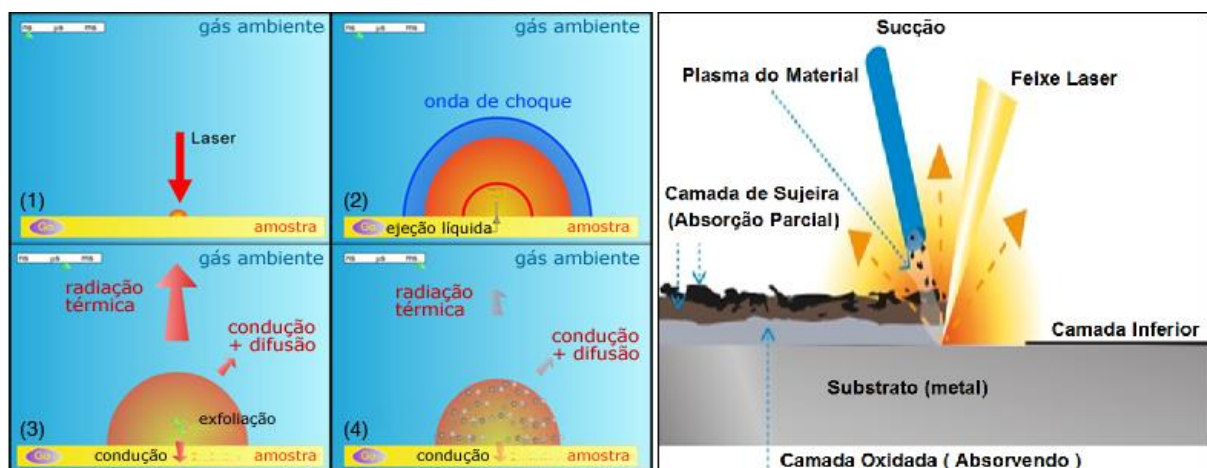


Figura 4: Etapas do processo de ablação laser e formação do plasma com o material ejetado.

A técnica de descontaminação com feixe de laser vem sendo também estudada por outros grupos no exterior, que já mostraram a viabilidade do processo para uma pequena gama de materiais [5-8] em condições específicas, indicando inclusive vantagens econômicas e ambientais [9-11].

No Brasil, o primeiro esforço na aplicação do laser para descontaminação foi realizado a pouco tempo no próprio IPEN, em uma parceria do Centro de Lasers e Aplicações (CELAP) e da Gerencia de Rejeitos Radioativos (SEGRR), com a qual se mostrou a eficiência do processo em partes contaminadas de para-raios radioativos. A remoção da pintura, que cobria os dispositivos e continha o contaminante, com a aplicação de laser [12], retirou até 98% da atividade da contaminação. Interessante também ressaltar que esses para-raios são construídos em cobre, um material de alto valor para reciclagem, e dezenas de toneladas deles estão armazenados, aguardando a descontaminação. A Figura 5, mostra o arranjo experimental e uma fotografia do dispositivo usado nos ensaios.

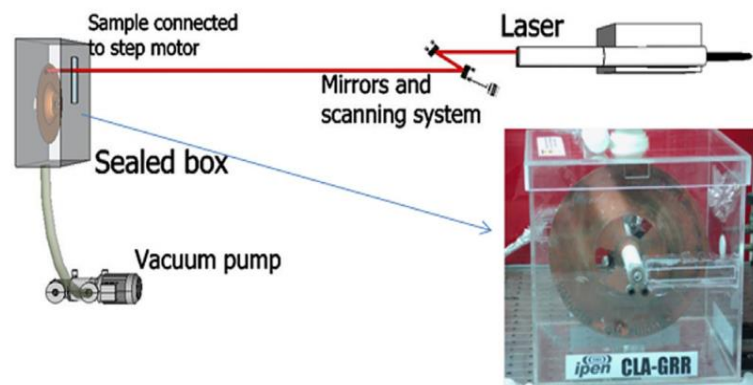


Figura 5: Arranjo experimental do ensaio de descontaminação de para-raios. Fonte: [12].

Em uma segunda etapa, num estudo piloto realizado junto ao CERPq, a aplicação da ablação laser nos dutos retirados do reator, foi realizada utilizando pedaços da tubulação mostrada na figura 1. A Figura 6 é uma fotografia do arranjo experimental. Os fatores de descontaminação foram em média de 85%, medidos por meio do decaimento beta da ^{110m}Ag , em uma única aplicação [13].

O aspecto das superfícies, antes e após a ablação, mostradas na Figura 7, revela as microfissuras no metal que são a razão da pouca eficiência dos métodos tradicionais de descontaminação, frente ao método laser. A contaminação alojada nas frestas é inatingível pelos métodos tradicionais, enquanto que o laser pode acessá-la retirando todo material impregnado e mostrando a superioridade da técnica [13].

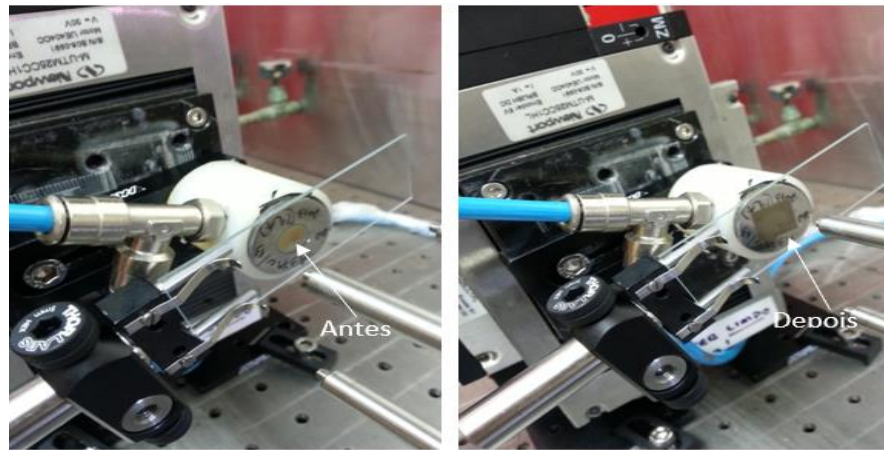


Figura 6: Arranjo para descontaminação de fragmentos dos tubos substituídos no reator do CERPq. Fonte: [13].

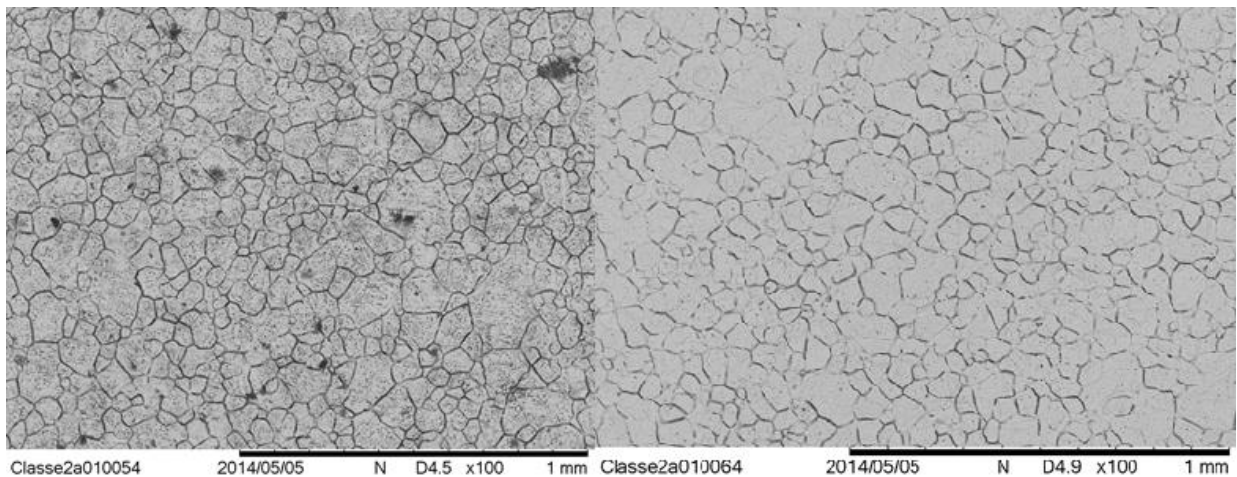


Figura 7: Micrografias obtidas com MEV antes (esquerda) e depois da ablação com laser (direita). Fonte: [13].

O custo dos equipamentos laser vem caindo graças a sua popularização e crescem a cada ano sua confiabilidade e facilidade de uso. Atualmente um sistema dedicado a esse tipo de aplicação já seria economicamente viável, desde que sejam comprovados o uso efetivo e seguro.

No entanto, há ainda muitos pontos a serem pesquisados e desenvolvidos na descontaminação a laser. O desenvolvimento de métodos para a descontaminação dos principais materiais encontrados nos depósitos de rejeitos brasileiros é um tema importante de pesquisa, assim como as técnicas de aplicação e as formas de captura o material contaminante ejetado no processo de ablação.

No uso desse processo para descontaminação, existem três tópicos principais a serem estudados e entendidos para a aplicação comercial:

- Captura dos contaminantes: desenvolver e testar métodos de captura e fixação do contaminante em filtros, após a ablação.
- Determinação de parâmetros para a descontaminação de diferentes materiais:

- Estudar parâmetros como: tipo de laser, potência e intensidade, frequência de pulso, sobreposição de pulso, número de aplicações.
- Refixação do contaminante na superfície por efeitos térmicos convectivos: Avaliar os indícios de que, em alguns casos, o contaminante se fixe mais profundamente na superfície, após a irradiação, por efeito Rayleigh-Bernard-Marangoni [14], em que, não só o gradiente de densidade promove a circulação de um material líquido, mas também seu gradiente de tensão superficial. Na Figura 8, se ilustra o fenômeno.

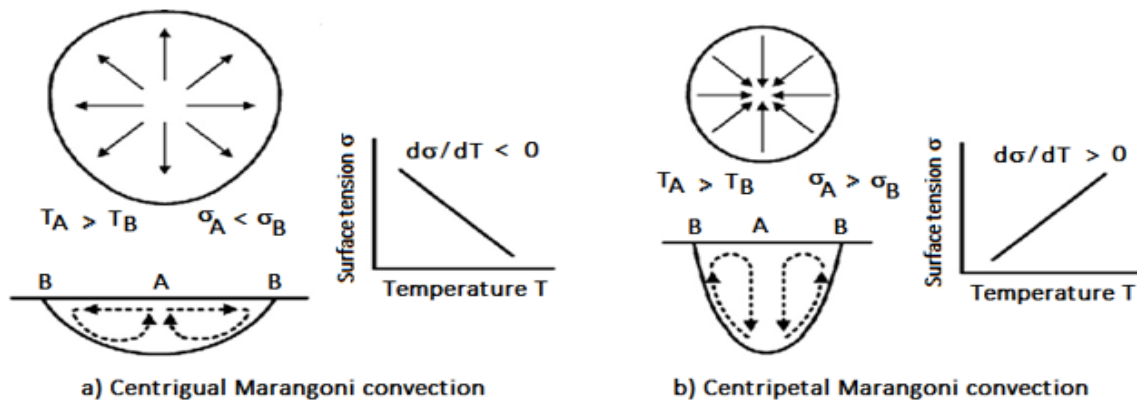


Figura 8: Efeito convectivo promovido por gradiente de tensão superficial decorrente de gradiente de temperatura. Fonte: [14].

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é entender e testar o processo de descontaminação com feixe de laser, por meio de experimentos e estabelecer parâmetros e métodos para serem utilizadas no tratamento de rejeitos.

Os objetivos específicos são:

- Testar diferentes parâmetros de operação de feixes de lasers em relação à capacidade de ablacionar as superfícies e remover contaminantes depositados nelas;
- Determinar a eficiência de descontaminação do laser em diferentes materiais e com diferentes contaminantes, usando métodos radioquímicos e radioanalíticos;
- Avaliar diferentes geometrias de incidência do feixe de laser em relação à capacidade para capturar o material ejetado na ablação;
- Avaliar os métodos de aspiração e captura do contaminante ejetado no processo de ablação;
- Descrever as condições em que pode ocorrer recontaminação da superfície durante a ablação;
- Avaliar a interação feixe de laser com a superfície por meio de microscopia eletrônica de varredura e perfilometria.

3. MATERIAIS DE INTERESSE PARA DESCONTAMINAÇÃO

Na escolha do rejeito de interesse é importante considerar os materiais que poderiam ser descontaminados via laser, porém alguns exercem mais ou menos impacto no gerenciamento dos rejeitos radioativos. Alguns quesitos ajudam a classificar o nível de prioridade nos materiais a serem estudados: materiais de maior volume, de alto custo. Em relação à segurança deve-se priorizar rejeitos que constituam maior risco ao homem e ao meio ambiente e os rejeitos de fácil manipulação ou alta taxa de descontaminação deve ser priorizados.

Para viabilizar o estudo da técnica de descontaminação via laser, foi feito um levantamento dos rejeitos para serem descontaminados, que estão indicados na Tabela 1. Nesta tabela os principais materiais de interesse para descontaminação estão ordenados por prioridade e foram classificados da seguinte forma: o local, a origem, custo para a descontaminação, o volume, os riscos de não-tratamento, a geometria e tipos de tratamento.

²Tabela 1: Materiais de interesse de descontaminação nuclear, local, origem, custo, volume, riscos de não-tratamento, geometria e tipos de tratamento.

Ordem	Material	Local	Origem	Custo	Volume	Risco	Geometria	Tratamentos
1	aço-inox	NF, RF	E, S, P, HC, FH, GB, SH	B	B	B	C	C, CC, M, J
2	Cobre pintado		LR	B	D	B	NC	CC, M, J
3	aço-galvanizado	NF, RF	E, S, P, HC, SH	C	B	C	C	C
4	aço-carbono	NF, RF	E, S, P, HC, FH, GB, SH	D	B	D	C	C, CC, M, J
5	bloco de chunbo	NF, RF	SH	C	E	A	NC	C, CC, J
6	concreto	NF, RF	S, F, W	A	A	A	NC	C, M, J
7	aluminio	NF, RF	E, S,	B	C	D	C	C, CC, M, J
8	vinyl	NF, RF	F	E	B	E	NC	C, J
9	pvc	NF, RF	F, P, FH,	E	C	E	NC	C, CC, J
10	polietileno	NF, RF	E, P	D	C	E	NC	C, CC, J
11	acrilico	NF, RF	FH, GB, HC	E	E	E	NC	C, CC, J

Legenda tabela

NF (instalação nuclear), RF (Radiofarmácia), E (equipamentos), S (estruturas), P (tubulações), HC (células quentes), W (paredes), FH (capela), F (pisos), GB (caixa de luvas), SH (blindagem), LR (para-raios)

Critérios para custo, volume e risco (não-tratamento) = A>B>C>D> E.

Critérios geometria: C (complexa), NC (não complexa).

Tratamentos: C (limpeza), CC (limpeza química), M (remoção mecânica) e J (limpeza por jateamento).

² Todas as tabelas apresentadas nesse relatório foram feitas pela autora desse relatório.

4. ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental (Figura 9) utilizado na descontaminação dos materiais consiste num sistema composto pelo laser de Nd:YAG, capela, espelho, uma lente (foco = 125 mm), porta amostra e o movimentador da amostra. O feixe de laser é direcionado por meio do espelho para o interior da capela e é focalizado na amostra. A amostra foi fixada por meio de uma ventosa utilizando uma bomba química de vácuo e movimentada com o auxílio de um dispositivo servo-mecânico comandado por programa de computador que permite o movimento nas direções horizontal e vertical.

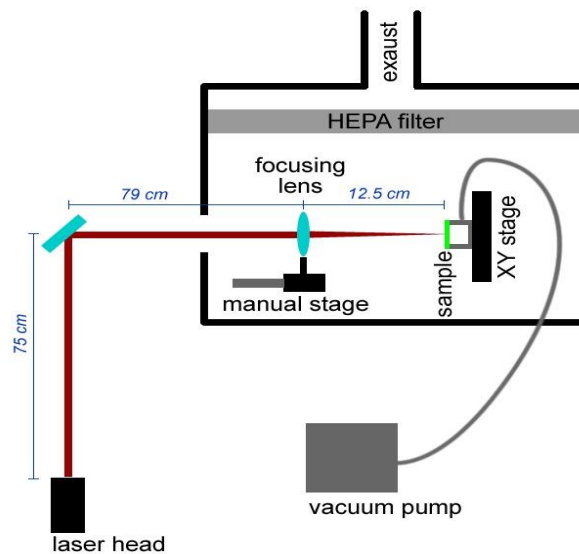


Figura 9: Esquema do arranjo experimental utilizado na descontaminação dos materiais.

Durante a ablação do material ocorre a descontaminação, ou seja, na remoção da sua superfície que neste trabalho foi feita com a sobreposição foi de 50%, para tal no programa de computador foi utilizado o valor do raio do feixe do laser (0,49 mm), cujo cálculo está detalhado no apêndice A (item A.1). Na movimentação da amostra para se garantir que o feixe do laser incida na região da superfície amostra desejada, no programa de computador foram ajustados alguns parâmetros, tais como: o tamanho de passo (raio feixe) e a velocidade (taxa de repetição do laser). A taxa de repetição do laser é de 20 Hz e indica o tempo de formação de cada pulso é de 0,05 s. Para calcular a velocidade foi feita a relação entre o raio do feixe e o tempo de formação de um pulso, que resultou em 10 mm/s. Após esses ajustes foi feito um teste com o auxílio de um laser vermelho, para se verificar se toda a superfície da amostra estava sendo abrangida pelo laser.

5. CONTAMINAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1. Especificações dos materiais

A dimensão das amostras foi limitada pelas dimensões do detector de radiação (LUDLUM measurement inc, model 43-10-1) usado para medir a taxa de contagem antes e após a ablação. As amostras devem ter forma de uma chapa, com diâmetro inferior a 5 cm se circular, ou lado inferior a 3,5 cm se quadrada, e espessura inferior a 5 mm. Na Tabela 2, estão indicadas as dimensões das amostras de cada material.

Tabela 2: Materiais, formatos e suas dimensões.

MATERIAL	FORMATO	LADO/DIÂMETRO (cm)	ESPESSURA (mm)
Chumbo	quadrado	2,5	3,2
Inox	quadrado	2,5	0,5
Galvanizado	quadrado	2,5	0,7
Acrílico	quadrado	2,5	3,0
polietileno	quadrado	2,5	2,0
Cobre	quadrado	2,5	1,0
PVC	quadrado	2,5	1,0
Vinil	quadrado	2,5	2,0
Concreto	circunferência	2,5	3,0
Aço carbono	quadrado	2,5	0,7
alumínio	quadrado	2,5	1,0
Duto inox	quadrado	2,3	3,1
Concreto espelhado	circunferência	2,5	4,0

As amostras metálicas, o vinil e as poliméricas (PVC, acrílico e polietileno) foram confeccionadas na oficina do CELAP por meio de corte com serra manual em retalhos de chapas de sucata. Posteriormente os materiais foram tratados, os metais e polímeros foram lavados com detergente e para os demais (concreto, vinil) foi utilizado apenas uma escova. O concreto foi cortado utilizando uma cortadora metalográfica (marca Bueler, modelo IsoMet 100) na SEGRR, com o diâmetro de 2,5 cm e espessura de 3 mm (Figura 10).



Figura 10: Cortadora metalográfica (esquerda) e placas de concreto (diâmetro: 2,5 cm, espessura: 3 mm).

5.2. Contaminação

A contaminação das amostras foi feita com o radionuclídeo ^{137}Cs no laboratório L3 da SEGRR. A solução padrão utilizada foi fabricada no IRD (17-06-2009) e possui as seguintes especificações: $361,813 \text{ kBq.g}^{-1}$, massa total de 2,592 g, diluído em meio HCl (0,1 M), contida em ampola de vidro lacrada. O valor de atividade dessa solução (938,04 kBq) precisou ser corrigido de acordo com o tempo de decaimento do radionuclídeo (meia vida = 30,07 anos) e resultou em 752,79 kBq. O preparo da solução diluída de césio (Figura 11) utilizada na contaminação das superfícies ocorreu por meio dessas etapas:

- A solução padrão (Figura 11- b) foi dissolvida em um balão volumétrico de vidro de 100 mL (Figura 11- a), lavada com solução de HCl e essa água de lavagem adicionada ao balão;
- Esse balão foi pesado na balança (Mettler Toledo), com precisão de décimo de miligrama, antes (54,2095 g) e depois (56,7424 g) da diluição que resultou numa massa de solução de césio de 2,5329 g;
- Após essa dissolução foram adicionados 97,46 mL para avolumar o que resultou nos valores da atividade e concentração teóricos, respectivamente de: 735,45 kBq e $7,55 \text{ kBq.mL}^{-1}$;
- Essa solução foi dividida em dois frascos de vidros: 20 mL e 80 mL (Figura 11-c);
- A atividade do frasco de 80 mL foi medida no detector Falcon 5000 (Figura 11-d), colocado num saco plástico para proteção e facilitar seu manuseio. A geometria foi calibrada no detector. O valor de concentração obtido foi de $(5,06 \pm 0,30) \text{ kBq.mL}^{-1}$, esse resultado representa 67% do valor teórico.

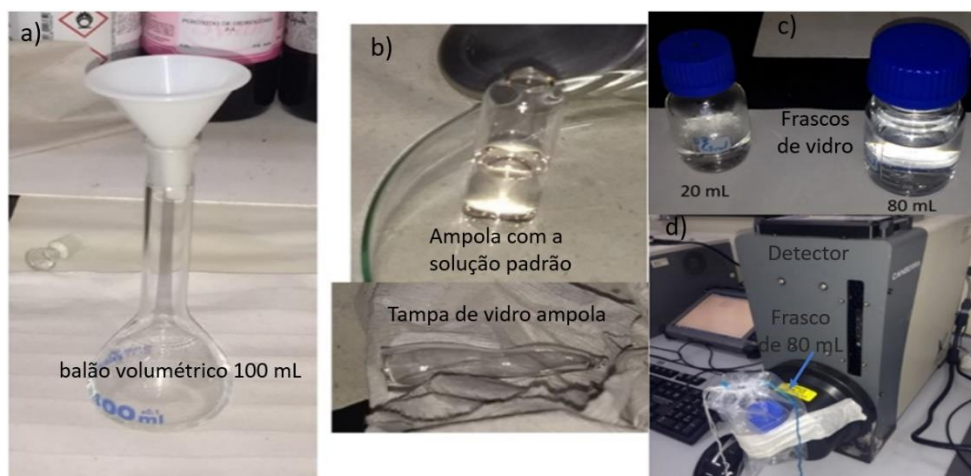


Figura 11: Balão de vidro de 100 mL (a), ampola de solução de césio (b), frascos de vidro com 20 mL e 80 mL (c) e detector Falcon 5000 com o frasco de 80 mL dentro do saco plástico (d).

Neste trabalho optou-se por contaminar as amostras com 1 kBq, valor que está abaixo do limite de dispensa em rejeitos sólidos, dado pela norma 8.01 da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (CNEN, 2014) é de 1×10^4 Bq (quantidades ≤ 1000 Kg) para o ^{137}Cs .

A contaminação dos materiais foi feita no interior da capela, na qual a solução diluída de cézio foi pipetada na superfície das amostras. Para tal foi utilizado o pipetador (P1000) juntamente com uma pipeta de 1 mL que foi calibrada numa balança (marca SHIMADZU AUY220) para garantir que seriam pipetados 0,2 mL, ou seja, o valor correspondente de atividade de 1kBq dessa solução. O processo de contaminação adotado seguiu quatro passos:

- 1) Aquecer uma placa quadrada de aço (16 cm x 16 cm) com uma lâmpada de infravermelho por duas horas;
- 2) Após o aquecimento as amostras foram posicionadas (Figura 12– a e b);
- 3) Após 10 minutos as amostras são pipetadas sempre no meio da amostra para evitar o vazamento do líquido;
- 4) Quando a região contaminada está seca a amostra é retirada da placa, nomeada e colocada numa placa petri (Figura 12 - c).

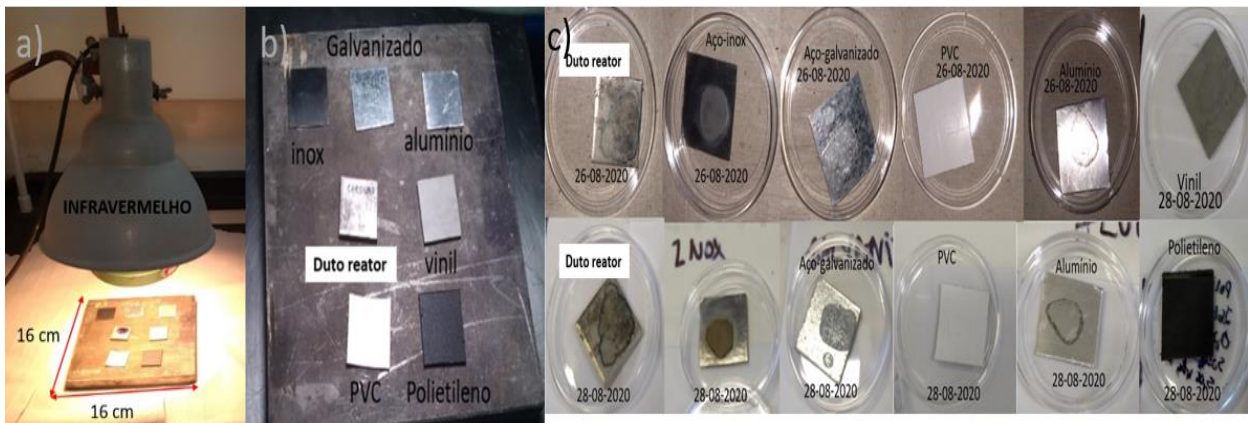


Figura 12: lâmpada + placa (a), placa com as amostras de galvanizado, inox, alumínio, vinil e polietileno (b) e amostras (duto inox, aço inox, aço galvanizado, PVC, alumínio, vinil e polietileno) na placa petri (c).

6. ANÁLISE DOS MATERIAIS

A análise dos materiais visou o estudo dos danos feitos na superfície das amostras após a passagem do laser. Para tal foram analisados alguns parâmetros de interesse, tais como: o diâmetro de ablação e a profundidade removida. Essas análises foram feitas utilizando os seguintes equipamentos: Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV), o perfilômetro e o Microscópio Óptico (MO) do Laboratório Multiusuário do Centro de Lasers e Aplicações do IPEN-CNEN/SP. Essas amostras foram preparadas no mesmo arranjo da Figura 9 reproduzindo os mesmos valores de fluências utilizados no processo de descontaminação.

6.1. Diâmetro de ablação

O diâmetro de ablação analisado nessa etapa para 9 materiais (PVC, polietileno, concreto, vinil, prata, alumínio, inox, galvanizado, duto reator) foi obtido da seguinte forma: durante o processo de ablação foi feita uma parada e este último pulso feito pelo laser que foi medido. As imagens desses pulsos obtidas no MEV, MO e perfilômetro estão indicadas no apêndice D, item D.1.

Os valores dos diâmetros médio ($D_{\text{médio}}$) e total (D_{total}) foram calculados no software *ImageJ*, considerando o diâmetro horizontal e vertical de cada pulso, sendo o D_{total} a combinação dos dois resultados dos obtidos no MEV e do MO, cujos valores estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores dos diâmetros médios ($D_{\text{médio}}$) de 9 amostras ablacionadas (PVC, polietileno, concreto, vinil, prata, alumínio, inox, galvanizado, duto reator) para os diferentes valores de fluência no MEV e no microscópio óptico (MO) em função de diferentes valores de fluência.

Amostras	$D_{\text{médio}}$ (mm) 1 J.cm ⁻²		D_{total} (mm)	$D_{\text{médio}}$ (mm) 5 J.cm ⁻²		D_{total} (mm)	$D_{\text{médio}}$ (mm) 10 J.cm ⁻²		D_{total} (mm)
	MEV	MO		MEV	MO		MEV	MO	
PVC	0,36	0,45	0,41	0,48	0,51	0,49	0,47	0,52	0,50
Polietileno	0,39	0,38	0,39	0,50	0,47	0,48	0,51	0,57	0,54
concreto	0,29	0,31	0,30	0,52	0,40	0,46	0,67	0,39	0,53
Vinil	0,35	0,45	0,40	0,46	0,53	0,49	0,68	0,57	0,62
prata	0,51	-	0,51	0,78	0,70	0,74	0,62	0,77	0,69
alumínio	0,44	0,32	0,38	0,49	0,69	0,59	0,63	0,78	0,71
Inox	0,56	0,26	0,41	0,64	0,59	0,62	0,68	0,66	0,67
galvanizado	0,69	0,37	0,53	0,71	0,69	0,70	0,67	0,74	0,71
Duto reator	0,53	-	0,53	0,76	-	0,76	0,53	-	0,53

A partir da Tabela 3 pode-se notar que para o duto e a prata (apenas para 1 J.cm⁻²) não foi possível medir o diâmetro no Microscópio Óptico, pois nas imagens as granulações na sua superfície e apresentam os mesmos padrões de sobreposições esperados pelo laser. O MEV apresentou uma resolução melhor e possibilitou a análise de todas as amostras.

No perfilômetro foi medida a profundidade desse diâmetro cujos valores, estão indicados na Tabela 4, e foram inconclusivos.

Tabela 4: Valores de profundidade (E) de 9 amostras (aços, alumínio, prata, PVC, vinil e concreto) em função de diferentes valores de fluência.

Amostras	E(μm)	E(μm)	E (μm)
	1 J.cm ⁻²	5 J.cm ⁻²	10 J.cm ⁻²
Alumínio	0,99	1,44	1,02
Prata	1,03	0,66	0,46
PVC	13,87	18,74	22,71
Galvanizado	1,08	1,80	1,67
Vinil	23,98	10,53	19,29
Concreto	27,17	29,79	36,53
Inox	2,15	8,28	0,59
polietileno	20,13	12,18	17,49
Duto reator	8,87	13,55	12,81

6.2. Profundidade linha

No intuito de se determinar a profundidade, ou seja, o quanto de material foi removido, foi feito um teste com uma amostra de aço inox, na qual a amostra foi pesada antes e depois da ablação numa balança com 4 dígitos de precisão, os valores obtidos não apresentaram diferença. A partir daí foram feitos traços na amostra de aço inox conforme exemplificado na Figura 13, em forma de linha na qual o laser passou 100 vezes na mesma região e esta foi analisada no perfilômetro. A análise foi feita em 5 regiões diferentes, na qual fiz uma média desses valores obtidos e seu respectivo desvio padrão que resultou em $(3,6 \pm 0,3) \mu\text{m}$, as imagens estão ilustradas no apêndice D, item D.2. Este mesmo experimento foi repetido e acabou não sendo conclusivo.

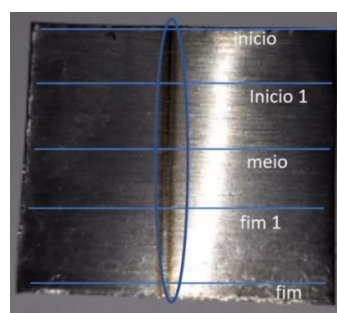


Figura 13: Aço inox ablatado com 1 J.cm⁻² numa mesma direção 100 vezes.

As imagens foram obtidas no MEV, para cada um desses 10 materiais, com dois aumentos diferentes de modo a permitir que sejam identificadas: a região na qual ocorreu a ablação indicada por um círculo (pulso) e o outro aumento para verificar se houve formação de gotículas ou espalhamento de material ablatado. Essas imagens estão indicadas por subitens, ordenadas da seguinte forma: metais (6.3.1.); PVC, polietileno e vinil (6.3.2.) e concretos (6.3.3.).

6.3. Pulso único

Nesta etapa foram feitos pulsos únicos para cada valor de fluência, para se verificar se há espalhamento do material ablaçionado, em 10 materiais (inox, carbono, galvanizado, alumínio, PVC, concretos, cobre, chumbo, vinil e polietileno) ilustrados na Figura 14. Nota-se que para todos materiais quanto maior a fluência maior o diâmetro do pulso, porém em alguns esses diâmetros são menos visíveis, como por exemplo, no concreto. Os pulsos que são mais visíveis nas superfícies de alguns metais (inox, carbono, alumínio e no chumbo) e no PVC.



Figura 14: Imagens dos 10 materiais (inox, carbono, galvanizado, alumínio, PVC, concretos, cobre, chumbo, vinil e polietileno) que foram ablaçionados com um pulso único para as fluências de (10, 5 e 1) J.cm⁻².

6.3.1. Metais

As imagens do MEV dos pulsos únicos para as diferentes fluências para os aços (inox, galvanizado e carbono), alumínio, cobre e chumbo estão indicados nas Figura 15 a Figura 17.

Para identificar a região na qual ocorreu a formação do pulso os aumentos variaram de: x100 (carbono), x120 (chumbo) e x150 (inox, galvanizado, cobre e alumínio). Em relação ao maior aumento variou de: x1000 (aços, chumbo), x500 (alumínio) e x600 (cobre). A identificação na região na qual se formou o pulso é mais nítida nas amostras do inox, galvanizado, cobre e chumbo. Ocorreu a formação de gotículas/ materiais espelhado observáveis nos seguintes materiais: inox (1 e 5) J.cm⁻², galvanizado (5 e 10) J.cm⁻², alumínio (5 e 10) J.cm⁻², cobre (5 e 10) J.cm⁻² e chumbo (1 e 10) J.cm⁻². Além disso, nas imagens do alumínio (Figura 16) para a fluência de 5 J.cm⁻² é possível notar pontos mais claros que indicam que houve saturação dos elétrons nessa região analisada.

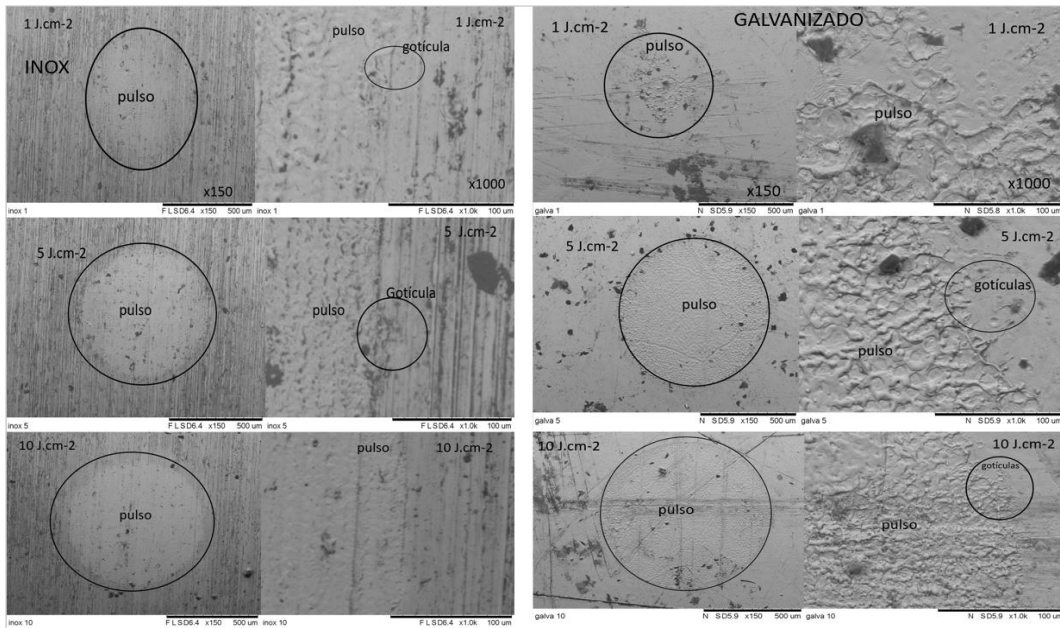


Figura 15: Imagens do MEV dos pulsos únicos no aço inox (esquerda) e galvanizado (direita), com dois aumentos (x150, x1000) para as diferentes fluências.

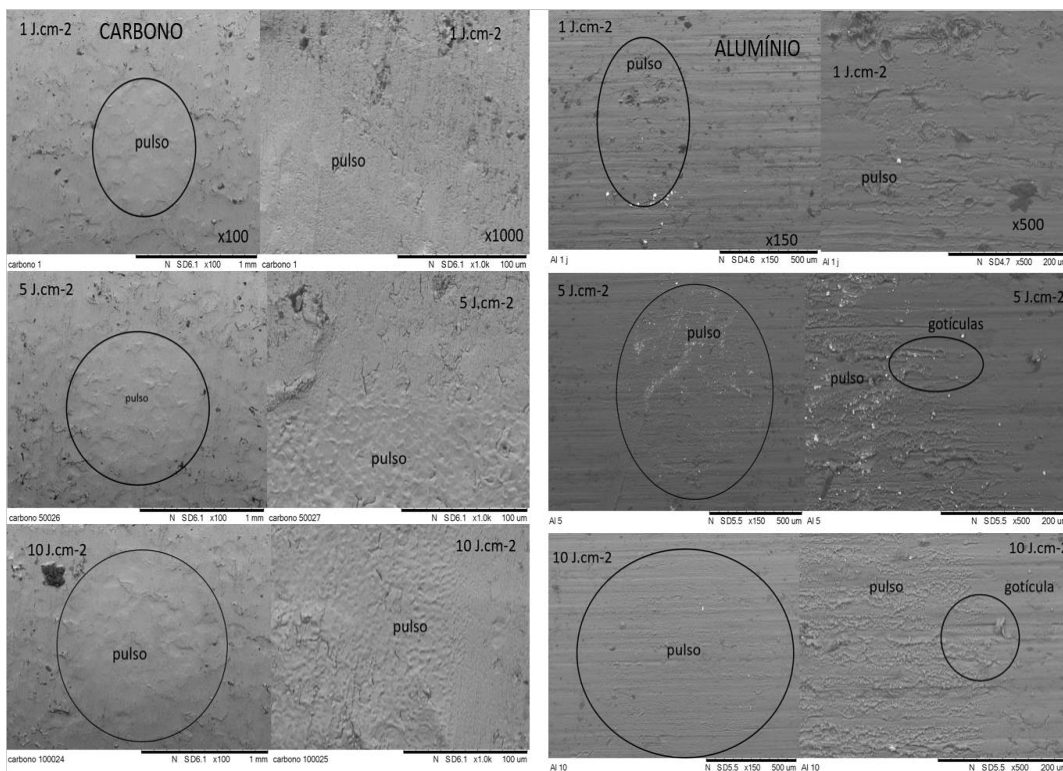


Figura 16: Imagens do MEV dos pulsos únicos no aço carbono (esquerda) e alumínio (direita) com dois aumentos para diferentes fluências.

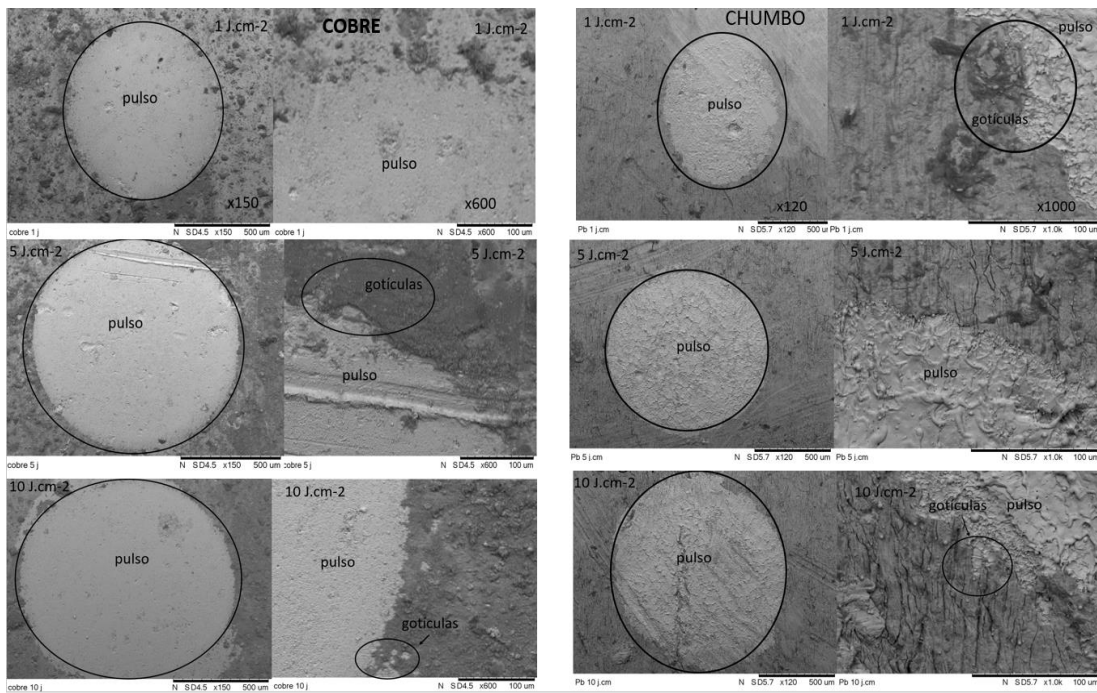


Figura 17: Imagens do MEV dos pulsos únicos no cobre (esquerda) e chumbo (direita) com dois aumentos para diferentes fluências.

6.3.2. PVC, polietileno e vinil

As imagens do MEV (Figura 18, Figura 19) obtidas dos pulsos únicos para as diferentes fluências para os seguintes materiais: PVC, polietileno e vinil.

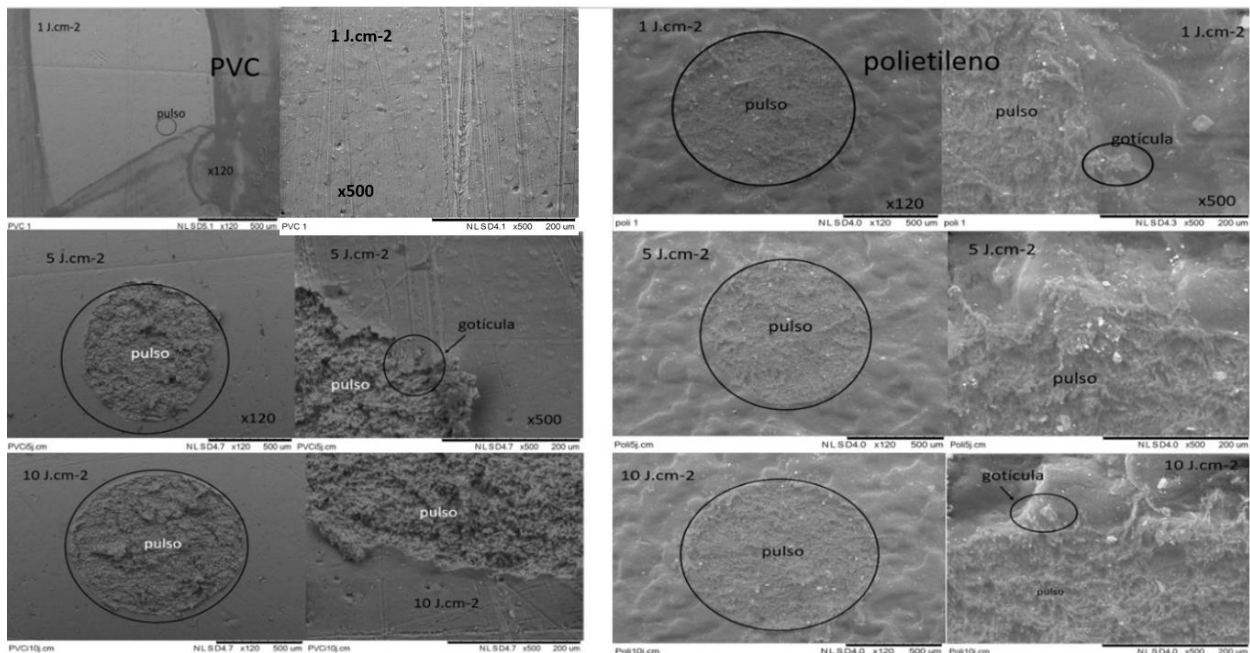


Figura 18 Imagens do MEV dos pulsos únicos no PVC e polietileno, com dois aumentos (x120, x500) para diferentes fluências.

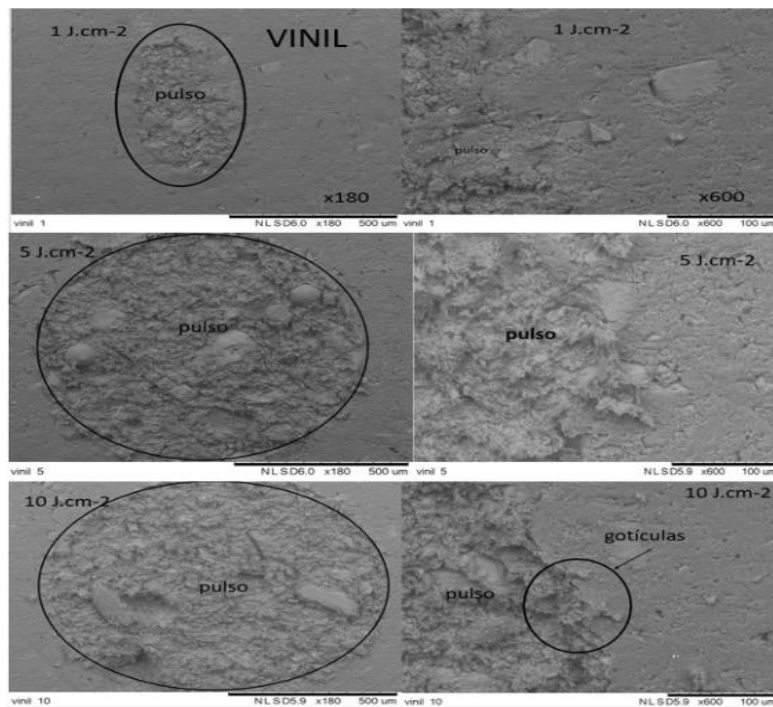


Figura 19 Imagens do MEV dos pulsos únicos no vinil com dois aumentos (x180, x600) para diferentes fluências.

A região na qual ocorreu a formação do pulso os aumentos foram de x120 (PVC, polietileno) e x180 (vinil). Na fluência de 1 J.cm⁻² para o PVC (Figura 18) é possível notar que na região do pulso fez um dano apenas superficial e mesmo com um aumento maior não foi possível visualizar mais detalhes. A formação de gotículas/espalhamento de materiais observáveis ocorreu: no PVC para 5 J.cm⁻², polietileno (1 e 10) J.cm⁻² e vinil com 10 J.cm⁻². As imagens do polietileno (5 e 10) J.cm⁻² estão mais claras devido a saturação dos elétrons na região.

6.3.3. Concreto

Na Figura 20, estão indicadas respectivamente as imagens do MEV dos pulsos únicos do concreto e concreto espelhado. Para identificar a região na qual ocorreu a formação do pulso o aumento foi de x150. A formação de gotículas/ espalhamento de materiais observáveis ocorreu: para o concreto com 5 J.cm⁻² e concreto espelhado de (1 e 5) J.cm⁻².

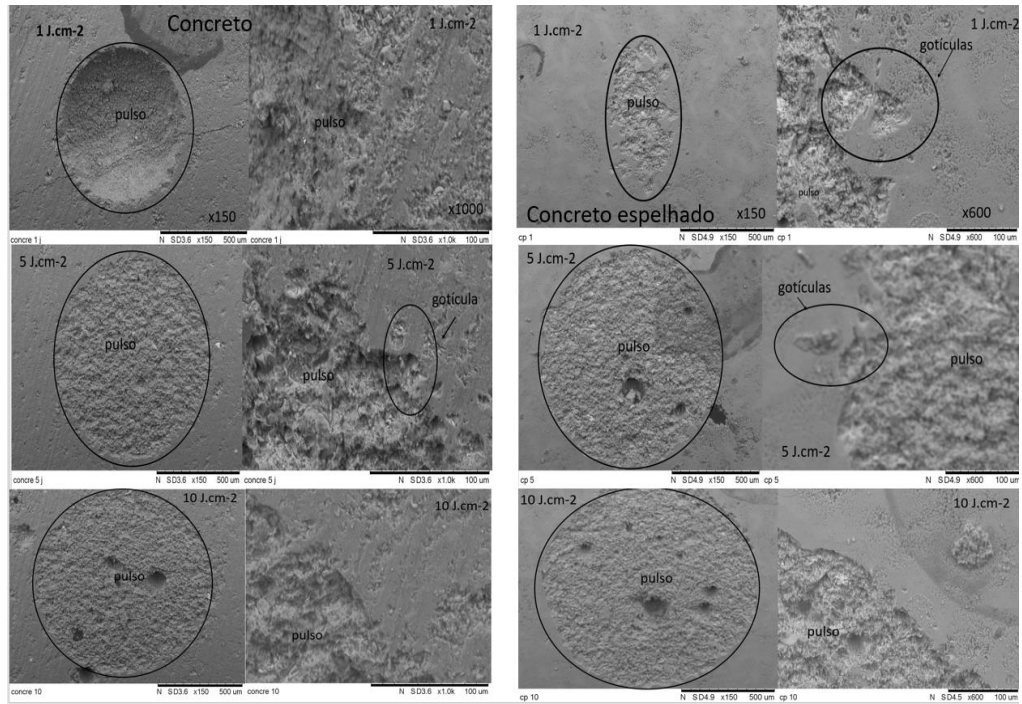


Figura 20 Imagens do MEV dos pulsos únicos no concreto (esquerda – x150, x1000) e concreto espelhado (direita – x150, x600) com dois aumentos para as diferentes fluências.

7. DESCONTAMINAÇÃO

No processo de descontaminação as amostras foram analisadas em triplicadas e com três valores diferentes de fluência (1, 5 e 10) J.cm⁻². O arranjo utilizado está indicado na Figura 9. A amostra que foi descontaminada foi medida antes e após a aplicação do laser no detector (LUDLUM measurement inc, model 43-10-1), cujo os valores de taxa de contagem foram ajustados para o tempo de 1 minuto e devido ao tipo de radionuclídeo foi anotado apenas os valores referentes as contribuições beta e gama. Toda a superfície da amostra foi ablacionada, ou seja, além da região da contaminada. O critério adotado no processo de descontaminação para se definir quantas vezes se aplicar o laser na amostra foi de: passar pelo menos quatro vezes de modo a garantir que pelo menos 50% do material foi removida ou até que a contagem atinja o mesmo valor da radiação de fundo.

Os valores das taxas de contagens brutos foram subtraídos dos da radiação de fundo, em seguida esses valores foram normalizados utilizando a equação 1, na qual o valor de contagem inicial (C₀), ou seja, antes da passagem do laser para as amostras. Esses valores foram diferentes para as amostras portanto para fins de comparação foi feito um cálculo da taxa contagem normalizada (C_n). Este cálculo considera o valor inicial como sendo de 100% e a partir desse valor compara com os demais após cada passagem do laser, onde C_i indica a contagem do detector após a passagem do laser.

$$C_n = \left(\frac{C_i}{C_0}\right) \quad i = 1,2,3,4 \quad \text{equação 1}$$

Para avaliar a descontaminação foram calculados dois parâmetros: a porcentagem de descontaminação (k) dado em porcentagem (equação 2) e o fator de descontaminação (F) indicado na equação 3, todos utilizando os dados da taxa de contagem normalizada. De forma complementar foi feito o cálculo da diferença das taxas contagens foi calculada (D_n) indicada na equação 4.

$$k(\%) = \left(\frac{C_0 - C_i}{C_0}\right) \times 100 \quad i = 1,2,3,4 \quad \text{equação 2}$$

$$F = \frac{C_i}{C_{i+1}} \quad i = 0,1,2,3,4 \quad \text{equação 3}$$

$$D_n = C_i - C_{i+1} \quad \text{equação 4}$$

A curva com os dados experimentais da taxa de contagem normalizada foi ajustada software Origin, no modelo expdecay1, cuja a função de ajuste está indicada na equação 5. Onde y indica a contagem normalizada (C_n) e x é o número de passagens do laser.

$$y = y_0 + A_1 \cdot e^{-x/t_1} \quad \text{equação 5}$$

Os dados das taxas contagens líquidas dos materiais estão indicadas no apêndice C, em forma de tabelas e no apêndice E estão os dados do ajuste da função normalizada que estão organizadas em itens. No item E.1. estão os valores obtidos das contagens médias para as diferentes fluências (em três tabelas). Para os demais itens de cada amostra de cada material tem-se: no item E.2. aços (inox, galvanizado e carbono), E.3. metais (alumínio, cobre e chumbo), E.4. PVC, E.5. polietileno, E.6. acrílico, E.7. vinil, E.8. concreto e o E.9. concreto espelhado.

Nesta etapa os resultados médios da contagem normalizada ($C_{n\text{ média}}$), o fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e diferença das taxas contagens ($D_{n\text{ médio}}$) estão indicados nos subitens (7.1. a 7.10.) em forma de gráficos. Além disso, as imagens feitas por uma câmera digital antes e após cada ablação estão indicadas, de modo que: 0x, 1x, 2x, 3x e 4x equivalem ao número de passagem do laser.

7.1. Acrílico

Os valores médios taxa da contagem normalizada ($C_{n\text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), a porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n\text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência do acrílico estão indicados na Figura 21. Neste experimento a fluência de 10 J.cm^{-2} apresentou o maior valor de fator de remoção que foi igual 2. A porcentagem de descontaminação variou de 17% a 56%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. Na Figura 22 estão ilustradas as imagens das amostras descontaminadas, a região contaminada está indicada num círculo que mostra a formação de riscos bem claros e após a ablação a superfície sofreu apenas pequenas alterações, como por exemplo, alguns riscos e formação de círculos para a fluência de 10 J.cm^{-2} .

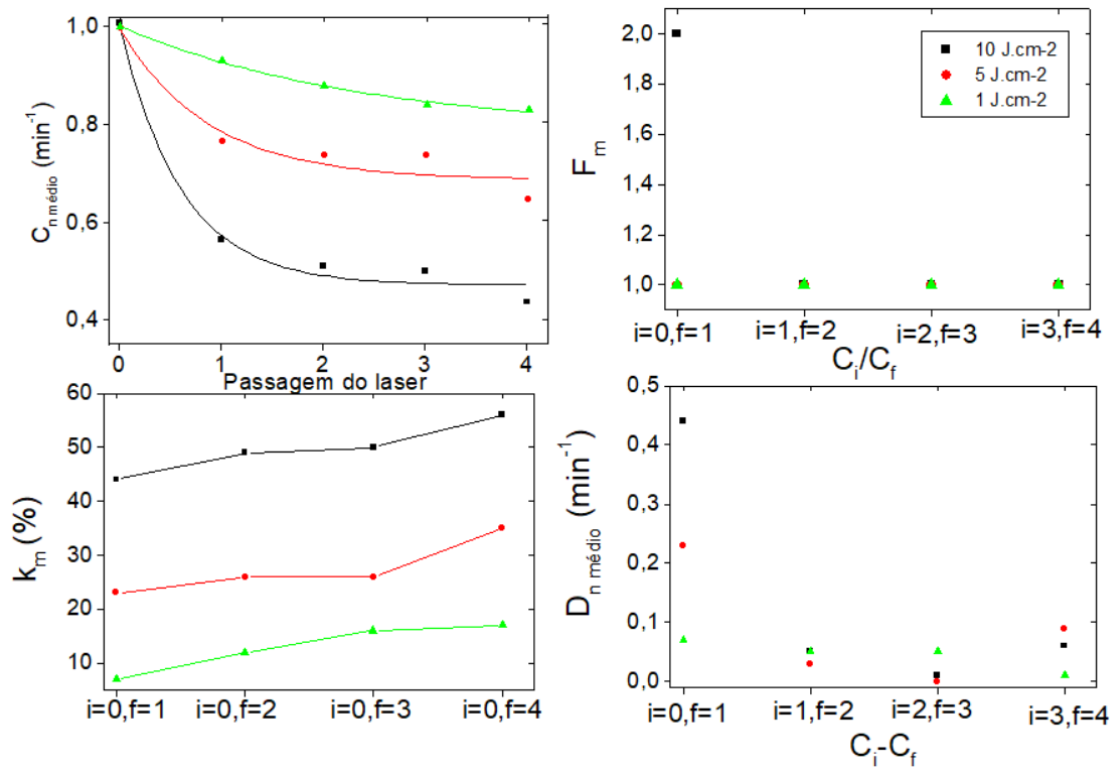


Figura 21: Valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n\text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e diferenças das taxas de contagens ($D_{n\text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o acrílico.

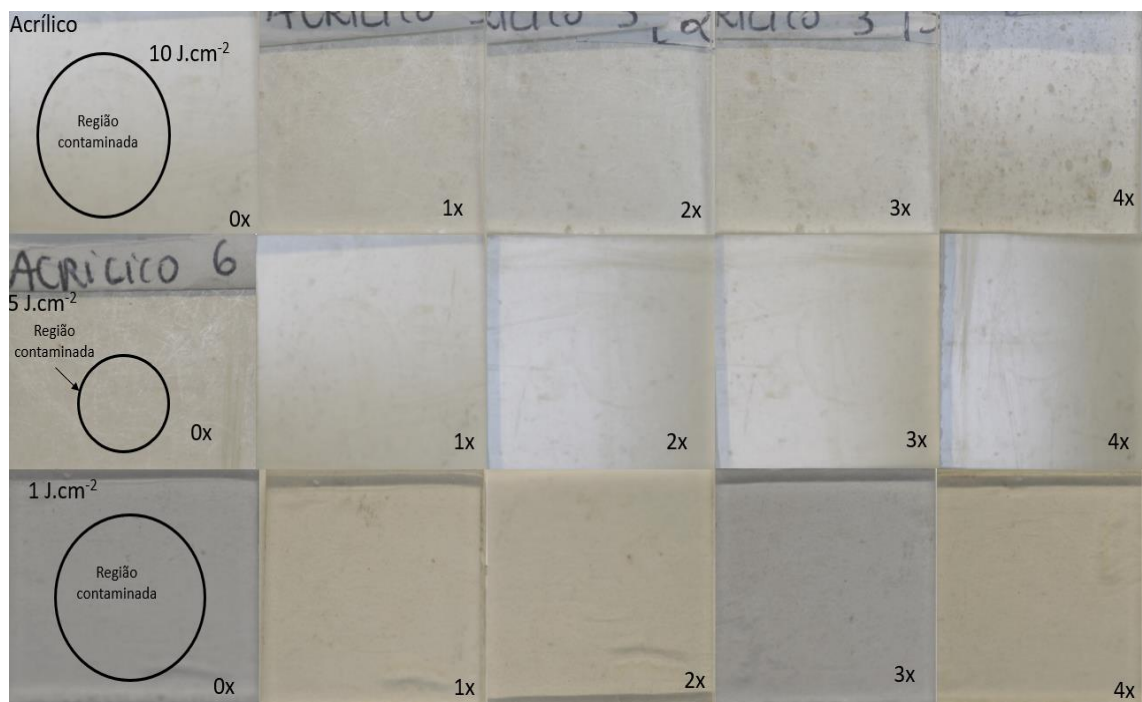


Figura 22: Imagens da câmera digital do acrílico ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) J.cm⁻².

7.2. Alumínio

Os valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n\text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e as diferenças das taxas de contagens ($D_{n\text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o alumínio estão indicados na Figura 23. O maior valor de fator de remoção foi para a fluência de 10 J.cm^{-2} . A porcentagem de descontaminação variou de 87% a 97%, na última passagem do laser considerando todos os valores de fluência. Na Figura 24 está ilustrado as imagens das amostras descontaminadas, das quais é possível notar que a superfície vai escurecendo para as fluências de (5 e 10) J.cm^{-2} , e para a de 10 J.cm^{-2} nota-se que após a quarta passagem do laser a superfície tem o aspecto queimado. Para 1 J.cm^{-2} em relação a superfície ablacionada, nota-se que há um clareamento apenas na região contaminada.

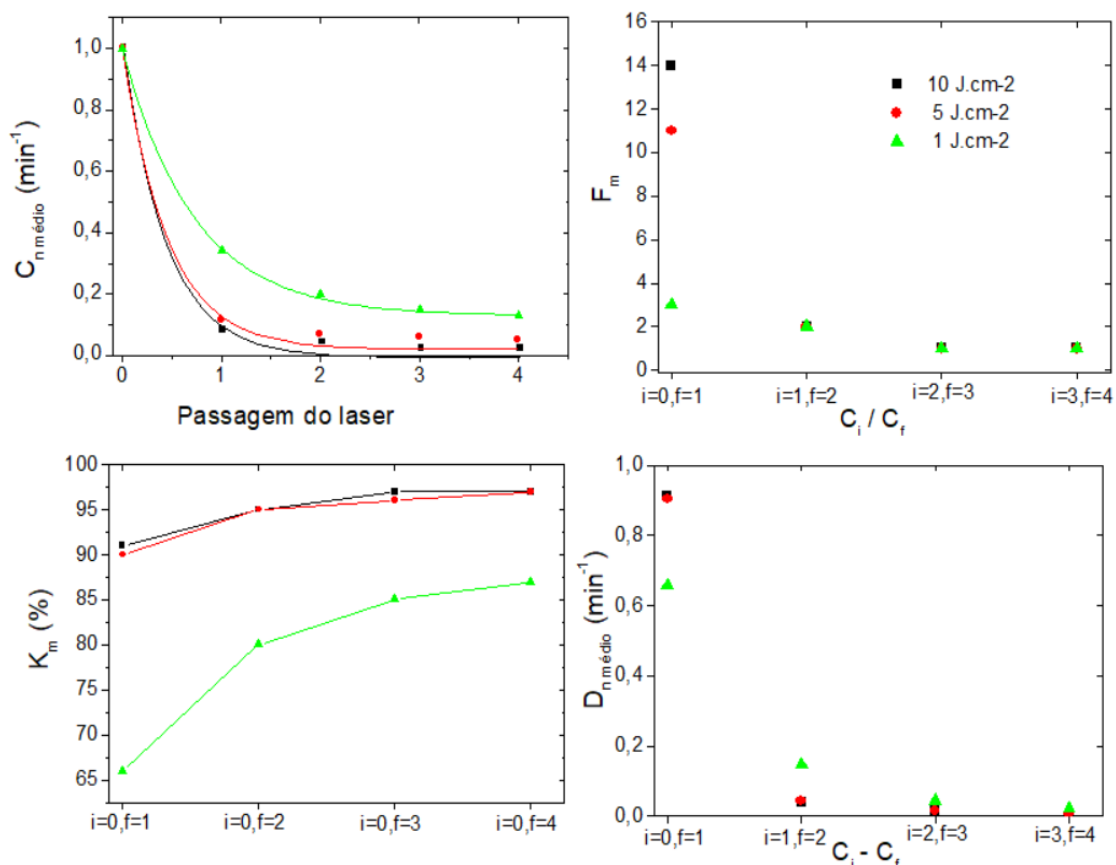


Figura 23: Valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n\text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n\text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o alumínio.

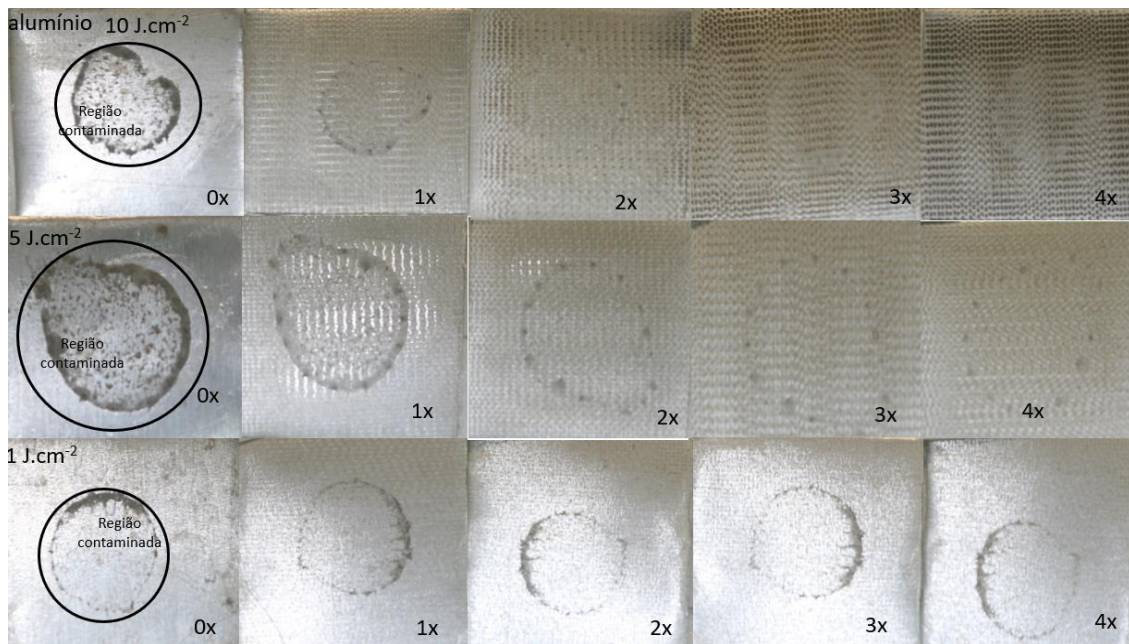


Figura 24: Imagens da câmera digital do alumínio ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) $J.cm^{-2}$.

7.3. Aços

Nesta parte estão os resultados dos aços que foram descontaminados: inox, galvanizado e carbono. No caso do aço inox foram utilizados dois tipos de amostras: o duto e uma placa. O duto é oriundo do reator IEA-R1 (CNEN-SP). O arranjo experimental (Figura 9) foi alterado durante a descontaminação do duto, no qual inicialmente foi acrescentado entre a lente um suporte que contém um filtro (Figura 25), para se coletar o material produzido pela pluma durante a descontaminação. Após uma análise prévia e devido a algumas condições experimentais do laboratório foi decidido remover o filtro.



Figura 25: Arranjo ablação com filtro.

7.3.1 Duto inox

Os valores da taxa de contagem normalizada (C_n), o fator de descontaminação (F), porcentagem de descontaminação (k) e a diferenças das taxas de contagens (D_n) estão indicados respectivamente na Figura 26. A porcentagem de descontaminação variou de 79% a 99%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. O maior fator de descontaminação do material radioativo foi de 1 J.cm^{-2} . Os gráficos da contagem normalizada e da diferença de contagem possuem um aspecto similar. As amostras foram ablacionadas (Figura 27) no mínimo 4 vezes, nota-se que após a passagem laser a superfície clareou e na região contaminada nota-se que se inicia um processo de oxidação (1 J.cm^{-2}). Para a fluência de $0,5 \text{ J.cm}^{-2}$ foi apresentada apenas duas fotos (0x e 5X), pois como as imagens digitais foram implementadas como etapa posterior a esse experimento e para essa fluência foi aplicada apenas nesse material optei por tirar foto de todas as etapas apenas para as três fluências em comum de todos os materiais. Nas fluências de maior energia nota-se que o fator de descontaminação desce e em relação a porcentagem de descontaminação apresentou o valor de 94% para 10 J.cm^{-2} , ou seja, removeu menos que para 1 J.cm^{-2} que foi de 99%. Esse fato pode ser atribuído a um possível processo de recontaminação na qual o material contaminado pode ter aderido camadas mais internas dificultando sua remoção. Para este material a descontaminação não foi feita em triplicata, o duto foi usado inicialmente para testar o arranjo.

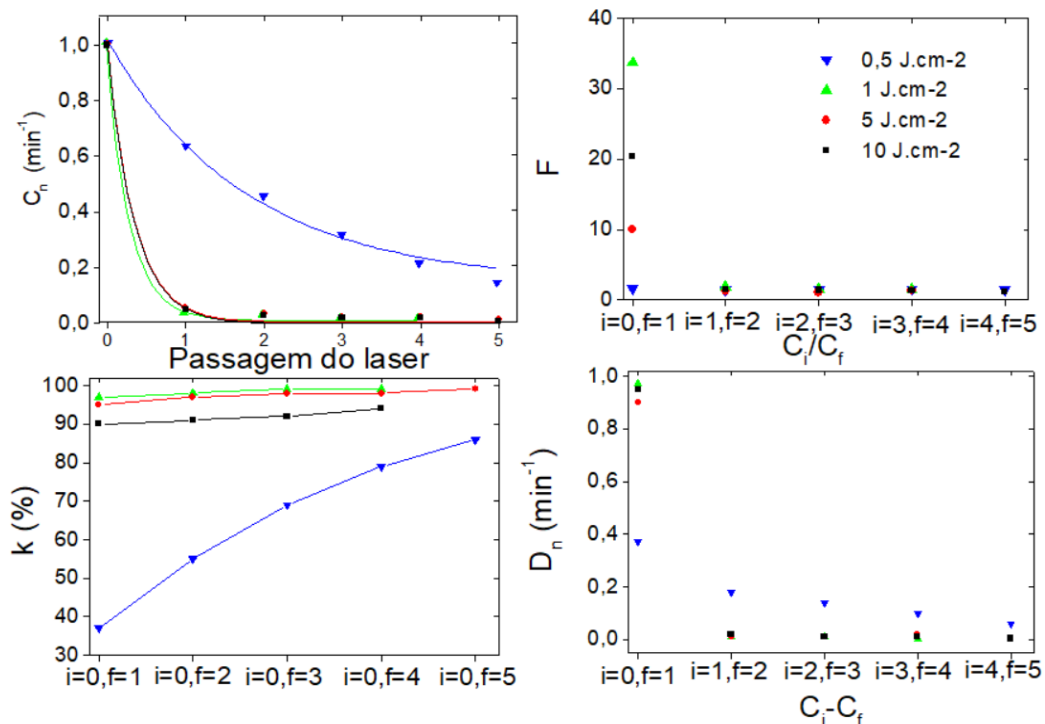


Figura 26: Taxa de contagem normalizada do duto inox com o ajuste de função, fator de descontaminação (F), porcentagem de descontaminação (k) e diferença da taxa de contagem (D_n) para diferentes valores de fluência.

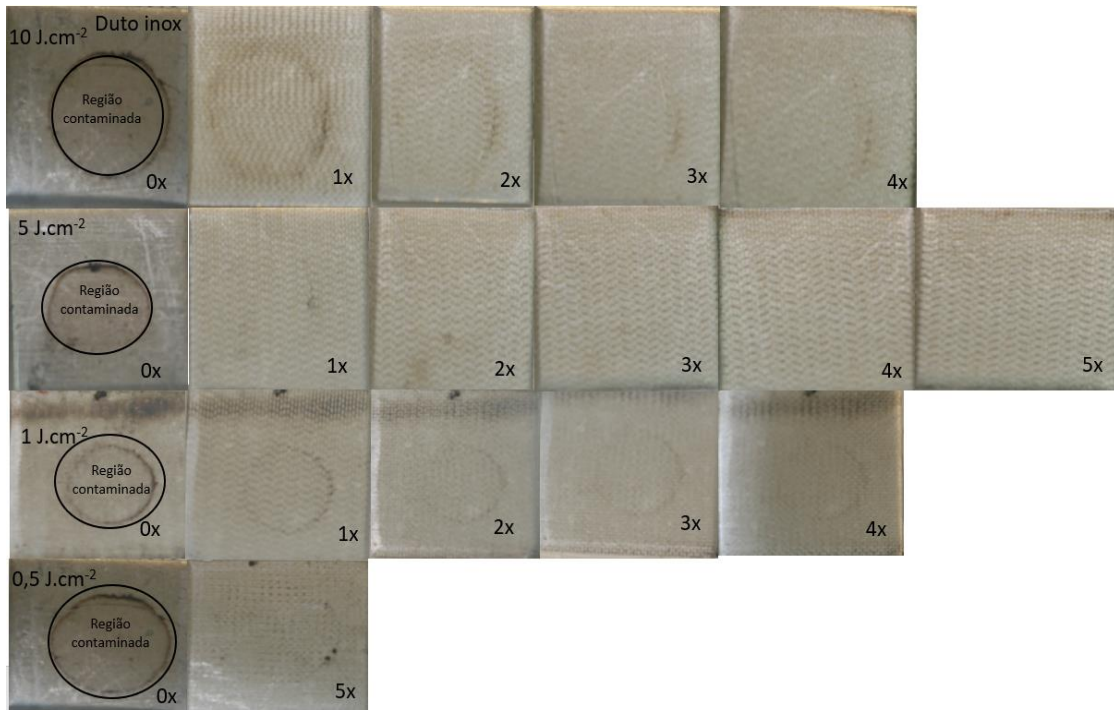


Figura 27: Imagens do duto antes e após a descontaminação para os valores de fluência de (0,5; 1; 5 e 10) J.cm^{-2} .

7.3.2 Placa inox

Os valores médios da taxa de contagem normalizada (C_n médio), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens (D_n médio) para o aço inox os diferentes valores de fluência estão indicados na Figura 28. O maior valor de fator de remoção foi para a fluência de 5 J.cm^{-2} . A porcentagem de descontaminação variou de 83% a 94%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. Na Figura 29 estão ilustradas as amostras descontaminadas após as passagens do laser, nota-se que a região contaminada vai clareando e para (10 e 5) J.cm^{-2} temos a oxidação da placa no redor da região contaminado.

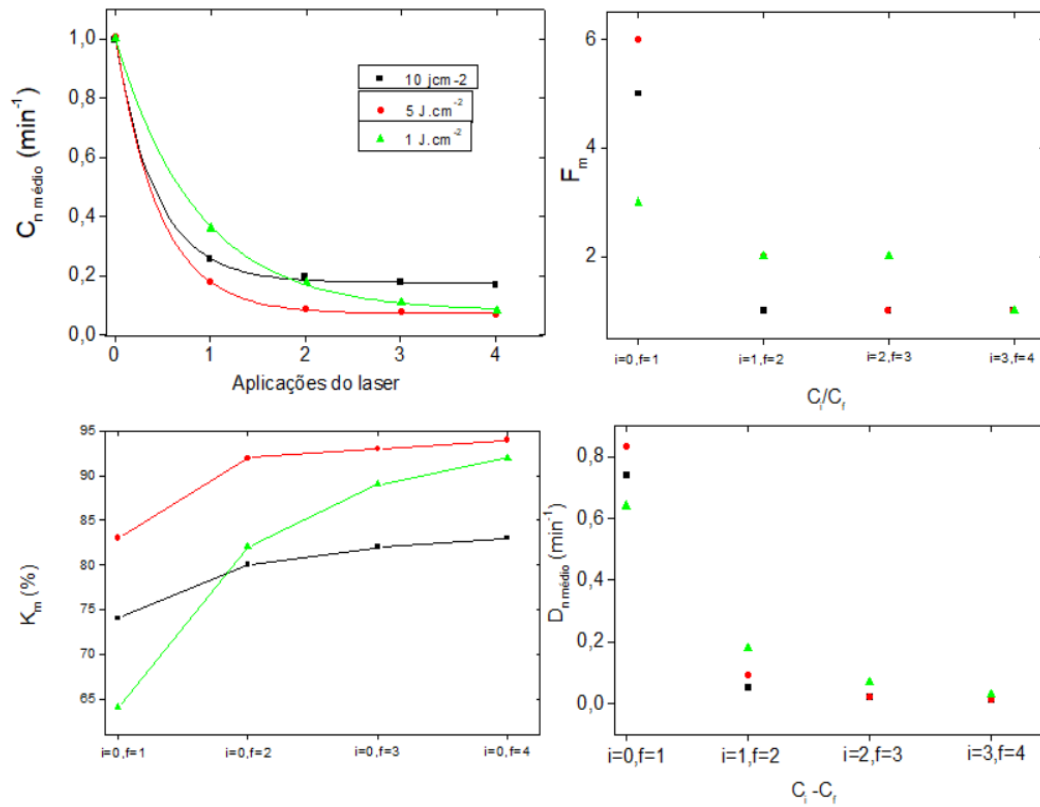


Figura 28: Valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (K_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o aço inox.

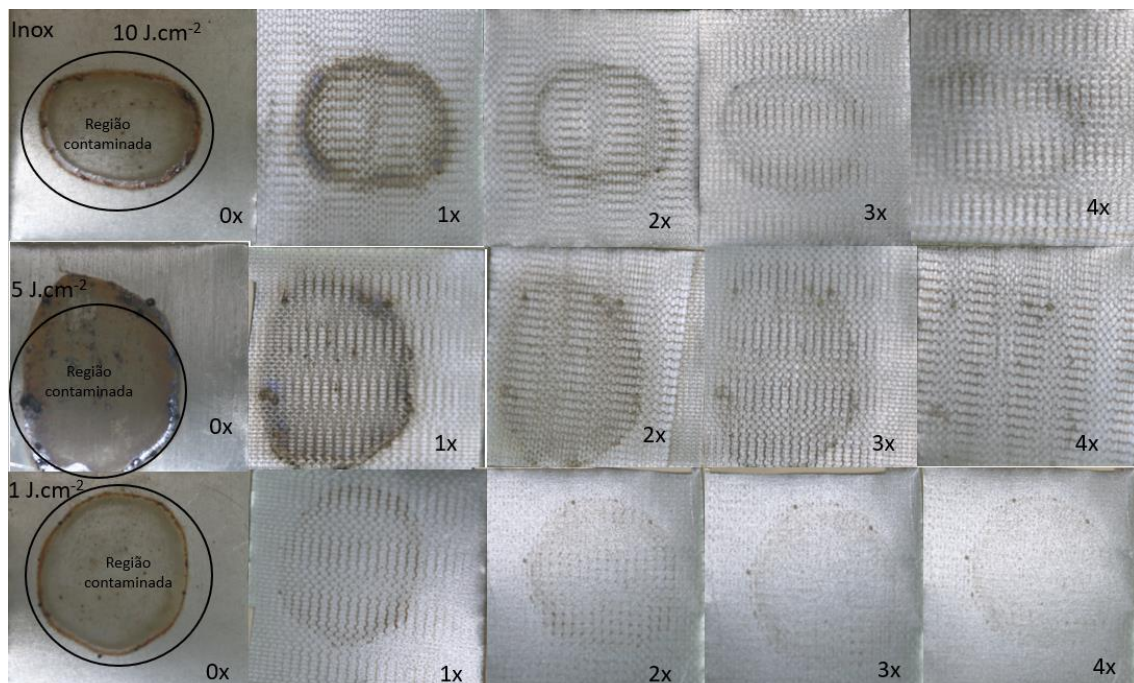


Figura 29: Imagens da câmera digital do inox ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) J.cm⁻².

7.3.3 Galvanizado

Os valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) para o aço galvanizado os diferentes valores de fluência estão indicados na Figura 30. A fluência de 10 J.cm^{-2} apresentou o maior valor de fator de remoção. A porcentagem de descontaminação variou de 99% a 100%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. Na Figura 31 estão ilustradas as amostras descontaminadas utilizando as fluências de ($10, 5$ e 1) J.cm^{-2} após as passagens do laser. A amostra clareou para a fluência de 1 J.cm^{-2} e apresentou um aspecto queimado e oxidou (5 J.cm^{-2}).

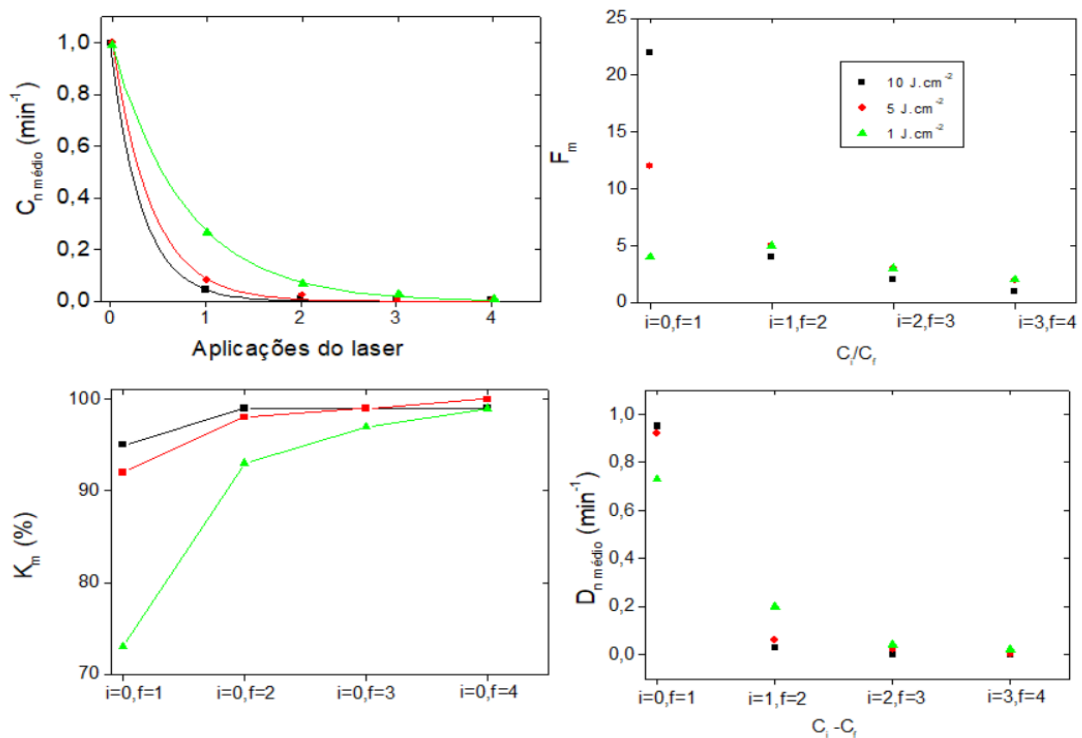


Figura 30: Valores médios das contagens normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o aço galvanizado.

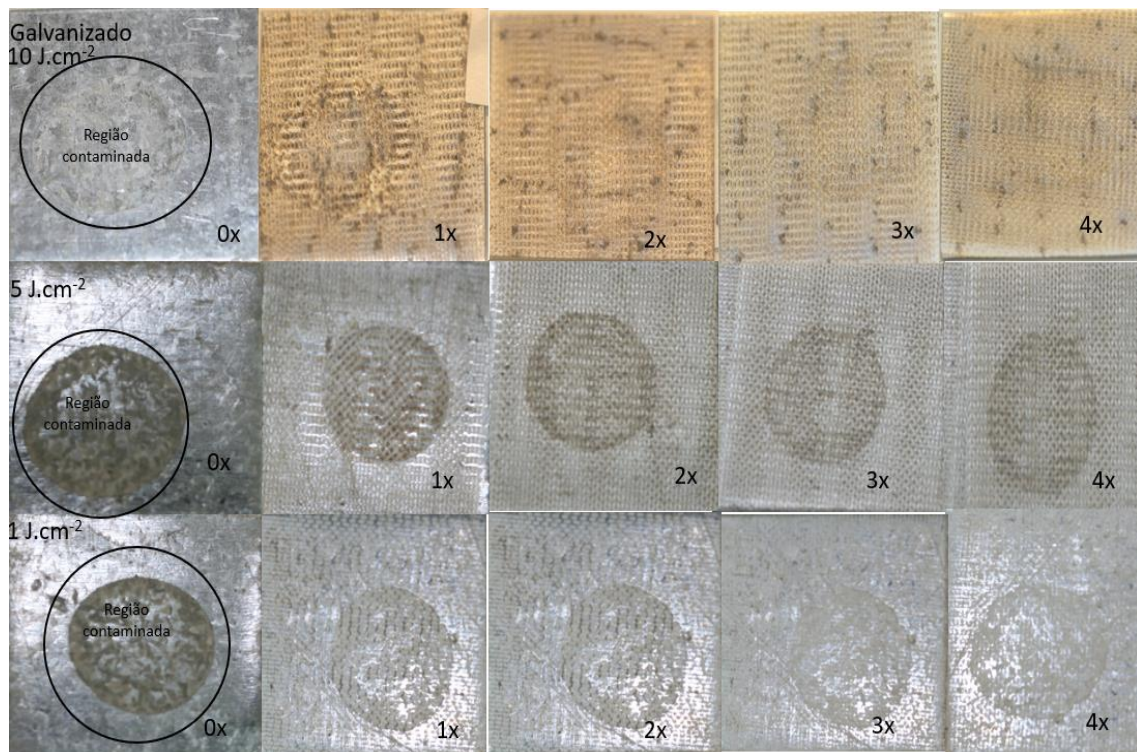


Figura 31: Imagens da câmera digital do galvanizado ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) J.cm^{-2} .

7.3.4. Carbono

Os valores médios da taxa de contagem normalizada (C_n médio), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens (D_n médio) para o aço carbono os diferentes valores de fluência estão indicados na Figura 32. A fluência de 10 J.cm^{-2} apresentou o maior valor de fator de remoção. A porcentagem de descontaminação variou de 77% a 97%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. Na Figura 33 estão ilustradas as amostras descontaminadas e oxidou além da região contaminada, após a passagem do laser foi clareando após a passagem do laser.

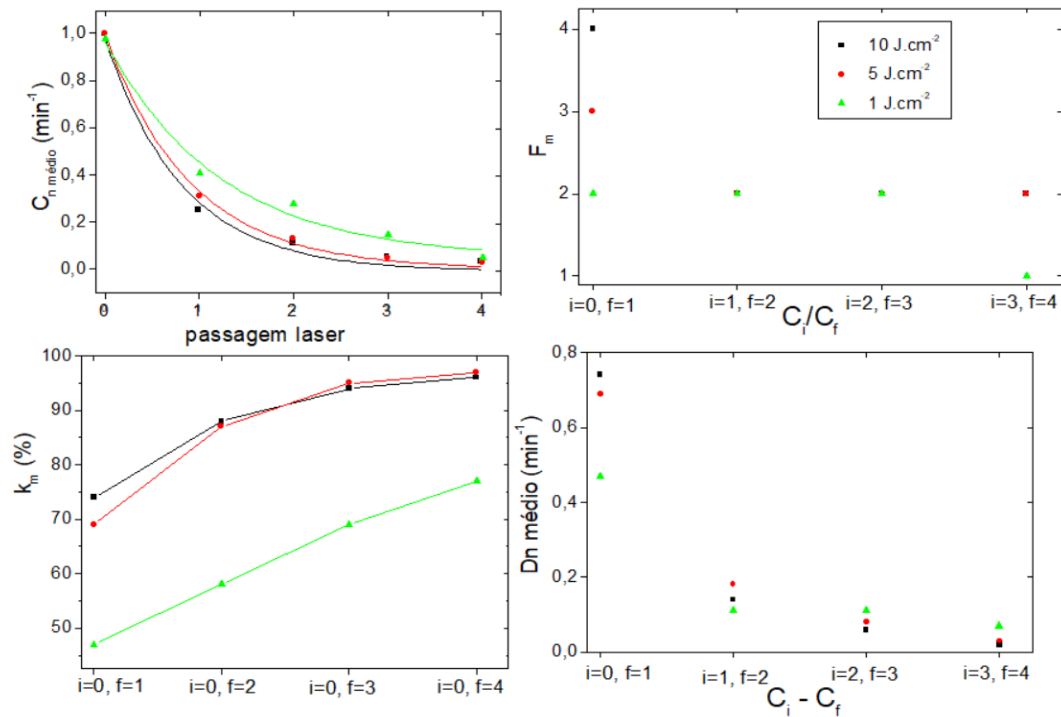


Figura 32: Valores médios da taxa de contagem ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o aço carbono.

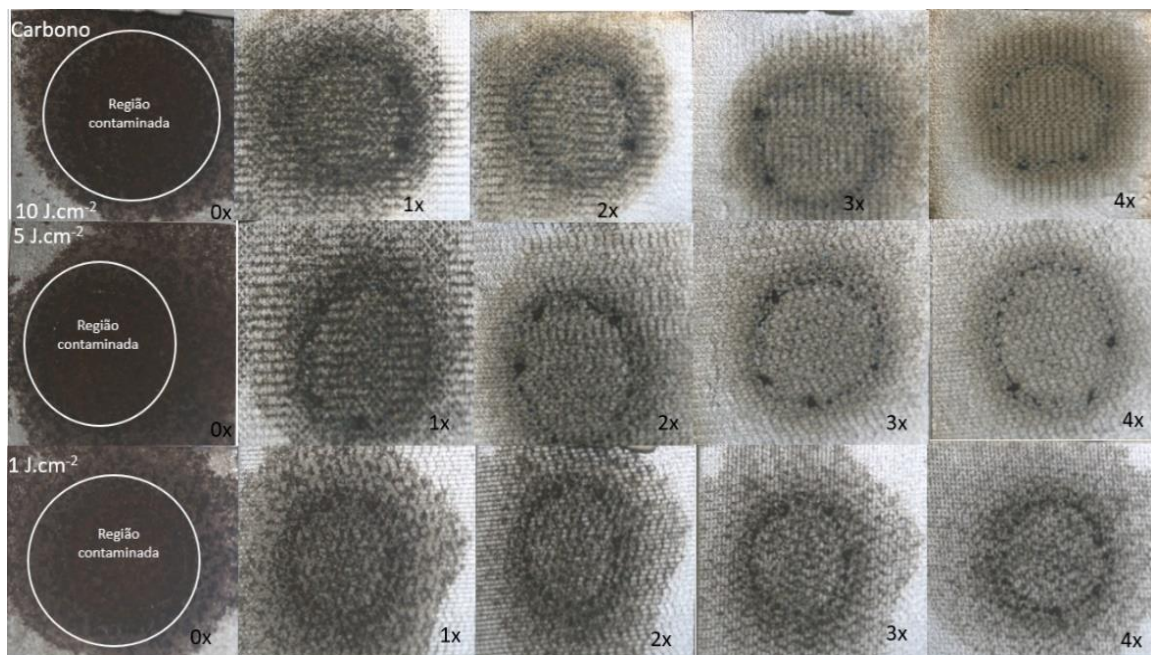


Figura 33: Imagens da câmera digital do aço carbono ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) J.cm^{-2} .

7.4. Cobre

Os valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) do cobre para os diferentes valores de fluência (Figura 34) para o cobre. A fluência de 5 J.cm^{-2} apresentou o maior valor de fator de remoção. A porcentagem de descontaminação variou de 98% a 99%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. Nas Figura 35 estão ilustradas as amostras descontaminadas, que sofreram um processo de oxidação e apresentaram um aspecto queimado para a fluência de 10 J.cm^{-2} .

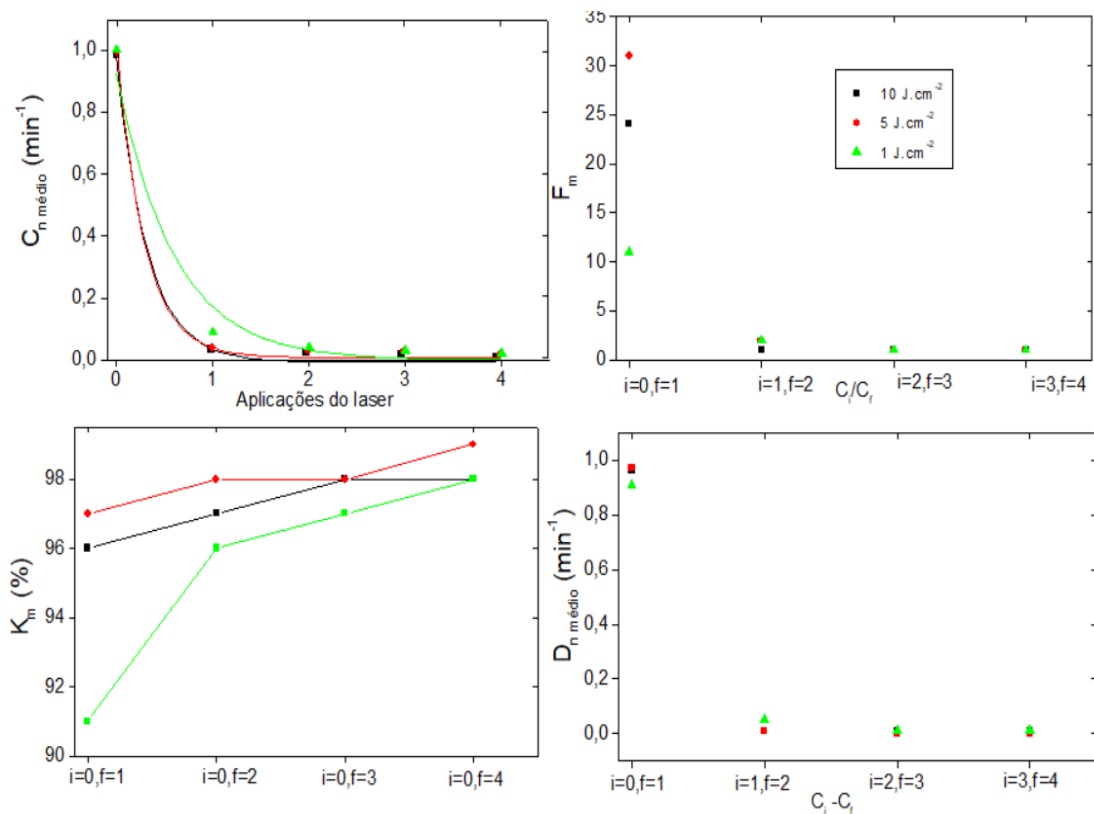


Figura 34: Valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o cobre.

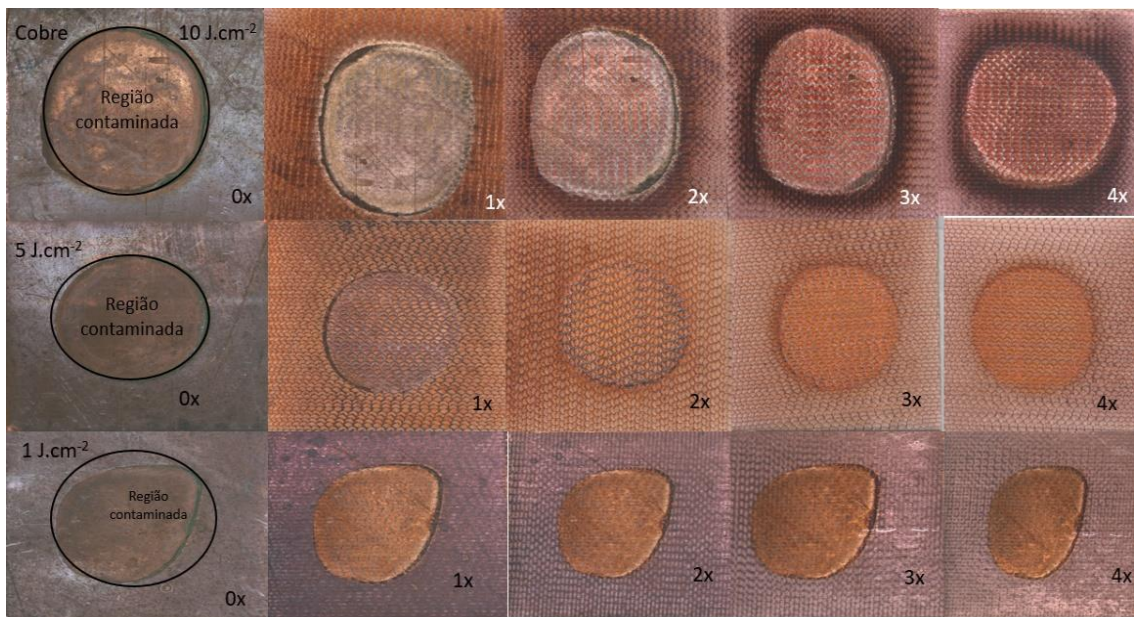


Figura 35: Imagens da câmera digital do cobre ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) J.cm^{-2} .

7.5. Concreto

Os valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) do concreto para diferentes valores de fluência estão indicados na Figura 36. Todas as fluências utilizadas apresentaram o mesmo fator de remoção. A taxa de contagem praticamente um ao longo de todas as aplicações do laser. A porcentagem de descontaminação variou de 5% a 41%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. A porcentagem de 41% ocorreu para a fluência de 10 J.cm^{-2} . Para esta amostra tem-se as imagens do antes e após quatro passagens do laser (Figura 37), seu aspecto foi similar para todas as fluências.

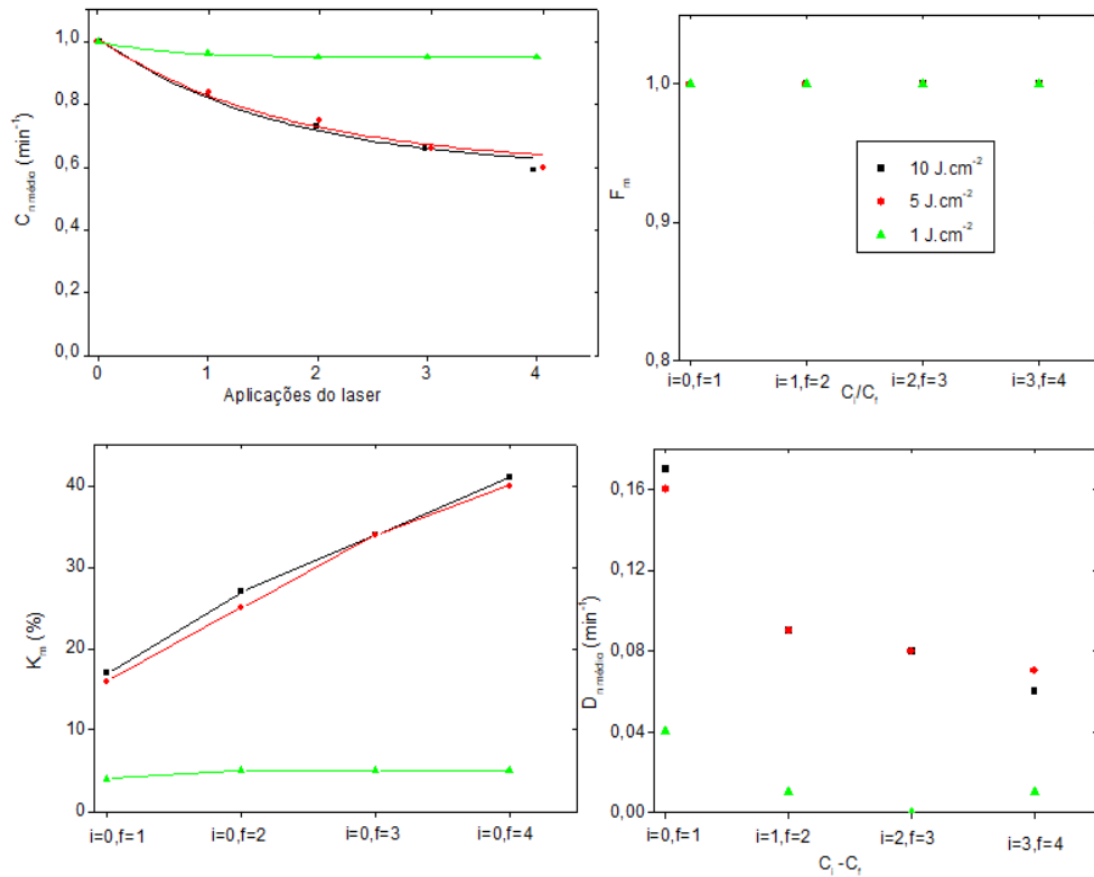


Figura 36: Valores médios da taxa de contagem ($C_{n\text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (K_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n\text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o concreto.

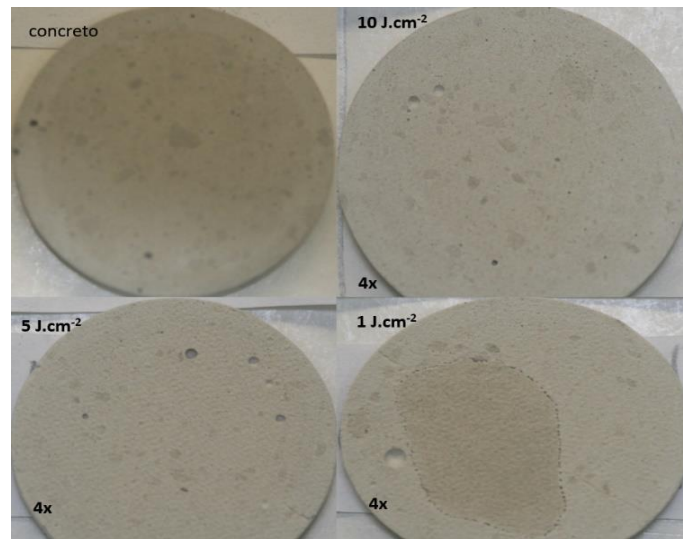


Figura 37: Imagens das amostras antes e depois da descontaminação para o concreto. Sendo 4x equivalente ao número de passagem do laser.

7.6. Concreto espelhado

Os valores médios da taxa normalizada (C_n médio), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens (D_n médio) para o concreto espelhado diferentes valores de fluência (Figura 38). Todas as fluências de apresentaram o mesmo valor de fator de remoção. A porcentagem de descontaminação variou de 16% a 61%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. As amostras descontaminadas (Figura 39), o concreto possui uma camada de plástico na qual foi feita a contaminação o material radioativo foi absorvido no material. Na primeira passagem do laser para as fluências de (10 e 5) $J.cm^{-2}$ esta camada espelhada é removida e nas demais a própria superfície do concreto é removida. Para 1 $J.cm^{-2}$ esta camada não é totalmente removida.

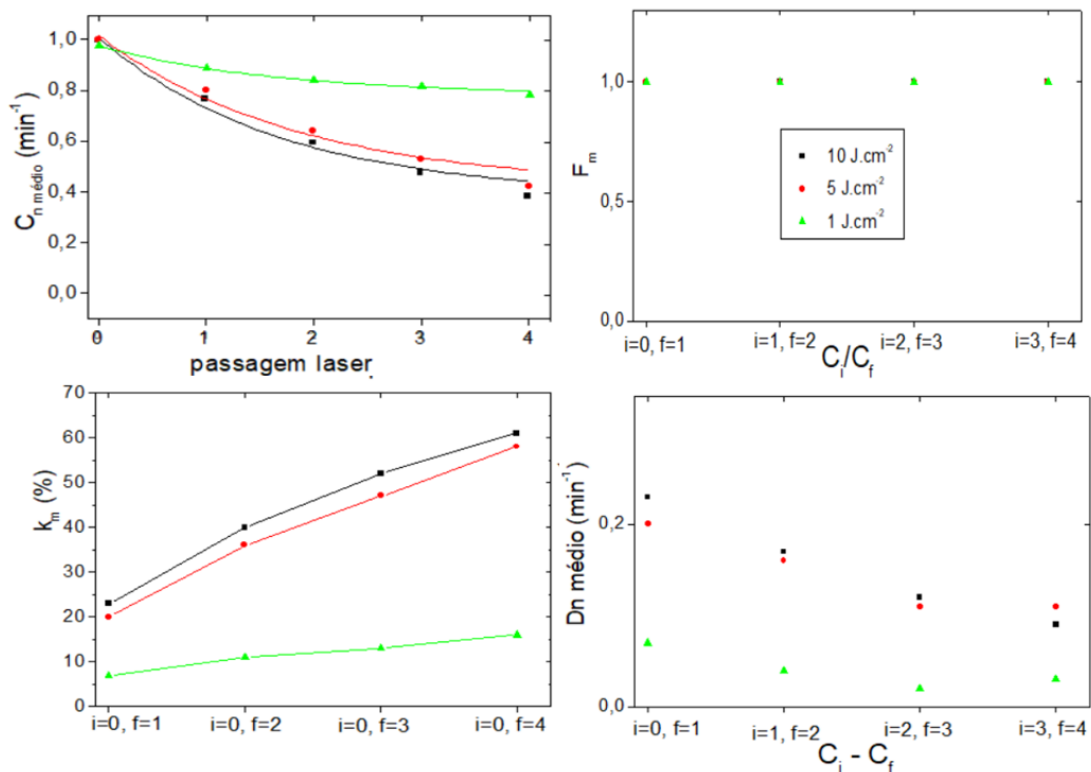


Figura 38: Valores médios da taxa de contagem (C_n médio), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens (D_n médio) para diferentes valores de fluência para o concreto espelhado.

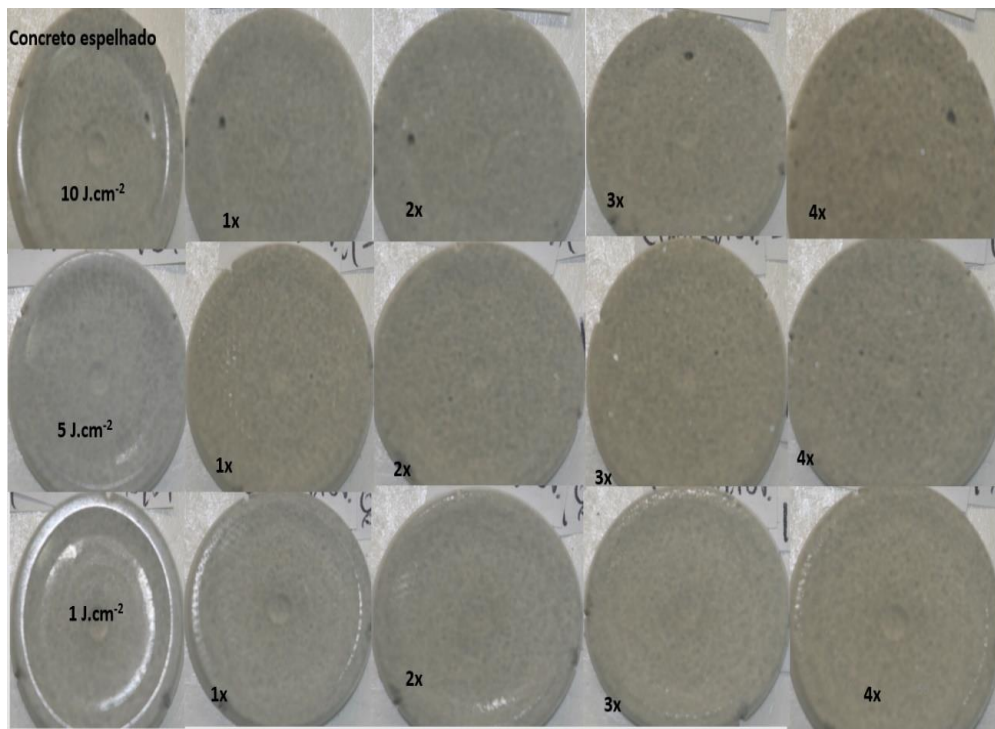


Figura 39: Imagens da câmera digital do concreto espelhado ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) J.cm^{-2} .

7.7. Chumbo

Os valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) para os diferentes valores de fluência estão indicados na Figura 40. Para a fluência de 5 J.cm^{-2} não foi possível fazer o mesmo ajuste o do decaimento exponencial. A fluência de 10 J.cm^{-2} apresentou o maior valor de fator de remoção. A porcentagem de descontaminação variou de 99% a 100%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. Na Figura 41, estão ilustradas as amostras descontaminadas, a superfície oxidou com as fluências de (10 e 5) J.cm^{-2} . Para 5 J.cm^{-2} a superfície após a primeira passagem nota-se que apresentou o aspecto similar com as de 1 J.cm^{-2} , e nas demais sua superfície tem o aspecto similar ao de 10 J.cm^{-2} .

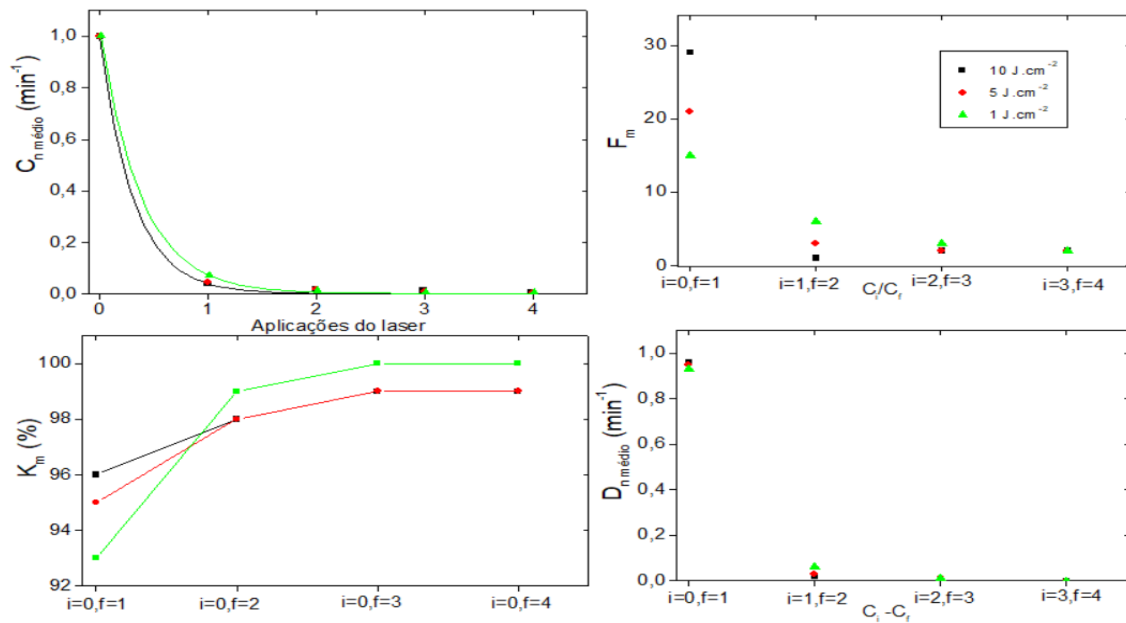


Figura 40: Valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (K_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o chumbo.

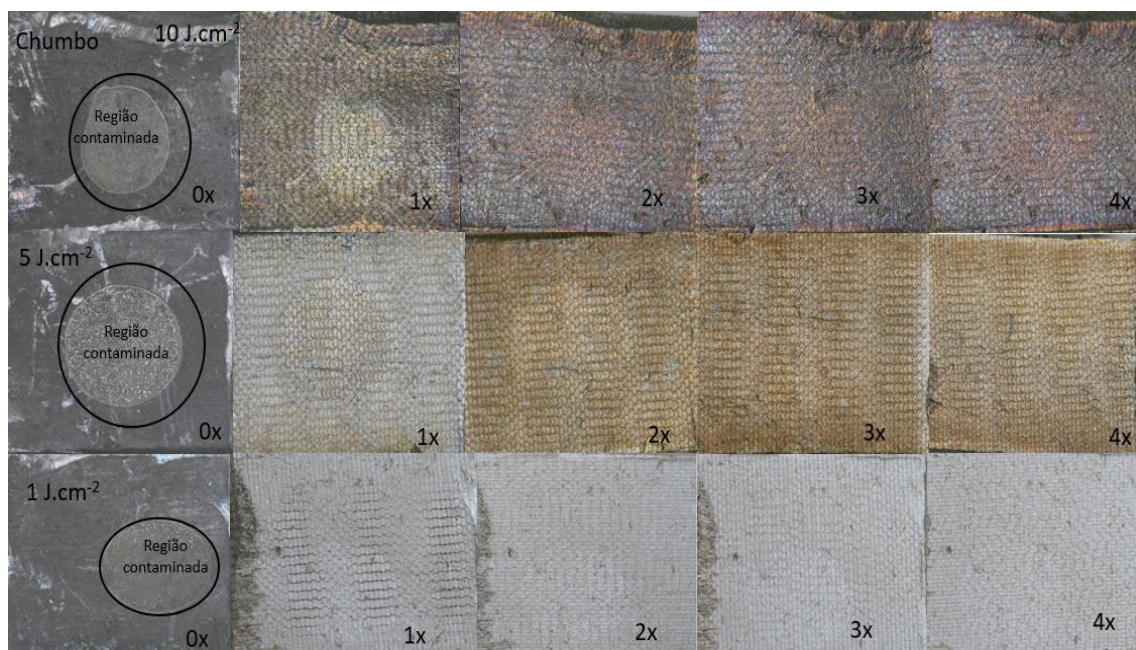


Figura 41: Imagens da câmera digital do chumbo ao longo da descontaminação para a fluência de (10 e 5) J.cm⁻².

7.8. Polietileno

Os valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) do polietileno para os diferentes valores de fluência estão indicados na Figura 42. A fluência de 10 J.cm^{-2} apresentou o maior valor de fator de remoção. A porcentagem de descontaminação variou de 50% a 100%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. Na Figura 43 estão ilustradas as amostras descontaminadas, após as passagens a amostra vai clareando para $(10 \text{ e } 5) \text{ J.cm}^{-2}$, sendo mais claro para a fluência de 1 J.cm^{-2} até a terceira passagem pois passa a escurecer na quarta passagem.

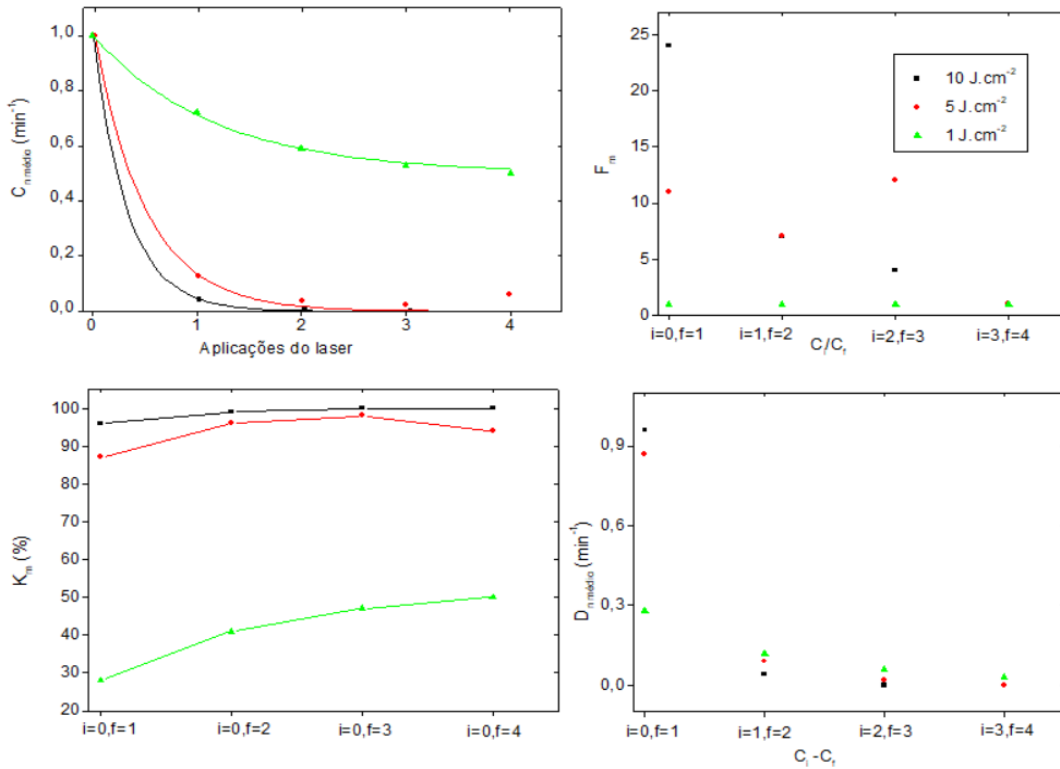


Figura 42: Valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o polietileno.

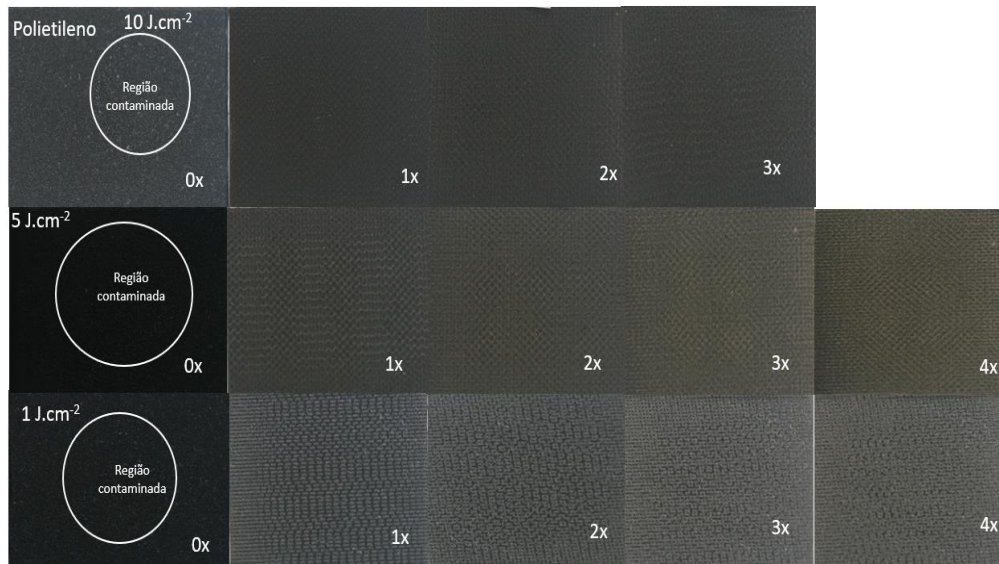


Figura 43: Imagens da câmera digital do polietileno ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) J.cm^{-2} .

7.9. PVC

Os valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) do PVC para diferentes valores de fluência está indicada na Figura 44. A fluência de 10 J.cm^{-2} apresentou o maior valor de fator de remoção. A porcentagem de descontaminação variou de 71% a 100%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. Na Figura 45 estão ilustradas as amostras descontaminadas, para 1 J.cm^{-2} tem-se que o aspecto é cinza após as passagens. Para 10 J.cm^{-2} nota-se uma região com aspecto escuro após a primeira passagem que vai diminuindo nas demais. Para 5 J.cm^{-2} temos que somente após a segunda passagem a superfície original da amostra foi removida.

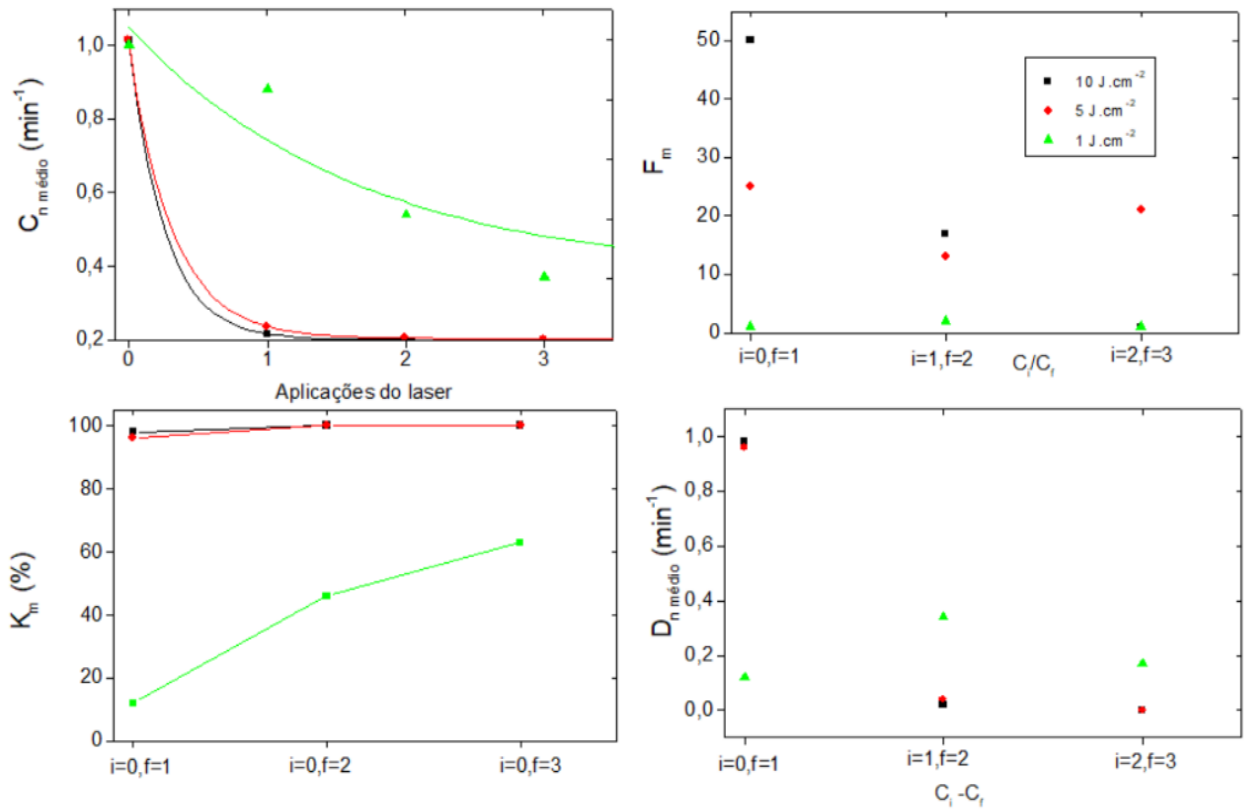


Figura 44: Valores médios da taxa de contagem normalizada (C_n médio), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (K_m) e a diferenças das taxas de contagens (D_n médio) para diferentes valores de fluência para o PVC.

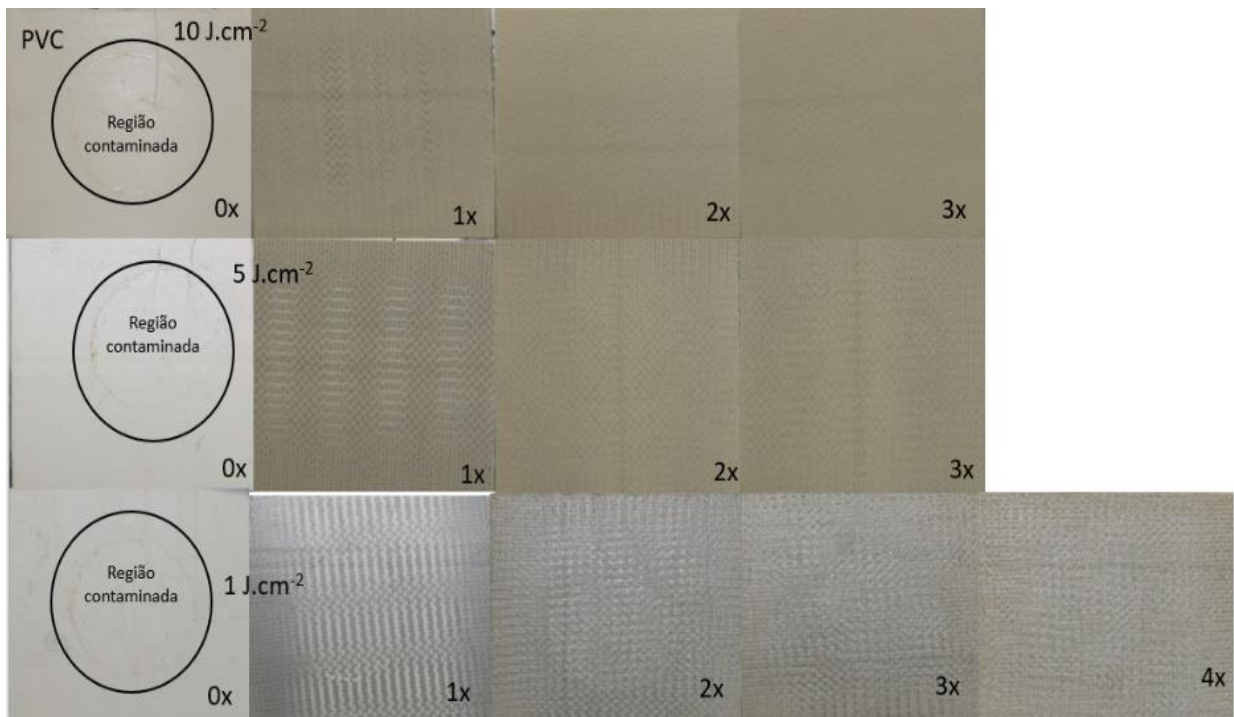


Figura 45: Imagens da câmera digital do PVC ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) J.cm⁻².

7.10. Vinil

Os valores médios da taxa de contagem normalizada ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) do vinil para diferentes valores de fluência estão indicados na Figura 46. A fluência de 10 J.cm^{-2} apresentou o maior valor de fator de remoção. A porcentagem de descontaminação variou de 85% a 100%, na última passagem do laser considerando os diferentes de fluências. Na Figura 47 estão ilustradas as amostras descontaminadas, a superfície vai alterando a cor da superfície num tom marrom para 1 J.cm^{-2} .

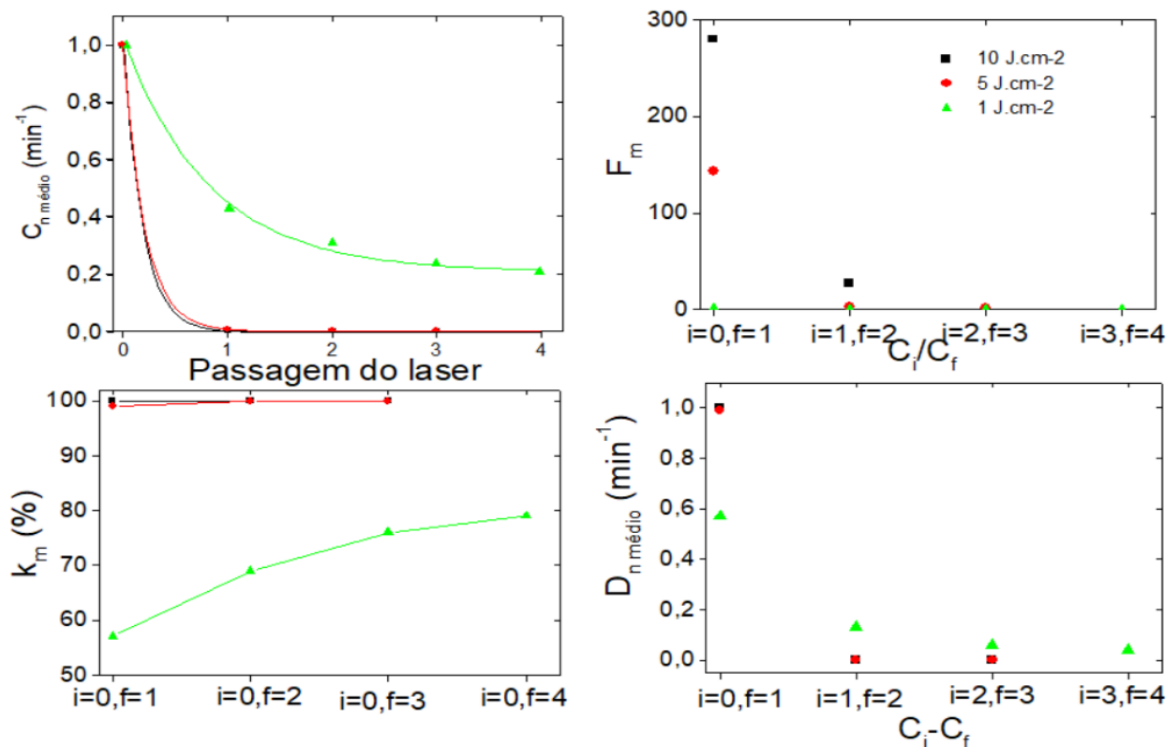


Figura 46: Valores médios das contagens normalizadas ($C_{n \text{ médio}}$), fator de descontaminação (F_m), porcentagem de descontaminação (k_m) e a diferenças das taxas de contagens ($D_{n \text{ médio}}$) para diferentes valores de fluência para o vinil.

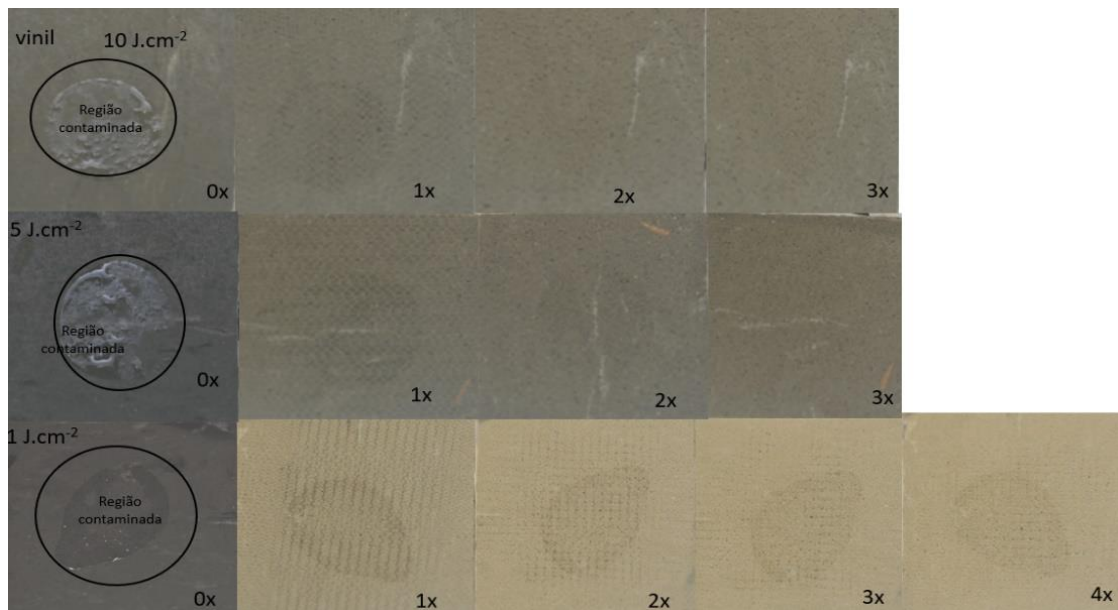


Figura 47: Imagens da câmera digital do vinil ao longo da descontaminação para a fluência de (10, 5 e 1) $J.cm^{-2}$.

8. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O parâmetro do laser da fluência foi avaliado em relação à eficiência de remoção do contaminante nas superfícies depositados nelas, para três valores diferentes.

A eficiência de descontaminação do laser em diferentes materiais com o contaminante de ^{137}Cs foi medida por métodos radioanalíticos, utilizando as taxas de contagens líquidas que foram calculadas. A porcentagem de descontaminação (k_m) e o fator de descontaminação (F_m) foram agrupados para fins de comparação, conforme ilustra a Tabela 5.

Tabela 5: Valor da fluência para o fator de descontaminação médio (F_m) após a primeira passagem do laser, porcentagem de descontaminação (k_m) após a última passagem do laser de maior valor em função do material.

Material	Fluência ($J.cm^{-2}$)	F_m	Fluência ($J.cm^{-2}$)	K_m (%)
Duto inox	1	20	1 e 5	99
Inox	5	6	5	94
Galvanizado	10	22	5	100
Cobre	5	31	5	99
chumbo	10	29	1,5 e 10	99-100
PVC	10	50	10 e 5	100
Acrílico	10	2	10	56
Vinil	10	280	10 e 5	100
Concreto	1,5 e 10	1	10 e 5	40
polietileno	10	24	10	100
alumínio	10	14	10	97
Aço carbono	10	4	10 e 5	96
Concreto espelhado	1,5 e 10	1	10 e 5	60

A partir da Tabela 5, nota-se que os valores de fluências que apresentaram o maior fator de remoção para a maior parte dos materiais foram de (5 e 10) J.cm^{-2} , com exceção para o duto inox (1 J.cm^{-2}). A porcentagem de descontaminação variou de 40% a 100%. Nos materiais (duto inox, galvanizado, cobre, chumbo, PVC, vinil, polietileno) nos quais a remoção foi de 99% a 100% o contaminante foi totalmente removido, já que nesses casos os valores das contagens apresentaram o mesmo valor da radiação ambiental. Dentre os materiais apenas o vinil, polietileno e o PVC precisaram apenas de três passagens do laser para as fluências de (5 e 10) J.cm^{-2} . No caso do polietileno tem-se que apenas para uma das amostras com 5 J.cm^{-2} foi preciso passar pela quarta vez. O vinil já foi totalmente removido na primeira passagem do laser. O menor valor de remoção foi para o concreto com 40% de remoção, o único que foi abaixo de 50% entre todos os materiais. O material que apresentou maior eficiência de remoção (280) foi o vinil. Para o aço inox que foi apresentado em duas formas: duto e a placa, tem-se que se considerar que como o duto se trata de uma amostra originada de uma instalação nuclear, pode conter alguma contaminação diferente do ^{137}Cs .

Esses resultados demonstram (Tabela 5) a técnica de descontaminação por laser aplicada nesses materiais foi eficiente em relação a remoção dos materiais contaminantes, considerando algumas ressalvas como no caso dos dois concretos e do acrílico, com o diferencial de que apenas o concreto espelhado ultrapassou a porcentagem de descontaminação maior que 50% para as fluências de (10 e 5) J.cm^{-2} e para o acrílico passou de 50% apenas na quarta passagem. Para complementar a análise da técnica aplicada foram tiradas fotos das superfícies para cada passagens do laser com uma câmera digital de alta resolução, o que permitiu avaliar algumas alterações visíveis como processos de oxidação, mudança de coloração e até mesmo alterações pouco perceptíveis, como por exemplo, no caso do acrílico.

A aplicação dessa técnica poderia ter gerado recontaminação no material para se verificar este fato foi proposto se examinar algumas condições, como por exemplo, a determinação de parâmetros para a descontaminação de diferentes materiais em função da fluência, uso da sobreposição de pulsos de 50% e o número de aplicações do laser. Para avaliar se houve recontaminação dois fatores foram analisados:

- I. Eficiência de descontaminação: está relacionada com a remoção do material radioativo de forma indireta obtida por meio das taxas de contagens experimentais. As contagens diminuíram após as passagens do laser para todos os materiais, porém esse fato não quer dizer que não houve durante o processo de ablação a recontaminação de superfícies mais profundas do material. O valor da fluência é diretamente proporcional a energia que foi depositada no material, então para 10 J.cm^{-2} é esperado uma porcentagem de descontaminação maior do que para a fluência de 1 J.cm^{-2} , fato que não foi observado nas duas amostras de aço inox o que poderia indicar um possível processo de recontaminação.

II. Análise dos materiais: permitiu investigar os danos causados no material após a ablação. Nesse estudo foram feitas medidas tanto do diâmetro quanto da profundidade. Para alguns materiais foi possível notar esse espalhamento de material ao redor da região ablacionada, porém é importante ressaltar que durante todo o processo de descontaminação o laser passou por toda a superfície da amostra então esse espalhamento do material poderia ter sido removido posteriormente e em relação a sobreposição de 50% foi obtida utilizando o valor do raio do feixe e confirmada pelas imagens do MEV.

Esses fatores (I. e II.) indicam que serão necessários novos estudos para se investigar se houve o processo de recontaminação. Como por exemplo, fazer um estudo específico associado ao efeito Rayleigh-Bernard-Marangoni [14] sobre a variação da temperatura durante o experimento que permitisse verificar se houve um gradiente de densidade que promove a circulação de um material líquido, e também no gradiente de tensão superficial investigação se houve não foi feito nenhum estudo. Além desse estudo, um novo experimento relacionado a ablação da amostra de modo a se reproduzir o processo de descontaminação, no qual cada etapa poderia ser medida e analisada pelo MEV, perfilometria de modo a se verificar as alterações na superfície e na profundidade ao longo de todas as passagens do laser.

Desse modo este projeto prevê algumas atividades complementares, tais como:

- Em relação ao processo de descontaminação pode-se avaliar: a influência da distância da amostra ao feixe de laser, diferentes geometrias de incidência do feixe de laser em relação à capacidade para capturar o material ejetado na ablação e desenvolver métodos de aspiração e captura do contaminante ejetado após a ablação;
- Determinar a eficiência de descontaminação do laser em diferentes materiais com diferentes contaminantes usando métodos radioquímicos e radioanalíticos, por exemplo, o ^{60}Co ;
- Estudo das imagens das superfícies descontaminadas serão estudados e avaliados em trabalhos futuros;
- Análise do filtro HEPA utilizado no experimento.

Essa técnica apresenta um grande potencial para ter escalas comerciais. Para tal são necessárias algumas ressalvas, neste momento tem-se já que a técnica de descontaminação por laser se mostrou ser eficiente para a maioria dos materiais estudados, porém apenas o parâmetro da variação da fluência e um tipo de contaminante foi estudado. Serão necessários aprimorar esses estudos e incluir essas atividades complementares propostas nos itens acima.

Além disso, antes de se aplicar numa escala comercial será necessário montar um sistema portátil completo constituído por um detector e um laser. O laser utilizado neste trabalho é portátil, porém nesse estudo é a amostra que se movimenta porém numa aplicação comercial é desejável que o feixe de laser se movimente e o material a ser tratado fique imóvel. Nesse sentido uma alternativa está no uso de motores de passos e antes desse sistema se torna operacional serão necessários novos testes incluindo a aplicação numa instalação nuclear.

APÊNDICE A – LASERS

O laser (“light amplification by stimulated emission of radiation”) consiste num sistema composto por: meio de ganho, um ressonador e uma fonte de energia. O ressonador pode ser um par de espelhos opticamente paralelos e altamente refletores, sendo que um desses espelhos é parcialmente transmissor. O meio de ganho (sólido, líquido, gasoso) possui a propriedade de amplificar a amplitude da onda por meio da emissão estimulada, podendo ser bombardeado de forma elétrica ou óptica.

No laser o meio de ganho é bombardeado e é posicionado entre o ressonador (par de espelhos), de modo a garantir que a luz seja amplificada e após atingir uma amplificação considerável esta luz é transmitida pelo espelho no pulso de saída. Para obter esse pulso é necessário que haja inversão de população no meio de ganho, a emissão estimulada e o meio de saída desse pulso. No laser há dois tipos de bombeamento: contínuo e pulsado. No modo contínuo não há interrupção da luz e apresenta baixa potência. Para o modo pulsado a luz é emitida em pulsos regulares, como por exemplo, em tempos de ns até fs com altas potências [15].

Para pulsos com a duração temporal de ns, por exemplo, o método de chaveamento conhecido como Q-switch é utilizado. Nesta técnica o laser é bombardeado de forma contínua por meio de uma lâmpada para que ocorra o processo de inversão de população, então um dos espelhos é bloqueado, para aumentar o pulso de saída e impedir a ação do laser, e após a saturação é retirado o bloqueio liberando o pulso amplificado. Na técnica de chaveamento o pulso amplificado é liberado com um tempo de atraso (delay time). Esse atraso está associado ao tempo de se retirar o bloqueio e o início da ação laser, ou seja, o tempo que é necessário para atingir um valor de emissão espontânea significativa [15].

A.1 – Caracterização

A caracterização do laser foi feita no laboratório do CELAP (IPEN/CNEN). O laser utilizado neste trabalho é o ULTRA BIG SKY LASER SERIES da marca Quantel, possui o meio ativo sólido de Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet), emite o comprimento de onda 1064 nm, com a taxa de repetição máxima de 20 Hz, energia máxima de 5,75 J e potência máxima de 115 W e largura temporal de 8,5 ns. No processo de ablação a laser é importante conhecer o valor da fluência, parâmetro dado em $J.cm^{-2}$, que relaciona a energia (Q_E, J) em função da área do feixe (A, cm^2), conforme ilustra a equação 6.

$$F = Q_E/A \quad \text{equação 6}$$

Para calcular a área do feixe do laser neste projeto foi considerado que este possui um formato circular, desse modo o valor do diâmetro desse feixe é fundamental e pode ser obtido utilizando a técnica da fita Kapton [16]. Essa fita foi posicionada a distância de 12,5 cm da lente no interior da capela num suporte, com o auxílio de micrômetros sua posição foi variada na horizontal e na vertical para diversos valores de energia gerando a formação de buracos na fita (Figura 48).

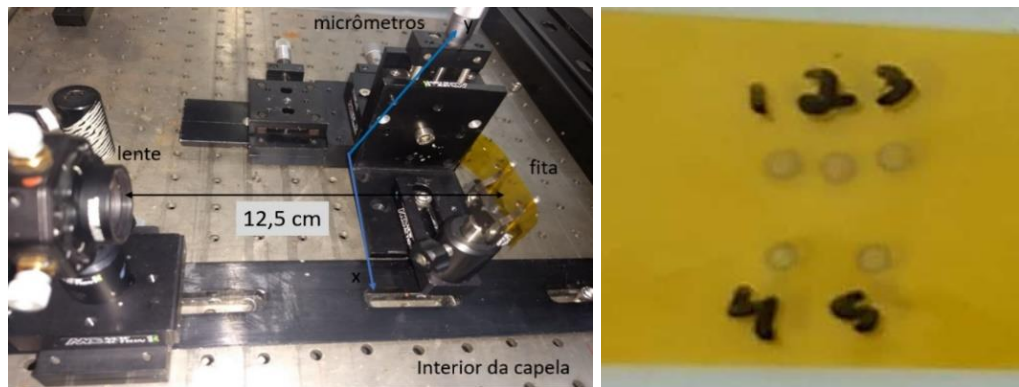


Figura 48: Fita de Kapton no arranjo de descontaminação (esquerda) e fita com os buracos para diversos valores de energia (direita). Onde 1, 2,3,4 e 5 indicam valores diferentes de fluências.

O diâmetro do feixe do laser, pela técnica da fita Kapton, é obtido a partir da relação entre o diâmetro buraco (d_h) e o inverso energia do laser ($1/Q_E$) conforme indica a equação 7 [16]. O parâmetro “A” indica uma constante que está relacionada: ao diâmetro do feixe ($2\omega_b$), a espessura do filme Kapton (h), ao coeficiente de reflexão (R), a energia necessária para aquecer e evaporar o material (ΔH_v) e ao valor de intensidade máxima da distribuição do raio do laser (ω_t).

$$d_h = 2\omega_b - A/Q_E \quad \text{e} \quad A = \frac{2\pi(\omega_b)^3 h [1 - (\omega_t/\omega_b)^3] \Delta H_v}{3(1-R)} \quad \text{equação 7}$$

Uma fita Kapton foi ablacionada com 200 pulsos para diferentes valores de fluência, de modo que para se obter o diâmetro do buraco (d_h) foram obtidas imagens no microscópio óptico de marca Leica do CELAP (lente 5x) e no software ImageJ a partir das imagens obtidas foi calculado o diâmetro do buraco adotando a calibração de escala e considerando a média entre os valores de diâmetros horizontais e verticais. O valor de delay-time 135 μs corresponde ao maior buraco, já que em a energia do laser é inversamente proporcional ao delay. Dessas imagens nota-se que apresentam uma parte de região clara e ao redor a uma região mais escura, que pode ser associada a possíveis efeitos térmicos devido ao tipo de pulso utilizado o de ns, e o valor de delay-time de 135 μs corresponde ao maior diâmetro do buraco, já que a relação entre a energia do laser é inversamente proporcional ao delay (dado em μs).

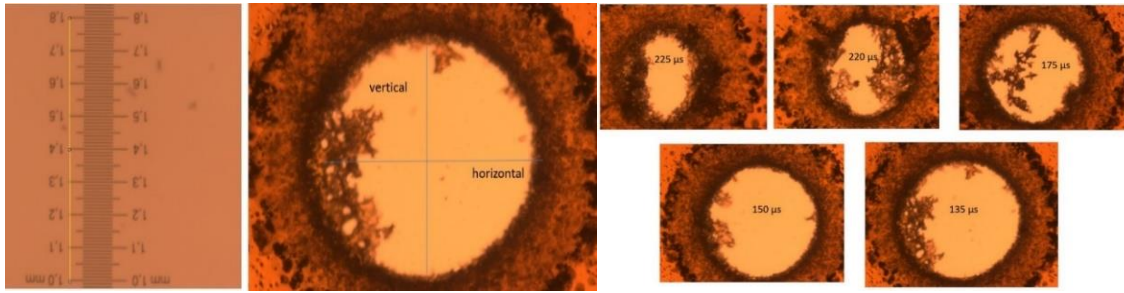


Figura 49: Imagens obtidas da régua de calibração (esquerda), exemplo de como medir o diâmetro da fita Kapton no microscópio óptico (meio) e exemplo de diâmetros com diferentes valores de fluência (direita).

Na Figura 50 estão indicados dois gráficos. No lado esquerdo tem-se a relação da energia do feixe (Q_E) que foi medido em mJ em função do parâmetro delay-time (dt) dado em μs . Lado direito tem-se os valores médios do diâmetro do buraco (d_h) e do inverso da energia do laser ($1/Q_E$) dado em J^{-1} . O valor da energia foi medido a partir do posicionamento de um sensor medidor de energia (marca COHERENT, Field Max II) após a lente focalizadora a uma distância de aproximadamente 0,5 cm. O delay-time variou de 135 a 300 μs o que representa a região na qual houve uma variação significativa dos valores de energia, e para (135 e 140) μs apresentaram valores similares e decresce com o aumento do valor do delay-time. Para os dois gráficos foi feito um ajuste linear indicados nas equações 8 e 9, desprezando o ponto de 135 μs .

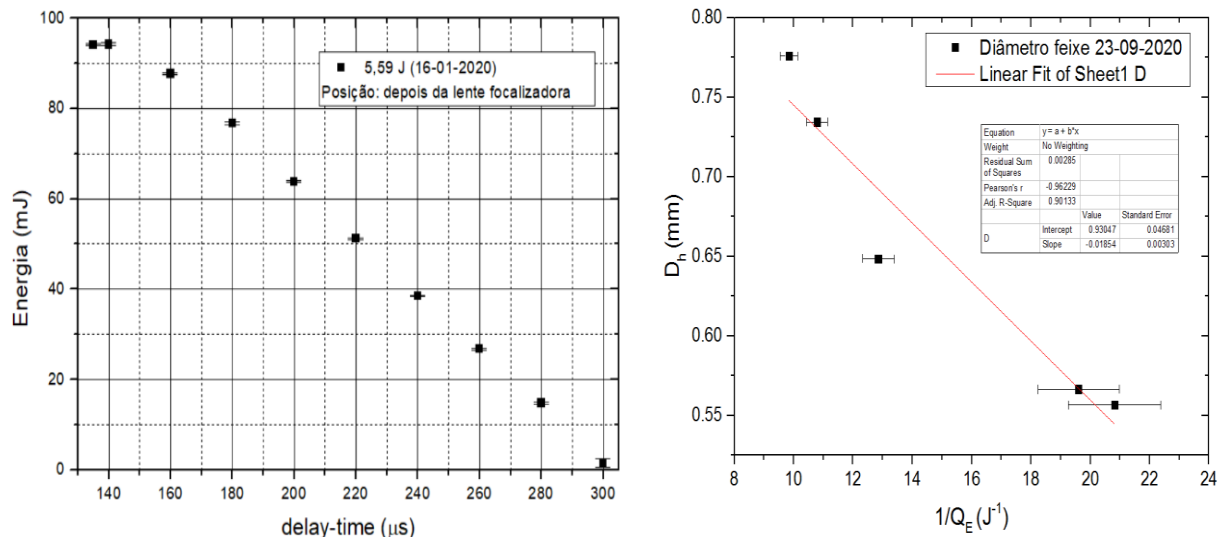


Figura 50: Relação da energia do feixe em função do parâmetro delay-time para a energia de 5,59 J (esquerda) e a relação do diâmetro da fita Kapton com o inverso da energia do feixe (direita).

$$Q_E = (181,76 \pm 2,60) - (0,59 \pm 0,01) \times dt \quad \text{equação 8}$$

$$d_h(\text{mm}) = (1,01 \pm 0,03) - \frac{(0,020 \pm 0,003)}{Q_E} \quad \text{equação 9}$$

A área do feixe foi obtida a partir da comparação entre as equações 7 e equação 9, na qual o valor do coeficiente linear $(1,01 \pm 0,03)$ mm da equação 9 que equivale ao dobro do valor raio do feixe do laser $(2\omega_b)$. O valor de raio do feixe é $(0,50 \pm 0,02)$ mm, esse valor precisou ser corrigido devido a um estudo com o filme de Kapton [17] no qual chegou-se à conclusão de que o valor do diâmetro medido equivale a 99% do valor real. Desse modo o valor de área corrigido a ser adotado neste trabalho que equivale a área de feixe de $(7,8 \pm 0,5) \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ e a partir do valor dessa área foi calculada a relação entre o valor de fluência ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$) em função do delay-time (dt), indicado na Figura 51, na qual foi feita um ajuste linear indicado na equação 10.

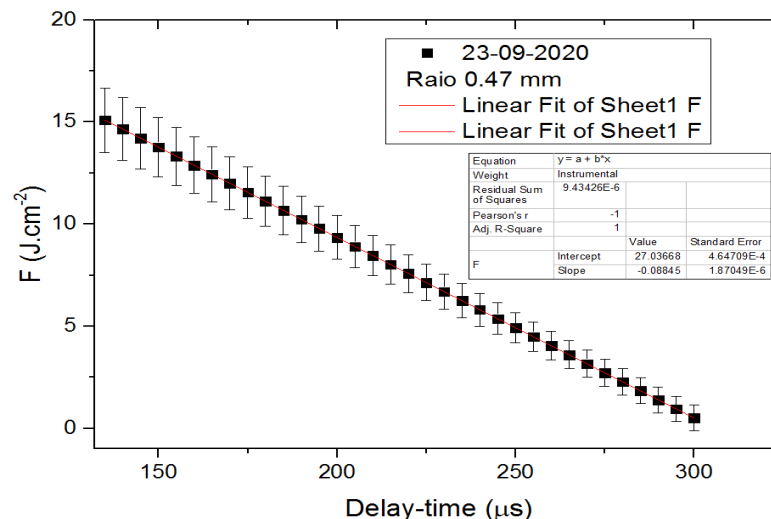


Figura 51: Relação entre a fluência (F) e do delay-time (dt).

$$F \left(\frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \right) = (25,0 \pm 0,1) - (0,10000 \pm 0,0001) \times dt \quad \text{equação 10}$$

Além disso, foi feito um teste de estabilidade para se verificar a reprodutibilidade dos valores de energia no laser, no qual durante uma hora a cada 10 min ($n=7$) mediu-se o valor da energia útil do laser (Tabela 6) e seu o coeficiente de variação de energia ($V(\%)$) indicado na equação 11, que segundo o manual do fabricante não deve exceder 2% (apêndice item A.2). Esse coeficiente de variação da energia foi abaixo de 2% para todas as medidas feitas com as fluências de (1, 5 e 10) $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$, com exceção do valor para o tempo 0 minutos para 1 $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$.

$$V(\%) = \left| \frac{Q_{E_i} - Q_{E_f}}{Q_{E_f}} \right| \times 100 \quad \text{equação 11}$$

Tabela 6: Energia do laser útil (Q_E) em função do valor de fluência (F) e do tempo (T) de cada medida, assim como o coeficiente de variação de cada fluência.

Tempo (min)	Energia (mJ) 1 J.cm ⁻²	Energia (mJ) 5 J.cm ⁻²	Energia (mJ) 10 J.cm ⁻²	V(%) 1 J.cm ⁻²	V(%) 5 J.cm ⁻²	V(%) 10 J.cm ⁻²
0	7,48 ± 0,18	36,20 ± 0,30	73,50 ± 0,30	3,6	0,2	0,2
10	7,78 ± 0,17	36,10 ± 0,30	73,60 ± 0,30	0,3	0,0	0,1
20	7,82 ± 0,17	36,10 ± 0,30	73,70 ± 0,30	0,8	0,0	0,1
30	7,87 ± 0,18	36,10 ± 0,30	73,70 ± 0,30	1,4	0,0	0,1
40	7,82 ± 0,16	36,10 ± 0,30	73,70 ± 0,30	0,8	0,0	0,1
50	7,76 ± 0,16	36,10 ± 0,30	73,70 ± 0,30	0,0	0,0	0,1
60	7,78 ± 0,17	36,10 ± 0,30	73,70 ± 0,30	0,3	0,0	0,1

APÊNDICE B - REJEITOS RADIOATIVOS

Os rejeitos radioativos podem ser classificados segundo seus níveis e natureza da radiação, bem como suas meias-vidas de acordo estabelecidos pela norma Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Os rejeitos são classificados em 4 classes [18], conforme ilustra a Tabela 7. Para complementar essas informações na Tabela 8 há um detalhamento dos rejeitos da classe 2.

Tabela 7: Classificação dos rejeitos radioativos.

Classes	Tipo de rejeito	Características
0	Rejeito isento (RI)	Radionuclídeos com valores de atividade ou de concentração de atividade, em massa ou volume, inferiores ou iguais aos respectivos níveis de dispensa estabelecidos na norma.
1	Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (RVMC)	Rejeitos com meia-vida inferior ou da ordem de 100 dias, com níveis de atividade ou de concentração de atividade superiores aos respectivos níveis de dispensa.
2	Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (RBMN)	Rejeitos com meia-vida superior à dos rejeitos da Classe 1, com níveis de atividade ou de concentração de atividade superiores aos níveis de dispensa estabelecidos nos Anexos II e VI, bem como com potência térmica inferior a 2 kW/m ³ .
3	Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN)	Rejeitos com potência térmica superior a 2kW/m ³ e com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedam as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta.

Fonte: [18].

Tabela 8: Classificação dos rejeitos radioativos da classe 2.

2.1	Meia-Vida Curta (RBMN-VC)	Rejeitos de baixo e médio níveis de radiação contendo emissores beta/gama, com meia-vida inferior ou da ordem de 30 anos e com concentração de radionuclídeos emissores alfa de meia-vida longa limitada em 3700 kBq/kg em volumes individuais e com um valor médio de 370 kBq/kg para o conjunto de volumes
2.2	Rejeitos Contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN)	Rejeitos de extração e exploração de petróleo, contendo radionuclídeos das séries do urânio e tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa estabelecidos no Anexo VI da norma.
2.3	Rejeitos contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN)	rejeitos contendo matérias primas minerais, naturais ou industrializadas, com radionuclídeos das séries do urânio e do tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa estabelecidos no Anexo VI da norma.
2.4	Rejeitos de Meia-Vida Longa (RBMN-VL)	Rejeitos não enquadrados nas Classes 2.2 e 2.3, com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedem as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta

Fonte: [18].

Em relação a dispensa de rejeitos sólidos no anexo V da norma CNEN 8.01 [18], estão especificados os valores dos níveis máximos de contaminação radioativa removível na superfície do volume do rejeito radioativo em função dos tipos de emissões de radiação conforme ilustra a Tabela 9, sendo os emissores α de baixa toxicidade os seguintes radionuclídeos: urânio natural, urânio empobrecido, tório natural, ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th oriundos nos produtos de mineração e concentrados químicos ou físicos e dos radionuclídeos emissores alfa com meia-vida inferior a 10 dias.

Tabela 9: Níveis máximos de contaminação radioativa removível na superfície do volume do rejeito radioativo.

Tipos de emissores	Bq/m ²
β , gama e α de *baixa toxicidade	4.10^4
Todos os outros emissores α	$0,4.10^4$

Fonte: [18].

Os rejeitos radioativos são segregados e contidos em tambores e outros tipos de recipientes, com o propósito de proteger o meio ambiente e os indivíduos do público dos riscos de exposição à radiação e de incorporação de materiais radioativos. Este processo todo apresenta um alto custo relacionados: ao processo de acondicionamento de acordo com as normas vigentes, há necessidade do uso intensivo de mão-de-obra para a realização das operações e os equipamentos de proteção individual. Os rejeitos radioativos de média ou de baixa atividade cujo o descarte e a disposição final de materiais como rejeito radioativo apresenta um custo extremamente elevado, principalmente ao se levar em conta o grande volume de rejeito gerado em determinadas operações.

APÊNDICE C – DADOS EXPERIMENTAIS

Nesta parte estão indicados em forma de tabela os valores da taxa de contagem líquida (C) obtidos nos experimentos para os materiais descontaminados indicados no subitem C.1 (Tabela 10 a Tabela 22). Na parte da coluna da ablação, 0 indica a contagem da amostra antes de ser ablacionada.

Os valores médios em função do número de vezes que foi ablacionado, da taxa de contagem normalizada média (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para os diferentes valores de fluência para cada material estão indicados no subitem C.2 (Tabela 23 a Tabela 34).

C.1 - Contagens líquidas dos materiais

Tabela 10: Taxa de contagem líquida (C) em função das ablações para os diferentes valores de fluências do acrílico.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	12400 ± 113	4	20962 ± 146	7	13998 ± 120
1		6270 ± 81		16396 ± 129		12637 ± 114
2		5643 ± 77		15872 ± 127		12608 ± 113
3		5583 ± 76		15111 ± 124		11085 ± 107
4		3747 ± 64		15299 ± 125		10733 ± 105
0	2	29515 ± 172	5	21543 ± 148	8	18724 ± 138
1		19867 ± 142		15494 ± 126		17608 ± 134
2		18317 ± 136		15081 ± 125		17336 ± 133
3		17822 ± 134		15145 ± 125		17201 ± 132
4		17648 ± 134		10244 ± 104		17184 ± 132
0	3	15991 ± 128	6	14326 ± 121	9	19969 ± 149
1		8083 ± 92		11698 ± 109		19089 ± 149
2		7143 ± 86		10989 ± 106		16452 ± 137
3		6969 ± 89		11307 ± 108		16068 ± 136
4		6482 ± 82		10782 ± 105		16003 ± 136

Tabela 11: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de vezes que foi ablacionado para os diferentes valores fluências do alumínio.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	24792 ± 159	4	11281 ± 108	7	9517 ± 100
1		1786 ± 46		1461 ± 44		4996 ± 73
2		955 ± 36		873 ± 34		2869 ± 57
3		689 ± 32		547 ± 31		2333 ± 53
4		602 ± 30		446 ± 28		1881 ± 48
0	2	16412 ± 129	5	30176 ± 175	8	12148 ± 112
1		1741 ± 46		2492 ± 53		3231 ± 60
2		959 ± 36		1323 ± 41		1875 ± 48
3		658 ± 32		1035 ± 37		1414 ± 43
4		587 ± 31		895 ± 35		1245 ± 40
0	3	16623 ± 130	6	29029 ± 172	9	5448 ± 77
1		1541 ± 43		2210 ± 50		1301 ± 41
2		891 ± 35		1113 ± 38		716 ± 33
3		568 ± 32		893 ± 35		522 ± 31
4		524 ± 29		698 ± 32		495 ± 30

Tabela 12: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de vezes que foi ablacionado para os diferentes valores fluências do aço carbono.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	21812 ± 149	4	13242 ± 118	7	28724 ± 170
1		5583 ± 77		3940 ± 65		14822 ± 123
2		2686 ± 54		1733 ± 45		9650 ± 100
3		1303 ± 42		691 ± 32		6247 ± 81
4		837 ± 35		413 ± 27		4264 ± 68
0	2	28302 ± 169	5	27480 ± 167	8	20738 ± 145
1		7131 ± 87		8763 ± 95		11129 ± 107
2		3001 ± 59		3712 ± 64		6904 ± 85
3		1449 ± 43		1627 ± 45		4610 ± 71
4		913 ± 36		833 ± 35		2998 ± 59
0	3	30891 ± 177	6	26141 ± 163	9	26729 ± 164
1		8372 ± 93		7919 ± 91		13976 ± 120
2		3803 ± 65		3258 ± 60		8703 ± 95
3		1971 ± 49		1399 ± 42		5876 ± 79
4		1125 ± 37		731 ± 33		4062 ± 67

Tabela 13: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de vezes que foi ablaçionado para os diferentes valores de fluência do duto inox.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C (min ⁻¹)	Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C (min ⁻¹)
0,5	0	18871 ± 138	5	0	17943 ± 95
	1	11819 ± 110		1	878 ± 23
	2	8439 ± 93		2	569 ± 20
	3	5791 ± 77		3	414 ± 18
	4	3880 ± 64		4	309 ± 16
	5	2689 ± 55		5	250 ± 15
1	0	16902 ± 92	10	0	21337 ± 147
	1	501 ± 19		1	2134 ± 49
	2	261 ± 15		2	1827 ± 46
	3	174 ± 14		3	1687 ± 44
	4	120 ± 13		4	1277 ± 40

Tabela 14: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de ablações. para os diferentes valores de fluências do aço inox.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	32516 ± 181	4	31593 ± 179	7	10925 ± 106
1		5204 ± 74		5217 ± 74		5130 ± 73
2		2547 ± 52		2964 ± 56		2765 ± 53
3		1630 ± 43		2562 ± 52		1514 ± 42
4		1453 ± 40		2173 ± 49		1192 ± 37
0	2	19015 ± 139	5	30163 ± 175	8	32758 ± 182
1		3519 ± 62		5639 ± 76		9857 ± 101
2		2857 ± 56		2469 ± 52		4387 ± 68
3		2736 ± 55		1675 ± 43		2784 ± 55
4		2550 ± 53		1484 ± 41		2032 ± 48
0	3	21931 ± 149	6	15131 ± 124	9	25493 ± 164
1		9223 ± 97		2616 ± 53		8064 ± 91
2		8437 ± 93		1029 ± 36		4115 ± 66
3		7822 ± 90		922 ± 34		2634 ± 54
4		7256 ± 86		832 ± 32		1967 ± 47

Tabela 15: Taxa de contagem líquida (C) para o aço galvanizado, em função do número de vezes que foi ablacionado para os diferentes valores de fluência do aço galvanizado.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	33828 ± 205	4	34683 ± 213	7	19310 ± 166
1		1738 ± 98		3111 ± 103		5394 ± 120
2		499 ± 103		542 ± 92		1690 ± 103
3		382 ± 97		199 ± 91		401 ± 106
4		276 ± 97		142 ± 102		254 ± 99
0	2	36586 ± 209	5	34323 ± 216	8	24445 ± 181
1		1742 ± 101		2765 ± 102		7205 ± 129
2		375 ± 113		1455 ± 107		2066 ± 110
3		231 ± 99		245 ± 103		1389 ± 116
4		153 ± 94		138 ± 96		381 ± 95
0	3	37593 ± 227	6	22457 ± 177	9	34067 ± 205
1		1403 ± 100		1801 ± 104		7693 ± 124
2		343 ± 106		289 ± 98		786 ± 104
3		172 ± 115		169 ± 85		368 ± 100
4		137 ± 115		80 ± 102		206 ± 102

Tabela 16: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de vezes que foi ablacionado para os diferentes valores de fluência do cobre.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	40638 ± 202	4	23361 ± 154	7	37154 ± 193
1		1817 ± 45		764 ± 31		3974 ± 65
2		1295 ± 39		419 ± 26		2113 ± 48
3		1005 ± 35		411 ± 25		1436 ± 40
4		808 ± 32		320 ± 23		1214 ± 38
0	2	19224 ± 139	5	28325 ± 169	8	40017 ± 201
1		782 ± 32		1050 ± 35		4016 ± 65
2		679 ± 30		661 ± 30		1563 ± 42
3		479 ± 26		477 ± 26		1057 ± 35
4		371 ± 24		420 ± 24		836 ± 32
0	3	18349 ± 136	6	21004 ± 145	9	24405 ± 157
1		732 ± 31		607 ± 28		1639 ± 43
2		535 ± 27		392 ± 24		637 ± 29
3		425 ± 25		304 ± 23		420 ± 26
4		316 ± 23		176 ± 20		265 ± 22

Tabela 17: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de vezes que foi ablaçionado para os diferentes valores de fluências do concreto.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	10947± 106	4	22719 ± 151	7	18233 ± 136
1		9564 ± 99		18995 ± 139		17130 ± 132
2		8843 ± 95		17385 ± 133		17143 ± 132
3		8152 ± 92		15959 ± 127		17024 ± 131
4		7777 ± 90		13932 ± 119		16957 ± 131
0	2	14525 ± 124	5	16387 ± 129	8	16731 ± 131
1		11888 ± 113		13790 ± 119		16331 ± 130
2		10582 ± 108		11949 ± 110		16290 ± 129
3		9516 ± 102		10234 ± 102		16236 ± 128
4		8381 ± 96		9730 ± 100		16083 ± 128
0	3	18679 ± 141	6	6561 ± 82	9	8365 ± 93
1		14717 ± 122		5470 ± 75		8047 ± 91
2		12372 ± 112		4909 ± 72		7931 ± 90
3		10595 ± 104		4347 ± 67		7976 ± 90
4		9060 ± 96		3834 ± 64		7895 ± 90

Tabela 18: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de vezes que foi ablaçionado para os diferentes valores de fluências do concreto espelhado.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	16708 ± 130	4	14548 ± 122	7	19882 ± 142
1		13174 ± 116		12232 ± 112		18138 ± 136
2		10691 ± 105		10597 ± 105		17562 ± 134
3		8909 ± 96		9002 ± 96		17129 ± 132
4		7478 ± 88		7711 ± 89		16693 ± 131
0	2	18036 ± 135	5	20625 ± 145	8	21228 ± 147
1		13900 ± 119		16622 ± 130		20311 ± 144
2		10523 ± 104		13105 ± 116		19359 ± 140
3		8006 ± 91		10590 ± 104		19123 ± 139
4		6283 ± 81		8191 ± 92		18288 ± 136
0	3	21216 ± 147	6	20964 ± 146	9	29717 ± 173
1		16208 ± 130		15781 ± 130		27720 ± 168
2		12507 ± 113		11943 ± 111		26103 ± 162
3		9917 ± 101		9652 ± 100		25356 ± 160
4		7855 ± 90		7213 ± 87		24113 ± 156

Tabela 19: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de vezes que foi ablacionado para os diferentes valores de fluências do chumbo.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	23279 ± 153	4	21694 ± 148	7	27928 ± 168
1		541 ± 27		1271 ± 38		2240 ± 49
2		276 ± 23		448 ± 26		320 ± 24
3		126 ± 19		190 ± 20		127 ± 18
4		147 ± 20		146 ± 19		60 ± 16
0	2	26130 ± 162	5	36156 ± 191	8	24486 ± 157
1		1169 ± 37		1682 ± 44		1767 ± 43
2		589 ± 28		1014 ± 35		339 ± 24
3		396 ± 25		490 ± 27		74 ± 17
4		273 ± 21		403 ± 25		43 ± 43
0	3	20850 ± 146	6	36187 ± 191	9	26187 ± 162
1		929 ± 36		1400 ± 41		1498 ± 21
2		439 ± 29		453 ± 26		206 ± 20
3		294 ± 27		186 ± 21		69 ± 17
4		210 ± 27		147 ± 20		65 ± 16

Tabela 20: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de vezes que foi ablacionado para os diferentes valores de fluências do polietileno.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	2368 ± 52	4	16870 ± 131	7	25585 ± 160
1		101 ± 20		1160 ± 37		18519 ± 137
2		21 ± 17		218 ± 20		15604 ± 126
3		4 ± 16		16 ± 17		13849 ± 119
4		0		0		12978 ± 115
0	2	24679 ± 158	5	25364 ± 160	8	14952 ± 123
1		845 ± 35		1891 ± 47		13767 ± 118
2		121 ± 21		137 ± 20		11195 ± 107
3		35 ± 20		7 ± 15		10049 ± 102
4				0		9545 ± 99
0	3	27130 ± 166	6	19571 ± 141	9	20797 ± 145
1		1451 ± 44		4562 ± 70		10447 ± 103
2		152 ± 23		1906 ± 47		8633 ± 94
3		35 ± 19		1352 ± 41		7971 ± 90
4		0		1170 ± 38		7270 ± 87

Tabela 21: Taxa de contagem líquida (C) em função do número de vezes que foi ablacionado para os diferentes valores de fluências do PVC.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	32042 ± 183	4	29506 ± 172	7	25970 ± 179
1		701 ± 47		1029 ± 36		21742 ± 149
2		0 ± 37		86 ± 17		11942 ± 112
3		71 ± 39		8 ± 15		6995 ± 86
4						5042 ± 74
0	2	27777 ± 167	5	33023 ± 182	8	31700 ± 179
1		543 ± 27		1665 ± 43		27349 ± 167
2		20 ± 14		91 ± 16		17553 ± 134
3		8 ± 16		3 ± 16		13451 ± 118
4						11297 ± 108
0	3	30397 ± 175	6	18524 ± 137	9	21213 ± 146
1		557 ± 28		715 ± 32		20164 ± 114
2		22 ± 16		73 ± 20		12847 ± 114
3		13 ± 16		0		8991 ± 96
4						6785 ± 84

Tabela 22: Taxa de contagem líquida (C) para o vinil, em função do número de vezes que foi ablacionado para os diferentes valores de fluências do vinil.

Ablação	10 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	5 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)	1 J.cm ⁻²	C (min ⁻¹)
0	1	27170 ± 165	4	20712 ± 145	7	31925 ± 179
1		140 ± 18		191 ± 20		10637 ± 104
2		25 ± 14		30 ± 16		5040 ± 72
3		18 ± 14		6 ± 14		3979 ± 65
4		0		0		0
0	2	34044 ± 185	5	33720 ± 165	8	23460 ± 154
1		200 ± 20		181 ± 18		8081 ± 91
2		32 ± 15		0		5698 ± 77
3		0		0		4930 ± 72
4		0		0		0
0	3	33328 ± 183	6	16231 ± 128	9	16484 ± 129
1		70 ± 16		122 ± 18		6381 ± 81
2		1 ± 16		107 ± 17		2999 ± 57
3		4 ± 15		21 ± 14		2098 ± 48
4		0		0		0

C.2 - Valores médios da taxa contagem normalizada, porcentagem de descontaminação, do fator de descontaminação e da diferença de contagem

Tabela 23: Valores médios em função do número de vezes que foi ablacionado da taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para os diferentes valores de fluência do acrílico.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,00					n	
	1	0,56	0-1	44	0-1	2	0	0,44
	2	0,51	0-2	49	1-2	1	1	0,05
	3	0,50	0-3	50	3-2	1	2	0,01
	4	0,44	0-4	56	4-3	1	3	0,06
5	0	1,00						
	1	0,77	0-1	23	0-1	1	0	0,23
	2	0,74	0-2	26	1-2	1	1	0,03
	3	0,74	0-3	26	3-2	1	2	0,00
	4	0,65	0-4	35	4-3	1	3	0,09
1	0	1,00						
	1	0,93	0-1	7	0-1	1	0	0,07
	2	0,88	0-2	12	1-2	1	1	0,05
	3	0,84	0-3	16	3-2	1	2	0,05
	4	0,83	0-4	17	4-3	1	3	0,01

Tabela 24: Valores médios em função do número de vezes que foi ablacionado da taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes valores de fluência do alumínio.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,00					n	
	1	0,09	0-1	91	0-1	14	0	0,910
	2	0,05	0-2	95	1-2	2	1	0,040
	3	0,03	0-3	97	3-2	1	2	0,016
	4	0,03	0-4	97	4-3	1	3	0,003
5	0	1,00						
	1	0,10	0-1	90	0-1	11	0	0,904
	2	0,05	0-2	95	1-2	2	1	0,043
	3	0,04	0-3	96	3-2	1	2	0,015
	4	0,03	0-4	97	4-3	1	3	0,007
1	0	1,00						
	1	0,34	0-1	66	0-1	3	0	0,657
	2	0,20	0-2	80	1-2	2	1	0,147
	3	0,15	0-3	85	3-2	1	2	0,043
	4	0,13	0-4	87	4-3	1	3	0,022

Tabela 25: Valores médios em função do número de vezes que foi ablaçionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes valores de fluência do aço carbono.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,00					n	
	1	0,26	0-1	74	0-1	4	0	0,74
	2	0,12	0-2	88	1-2	2	1	0,14
	3	0,06	0-3	94	3-2	2	2	0,06
	4	0,04	0-4	96	4-3	2	3	0,02
5	0	1,00						
	1	0,31	0-1	69	0-1	3	0	0,69
	2	0,13	0-2	87	1-2	2	1	0,18
	3	0,05	0-3	95	3-2	2	2	0,08
	4	0,03	0-4	97	4-3	2	3	0,03
1	0	1,00						
	1	0,53	0-1	47	0-1	2	0	0,47
	2	0,42	0-2	58	1-2	2	1	0,11
	3	0,31	0-3	69	3-2	2	2	0,11
	4	0,23	0-4	77	4-3	1	3	0,07

Tabela 26: Valores médios em função do número de vezes que foi ablaçionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) do aço inox.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,00					n	
	1	0,26	0-1	74	0-1	4,7	0	0,74
	2	0,20	0-2	80	1-2	1,5	1	0,05
	3	0,18	0-3	82	3-2	1,2	2	0,02
	4	0,17	0-4	83	4-3	1,1	3	0,01
5	0	1,00						
	1	0,17	0-1	83	0-1	5,7	0	0,83
	2	0,08	0-2	92	1-2	2,2	1	0,09
	3	0,07	0-3	93	3-2	1,2	2	0,02
	4	0,06	0-4	94	4-3	1,1	3	0,01
1	0	1,00						
	1	0,36	0-1	64	0-1	2,9	0	0,64
	2	0,18	0-2	82	1-2	2,0	1	0,18
	3	0,11	0-3	89	3-2	1,7	2	0,07
	4	0,08	0-4	92	4-3	1,3	3	0,03

Tabela 27: Valores médios em função do número de vezes que foi ablacionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes valores de fluência do aço galvanizado.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1					n	
	1	0,045	0-1	95	0-1	22	0	0,95
	2	0,011	0-2	99	1-2	4	1	0,03
	3	0,007	0-3	99	3-2	2	2	0,00
	4	0,005	0-4	99	4-3	1	3	0,00
5	0	1						
	1	0,083	0-1	92	0-1	12	0	0,92
	2	0,024	0-2	98	1-2	5	1	0,06
	3	0,007	0-3	99	3-2	3	2	0,02
	4	0,004	0-4	100	4-3	2	3	0,00
1	0	1						
	1	0,27	0-1	73	0-1	4	0	0,73
	2	0,07	0-2	93	1-2	5	1	0,20
	3	0,03	0-3	97	3-2	3	2	0,04
	4	0,01	0-4	99	4-3	2	3	0,02

Tabela 28: Valores médios em função do número de vezes que foi ablacionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes valores de fluência do cobre.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,00					n	
	1	0,04	0-1	96	0-1	24	0	0,96
	2	0,03	0-2	97	1-2	1	1	0,01
	3	0,02	0-3	98	3-2	1	2	0,01
	4	0,02	0-4	98	4-3	1	3	0,01
5	0	1,00						
	1	0,03	0-1	97	0-1	31	0	0,97
	2	0,02	0-2	98	1-2	2	1	0,01
	3	0,02	0-3	98	3-2	1	2	0,00
	4	0,01	0-4	99	4-3	1	3	0,00
1	0	1,00						
	1	0,09	0-1	91	0-1	11	0	0,91
	2	0,04	0-2	96	1-2	2	1	0,05
	3	0,03	0-3	97	3-2	1	2	0,01
	4	0,02	0-4	98	4-3	1	3	0,01

Tabela 29: Valores médios em função do número de vezes que foi ablaçionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (K_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes valores de fluência do concreto.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,00					n	
	1	0,83	0-1	17	0-1	1	0	0,17
	2	0,73	0-2	27	1-2	1	1	0,09
	3	0,66	0-3	34	3-2	1	2	0,08
	4	0,59	0-4	41	4-3	1	3	0,06
5	0	1,00						
	1	0,84	0-1	16	0-1	1	0	0,16
	2	0,75	0-2	25	1-2	1	1	0,09
	3	0,66	0-3	34	3-2	1	2	0,08
	4	0,60	0-4	40	4-3	1	3	0,07
1	0	1,00						
	1	0,96	0-1	4	0-1	1	0	0,04
	2	0,95	0-2	5	1-2	1	1	0,01
	3	0,95	0-3	5	3-2	1	2	0,00
	4	0,95	0-4	5	4-3	1	3	0,01

Tabela 30: Valores médios em função do número de vezes que foi ablaçionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (K_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes valores de fluência do concreto espelhado.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,00					n	
	1	0,77	0-1	23	0-1	1	0	0,23
	2	0,60	0-2	40	1-2	1	1	0,17
	3	0,48	0-3	52	3-2	1	2	0,12
	4	0,39	0-4	61	4-3	1	3	0,09
5	0	1,00						
	1	0,80	0-1	20	0-1	1	0	0,20
	2	0,64	0-2	36	1-2	1	1	0,16
	3	0,53	0-3	47	3-2	1	2	0,11
	4	0,42	0-4	58	4-3	1	3	0,11
1	0	1,00						
	1	0,93	0-1	7	0-1	1	0	0,07
	2	0,89	0-2	11	1-2	1	1	0,04
	3	0,87	0-3	13	3-2	1	2	0,02
	4	0,84	0-4	16	4-3	1	3	0,03

Tabela 31: Valores médios em função do número de vezes que foi ablacionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes valores de fluência do chumbo.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,00					n	
	1	0,04	0-1	96	0-1	29	0	0,96
	2	0,02	0-2	98	1-2	1	1	0,02
	3	0,01	0-3	99	3-2	2	2	0,01
	4	0,01	0-4	99	4-3	2	3	0,00
5	0	1,00						
	1	0,05	0-1	95	0-1	21	0	0,95
	2	0,02	0-2	98	1-2	3	1	0,03
	3	0,01	0-3	99	3-2	2	2	0,01
	4	0,01	0-4	99	4-3	2	3	0,00
1	0	1,000						
	1	0,070	0-1	93	0-1	15	0	0,93
	2	0,011	0-2	99	1-2	6	1	0,06
	3	0,003	0-3	100	3-2	3	2	0,01
	4	0,002	0-4	100	4-3	2	3	0,00

Tabela 32: Valores médios em função do número de vezes que foi ablacionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes valores de fluência do polietileno.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,000					n	
	1	0,043	0-1	96	0-1	24	0	0,96
	2	0,006	0-2	99	1-2	7	1	0,04
	3	0,001	0-3	100	3-2	4	2	0,00
	4		0-4		4-3		3	
5	0	1,00						
	1	0,13	0-1	87	0-1	11	0	0,87
	2	0,04	0-2	96	1-2	7	1	0,09
	3	0,02	0-3	98	3-2	12	2	0,02
	4	0,06	0-4	94	4-3	1	3	0,00
1	0	1,00						
	1	0,72	0-1	28	0-1	1	0	0,28
	2	0,59	0-2	41	1-2	1	1	0,12
	3	0,53	0-3	47	3-2	1	2	0,06
	4	0,50	0-4	50	4-3	1	3	0,03

Tabela 33: Valores médios em função do número de vezes que foi ablacionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes valores de fluência do PVC.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2, 3, 4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
1	0	1,000					n	
	1	0,020	0-1	98	0-1	50	0	0,98
	2	0,000	0-2	100	1-2	17	1	0,02
	3	0,001	0-3	100	3-2	1	2	0,00
	4		0-4		4-3		3	
5	0	1,000						
	1	0,041	0-1	96	0-1	25	0	0,96
	2	0,003	0-2	100	1-2	13	1	0,04
	3	0,000	0-3	100	3-2	21	2	0,00
	4		0-4		4-3		3	
10	0	1,0						
	1	0,9	0-1	12	0-1	1	0	0,12
	2	0,5	0-2	46	1-2	2	1	0,34
	3	0,4	0-3	63	3-2	1	2	0,17
	4		0-4	71	4-3		3	

Tabela 34: Valores médios em função do número de vezes que foi ablacionado, taxa de contagem normalizada (C_n média), porcentagem de descontaminação (k_m), fator de descontaminação (F_m) e diferença de contagem (D_n médio) para diferentes fluências do vinil.

Fluência (J.cm ⁻²)	Ablação	C_n média (min ⁻¹)	i=0, f=1, 2,3,4	K_m (%)	i-f	F_m	$C_n - C_{n+1}$	D_n média (min ⁻¹)
10	0	1,000					n	
	1	0,004	0-1	100	0-1	280	0	1,00
	2	0,001	0-2	100	1-2	27	1	0,00
	3	0,000	0-3	100	3-2	0	2	0,00
	4		0-4		4-3		3	
5	0	1,000						
	1	0,007	0-1	99	0-1	143	0	0,99
	2	0,003	0-2	100	1-2	3	1	0,00
	3	0,001	0-3	100	3-2	2	2	0,00
	4		0-4		4-3		3	
1	0	1,00						
	1	0,35	0-1	65	0-1	3	0	0,65
	2	0,19	0-2	81	1-2	2	1	0,16
	3	0,15	0-3	85	3-2	1	2	0,04
	4		0-4		4-3		3	

Apêndice D – Análise dos materiais

D.1 - Diâmetro de ablação

As imagens de alguns dos materiais (PVC, polietileno, concreto, vinil e metais) que foram ablaçados com diferentes valores de fluência obtidas no MEV, no microscópio óptico e perfilômetro estão indicadas a partir das Figura 52 a Figura 60.

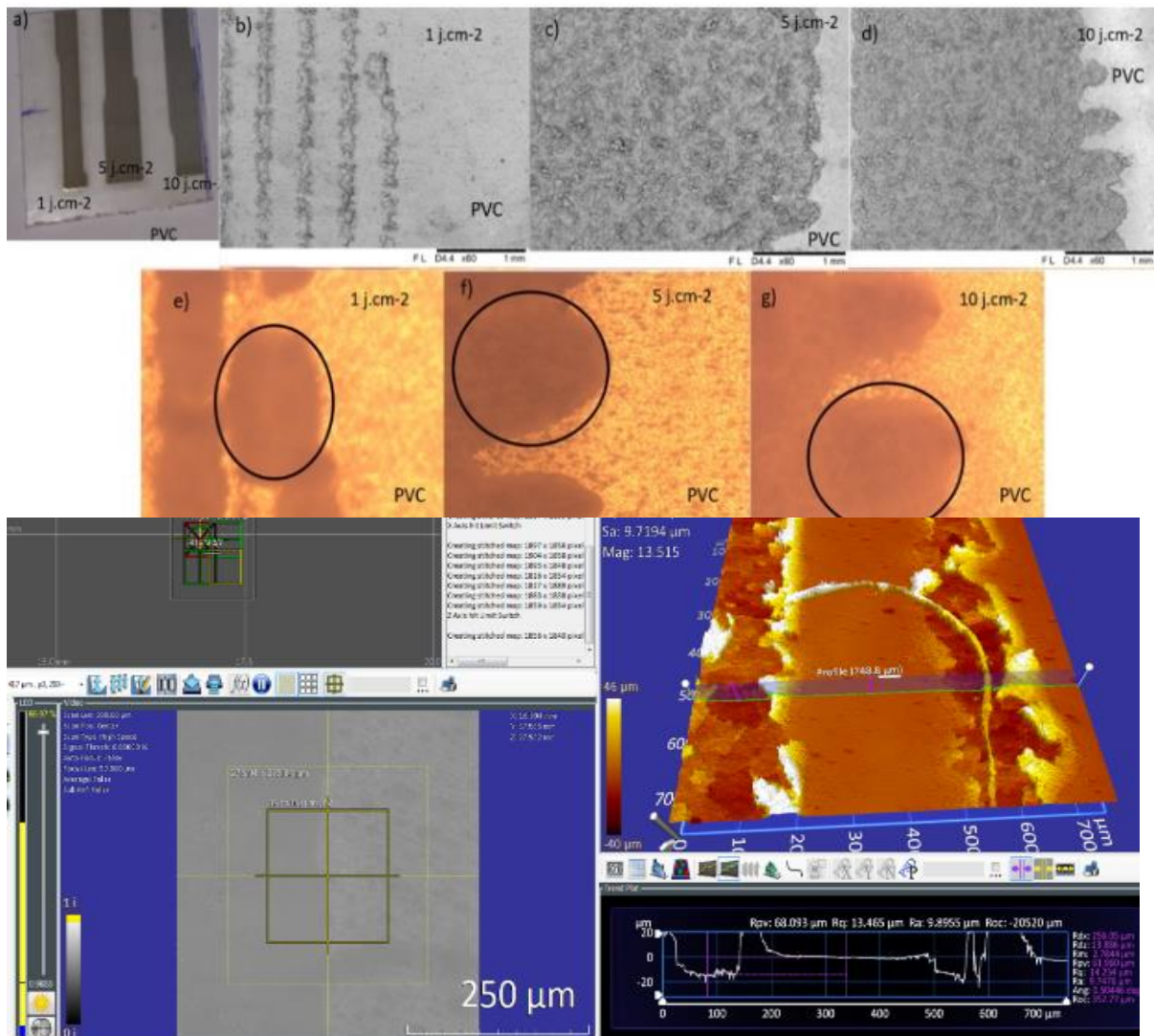


Figura 52: Imagens amostra de PVC (a) ablaçada com os três valores de fluência: no MEV (b, c, d); no microscópio óptico (e, f, g) e perfilometria (1 J.cm⁻²).

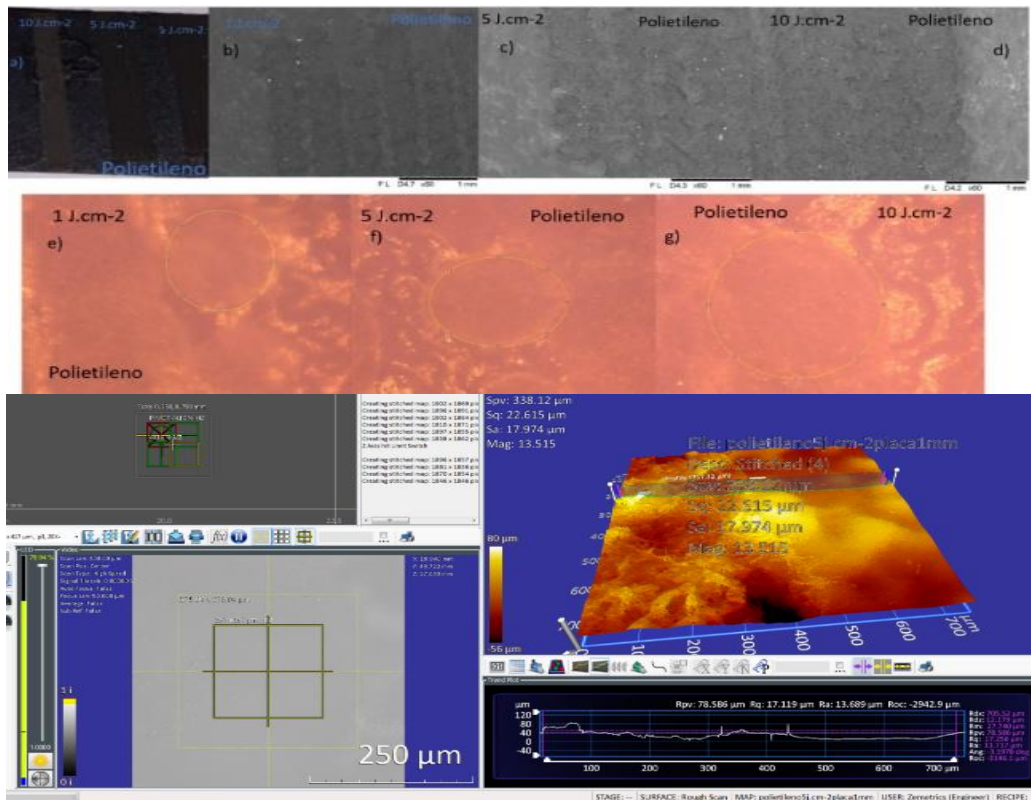


Figura 53: Imagens amostra de polietileno (a) ablacionada com os três valores de fluência: no MEV (b, c, d), no microscópio óptico (e, f, g) e perfilometria (5 J.cm⁻²).

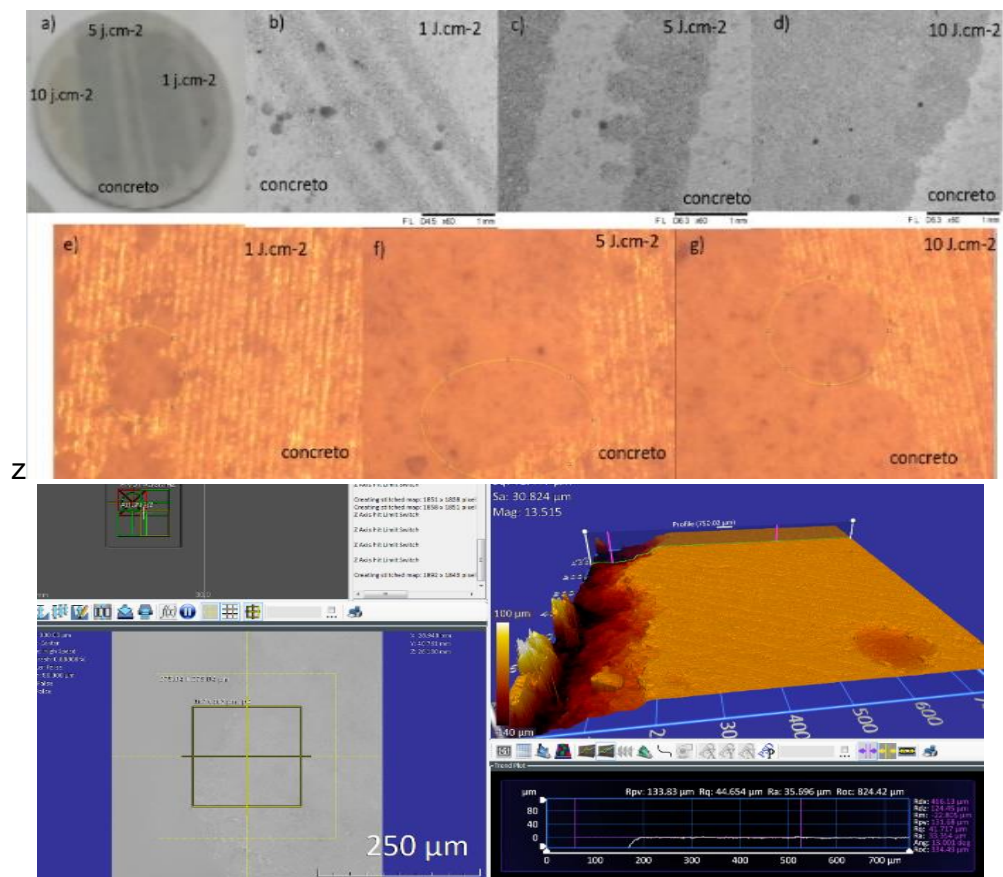


Figura 54: Imagens amostra de concreto (a) ablacionada com os três valores de fluência: no MEV (b, c, d) e no microscópio óptico (e, f, g). Imagens obtidas no perfilômetro para o concreto com 1, 5 e 10 J.cm⁻².

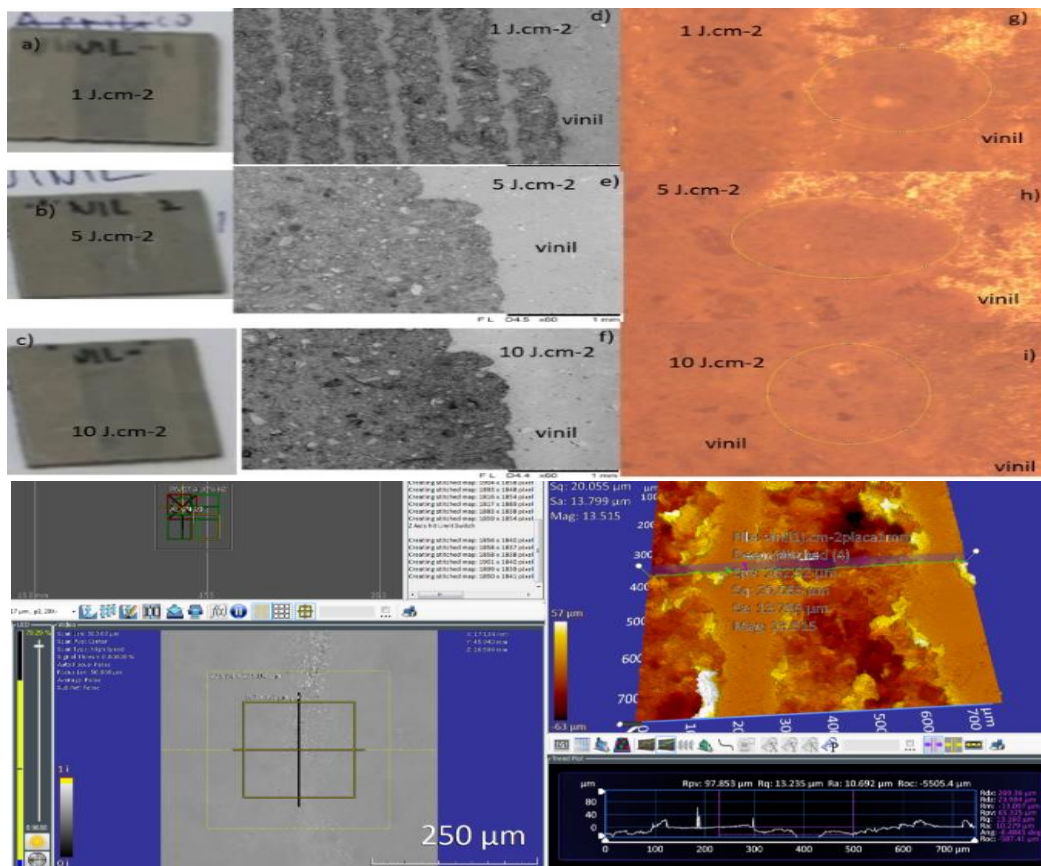


Figura 55: Imagens amostra de vinil (a, b, c) ablacionada com os três valores de fluência: no MEV (d, e, f), no microscópio optico (g, h, i) e perfilometria (1 J.cm⁻²).

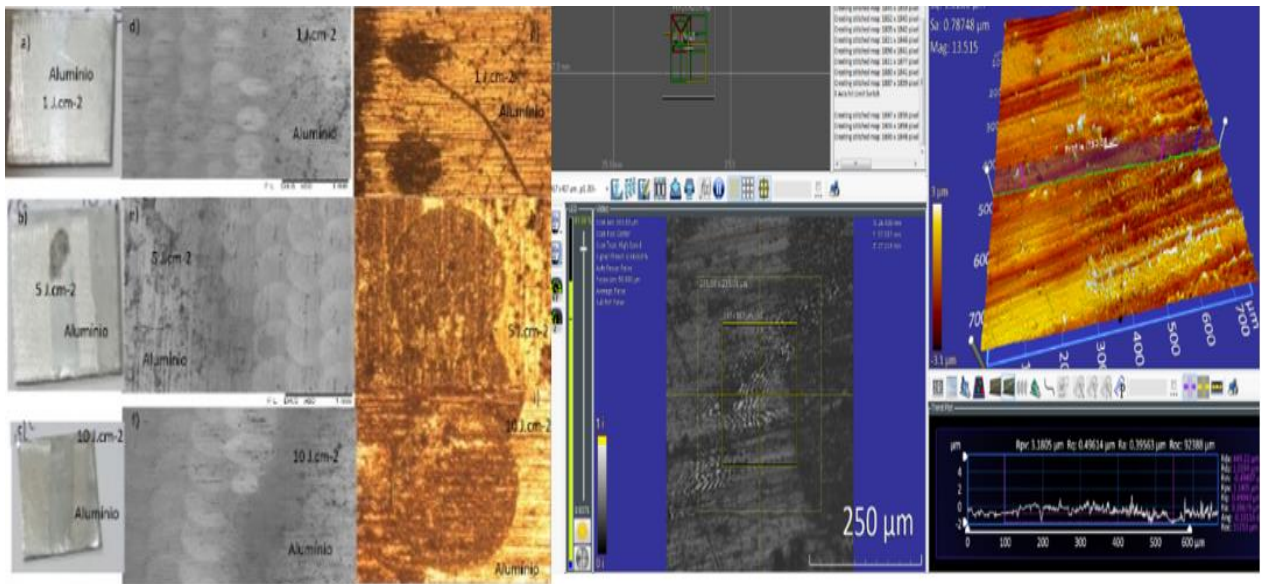


Figura 56: Imagens amostra de alumínio (a, b, c) ablacionada com os três valores de fluência: no MEV (d, e, f), no microscópio optico (g, h, i) e perfilometria (10 J.cm⁻²).

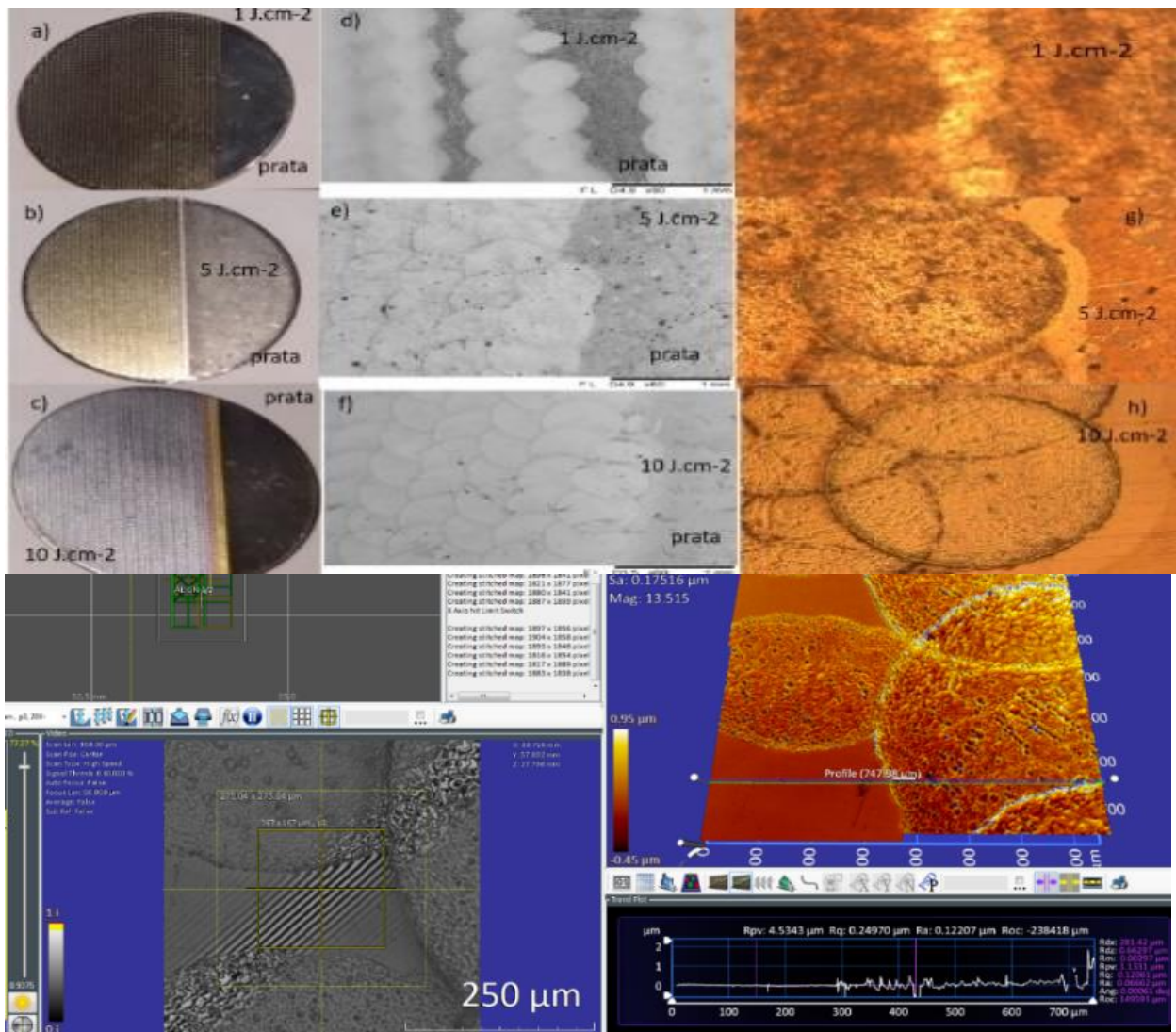


Figura 57: Imagens amostra de prata (a, b, c) ablacionada com os três valores de fluência: no MEV (d, e, f), no microscópio optico (g, h) e perfilometria (5 J.cm⁻²).

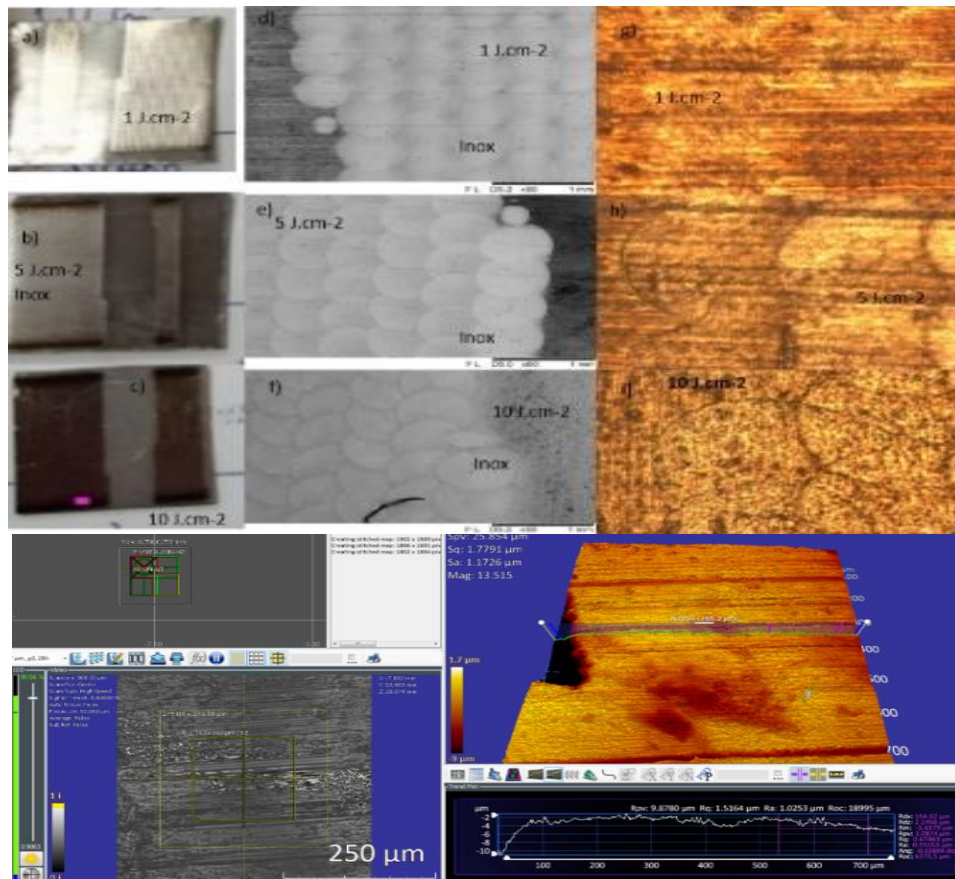


Figura 58: Imagens amostra de aço inox (a, b, c) ablacionada com os três valores de fluência, no MEV (d, e, f), no microscópio óptico (g, h, i) e perfilometria (1 J.cm⁻²).

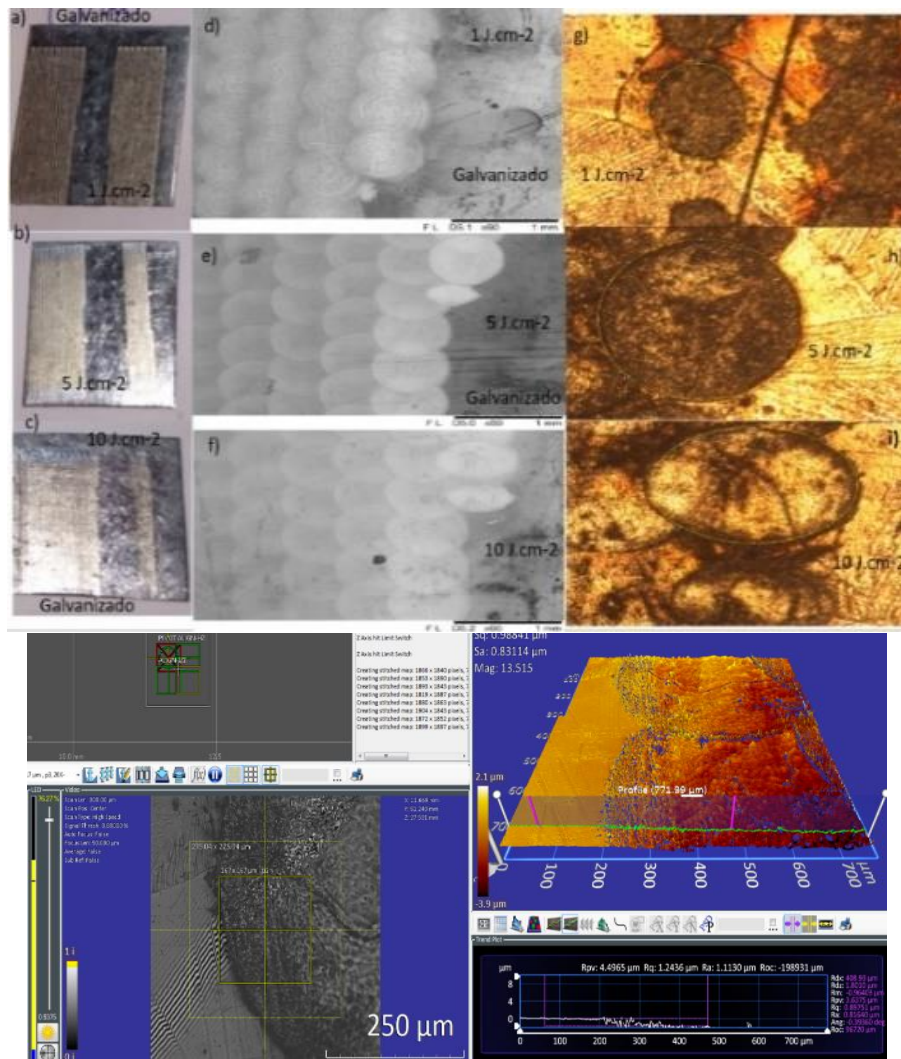


Figura 59: Imagens amostra de aço galvanizado (a, b, c) ablacionada com os três valores de fluência: no MEV (d, e, f), no microscópio óptico (g, h, i) e perfilometria (5 J.cm⁻²).

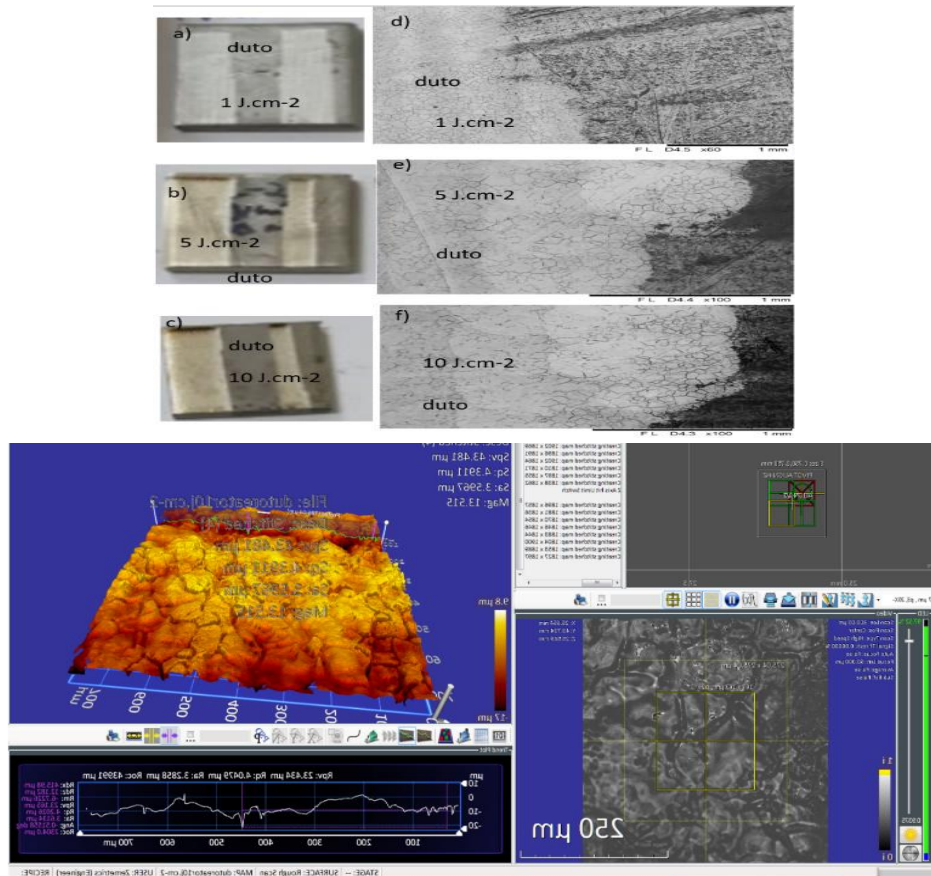


Figura 60: Imagens amostra do duto do reator (a, b, c) ablacionada com os três valores de fluência: no MEV (d, e, f) e perfilometria (10 J.cm⁻²).

D.2 - Profundidade linhas

As imagens da amostra de aço inox (Figura 13) com apenas uma linha (100 passagens do laser) obtidas no perfilômetro estão ilustradas Figura 61.

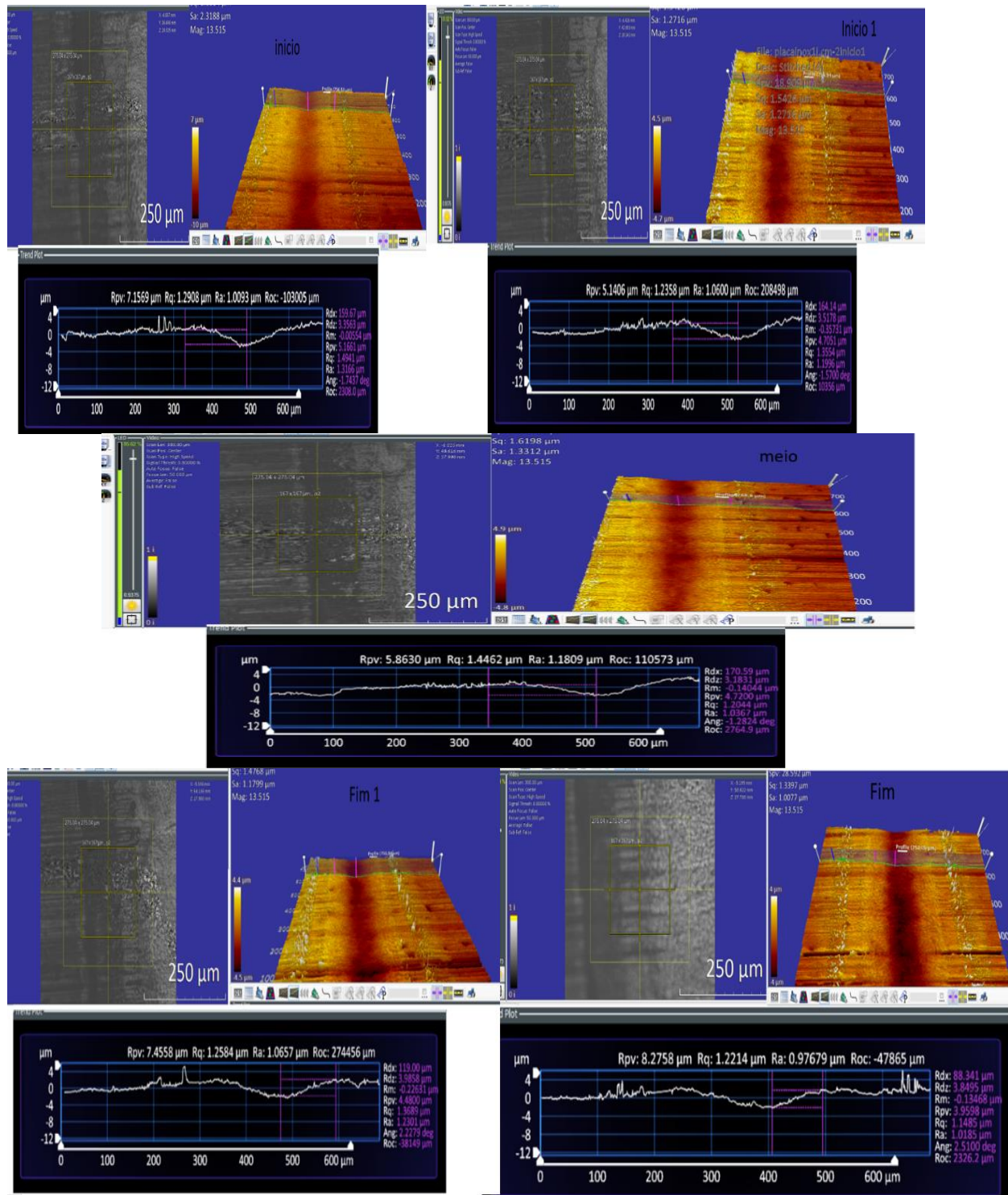


Figura 61: Imagem perfilômetro do aço inox ablacionado (1 J.cm^{-2}) numa mesma direção 100 vezes para as 5 regiões: início, início 1, meio, fim 1 e fim.

Apêndice E – Ajuste das contagens normalizadas

Os valores médios do ajuste da expdecay1 nas contagens normalizadas para os materiais estudados neste relatório para os três valores de fluências, estão indicados no subitem E.1 (Tabela 35 a Tabela 37). Os ajustes individuais das nove amostras para cada material para as diferentes fluências estão indicados nos subitens de E.2. a E.9, para as amostras de modo que: 1 a 3 (10 J.cm^{-2}), 4 a 6 (5 J.cm^{-2}) e de 7 a 9 (1 J.cm^{-2}).

E.1 - Contagens normalizadas médias

Tabela 35: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas médias para os diferentes valores de fluência para os materiais descontaminados para a fluência de 1 J.cm^{-2} .

	y_0	A_1	t_1	Chi ²
Inox	0,10	$1,00 \pm 0,01$	$0,85 \pm 0,02$	0,0001
Galvanizado	0,00	$1,00 \pm 0,01$	166 ± 1	0,02
Cobre	0,00	$1,00 \pm 0,06$	$0,6 \pm 0,1$	0,004
PVC	0,4	$0,7 \pm 0,1$	166 ± 1	0,02
Chumbo	0,00	$1,000 \pm 0,004$	$0,40 \pm 0,01$	0,00002
Acrílico	$0,80 \pm 0,02$	$0,22 \pm 0,02$	238 ± 1	0,0001
Polietileno	0,5	$0,50 \pm 0,01$	$115,7 \pm 0,1$	0,0001
Vinil	0,21	$0,80 \pm 0,02$	$0,81 \pm 0,05$	0,0004
Concreto	0,95	$0,050 \pm 0,001$	$0,60 \pm 0,04$	0,000002
Alumínio	0,13	$1,00 \pm 0,02$	$0,72 \pm 0,02$	0,00012
Aço carbono	0,23	$0,16 \pm 0,01$	$1,22 \pm 0,12$	0,00139
Concreto espelhado	0,84	$0,80 \pm 0,04$	$1,63 \pm 0,20$	0,00008

Tabela 36: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas médias para os diferentes valores de fluência para os materiais descontaminados para a fluência de 5 J.cm^{-2} .

	y_0	A_1	t_1	Chi ²
Inox	0,10	$1,00 \pm 0,01$	$0,5 \pm 0,1$	0,0004
Galvanizado	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,02$	0,0001
Cobre	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,04$	0,0003
PVC	0,00	$1,000 \pm 0,001$	$0,310 \pm 0,002$	0,000001
Chumbo	0,00	$1,00 \pm 0,05$	$0,1 \pm 10,0$	0,002
Acrílico	$0,70 \pm 0,04$	$0,31 \pm 0,06$	$0,9 \pm 0,5$	0,002
Polietileno	0,00	$1,00 \pm 0,04$	$0,5 \pm 0,1$	0,002
Vinil	0,00	$1,000 \pm 0,002$	$0,20 \pm 0,01$	0,000005
Concreto	0,60	$0,41 \pm 0,03$	$171,4 \pm 0,2$	0,00005
Alumínio	0,00	$1,00 \pm 0,04$	$0,45 \pm 0,07$	0,00131
Aço carbono	0,00	$1,00 \pm 0,02$	$0,91 \pm 0,04$	0,00045
Cimento espelhado	0,42	$0,60 \pm 0,04$	$1,83 \pm 0,30$	0,00213

Tabela 37: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas médios para os diferentes valores de fluência para os materiais descontaminados para a fluência de 10 J.cm^{-2} .

	y_0	A_1	t_1	Chi ²
Inox	0,17	$1,00 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,02$	0,0002
Galvanizado	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,02$	0,00005
Cobre	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,32 \pm 0,04$	0,0006
PVC	0,00	$1,000 \pm 0,001$	$0,300 \pm 0,02$	0,000001
Chumbo	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,31 \pm 0,03$	0,0002
Acrílico	$0,50 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,04$	$0,6 \pm 0,1$	0,001
Polietileno	0,00	$1,000 \pm 0,003$	$0,32 \pm 0,01$	0,00001
Vinil	0,00	$1,000 \pm 0,001$	$0,20 \pm 0,01$	0,0000005
Concreto	0,59	$0,42 \pm 0,02$	$167,8 \pm 0,2$	0,0006
Alumínio	0,00	$1,00 \pm 0,03$	$0,43 \pm 0,10$	0,00114
Aço carbono	0,00	$1,00 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,10$	0,0015
Cimento espelhado	0,40	$0,63 \pm 0,04$	$1,70 \pm 0,21$	0,00181

E.2 - Aços (inox, galvanizado e carbono)

Tabela 38: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas das amostras dos aços inox e galvanizado para os diferentes valores de fluência.

	Inox					Galvanizado			
	y_0	A_1	t_1	Chi ²		y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,00	$1,00 \pm 0,05$	$0,6 \pm 0,1$	0,002	1	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,02$	0,0001
2	0,13	$0,90 \pm 0,01$	$0,40 \pm 0,02$	0,0001	2	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,01$	0,0004
3	0,33	$0,70 \pm 0,03$	$0,5 \pm 0,1$	0,001	3	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,01$	0,00003
4	0,10	$1,00 \pm 0,01$	$0,45 \pm 0,01$	0,0001	4	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,42 \pm 0,01$	0,00003
5	0,10	$1,00 \pm 0,01$	$0,53 \pm 0,01$	0,0004	5	0,00	$1,00 \pm 0,02$	$0,41 \pm 0,04$	0,0004
6	0,11	$1,00 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,01$	0,00003	6	0,00	$1,000 \pm 0,001$	$0,40 \pm 0,01$	0,00003
7	0,10	$0,90 \pm 0,02$	$1,10 \pm 0,05$	0,0004	7	0,00	$1,00 \pm 0,01$	$0,80 \pm 0,01$	0,00004
8	0,10	$1,00 \pm 0,01$	$0,70 \pm 0,01$	0,00003	8	0,00	$1,00 \pm 0,02$	$0,82 \pm 0,04$	0,0005
9	0,10	$1,00 \pm 0,01$	$0,80 \pm 0,02$	0,0001	9	0,00	$1,00 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,03$	0,0003

Tabela 39: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas das amostras do aço carbono para os diferentes valores de fluência.

Amostras	y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,00	$1,00 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,10$	0,0015
2	0,00	$1,00 \pm 0,03$	$0,80 \pm 0,10$	0,00108
3	0,00	$1,00 \pm 0,04$	$0,83 \pm 0,10$	0,00129
4	0,00	$1,00 \pm 0,02$	$0,90 \pm 0,05$	0,0006
5	0,00	$1,00 \pm 0,02$	$0,94 \pm 0,05$	0,00055
6	0,00	$1,00 \pm 0,02$	$0,90 \pm 0,04$	0,00046
7	0,40	$0,60 \pm 0,10$	$1,03 \pm 0,34$	0,00808
8	0,14	$0,90 \pm 0,02$	$1,30 \pm 0,07$	0,00052
9	0,15	$0,85 \pm 0,02$	$1,21 \pm 0,06$	0,00042

E.3 - Metais (alumínio, cobre e chumbo)

Tabela 40: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas das amostras de alumínio e cobre para os diferentes valores de fluência.

Alumínio					cobre				
	y_0	A_1	t_1	Chi ²		y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,0	1,00 ± 0,03	0,40 ± 0,06	0,0008	1	0,00	1,00 ± 0,02	0,32 ± 0,05	0,001
2	0,0	1,00 ± 0,10	0,75 ± 0,20	0,0081	2	0,00	1,00 ± 0,03	0,32 ± 0,06	0,001
3	0,0	1,00 ± 0,03	0,43 ± 0,06	0,00114	3	0,00	1,00 ± 0,02	0,32 ± 0,05	0,0005
4	-	-	-	-	4	0,00	1,00 ± 0,02	0,30 ± 0,05	0,0004
5	0,0	1,00 ± 0,03	0,41 ± 0,06	0,00095	5	0,00	1,00 ± 0,02	0,31 ± 0,04	0,0003
6	0,0	1,00 ± 0,03	0,40 ± 0,05	0,00079	6	0,00	1,00 ± 0,01	0,30 ± 0,04	0,0002
7	0,2	1,00 ± 0,02	1,04 ± 0,04	0,00027	7	0,00	1,00 ± 0,04	0,50 ± 0,07	0,002
8	0,1	1,00 ± 0,01	0,61 ± 0,02	0,00015	8	0,00	1,00 ± 0,03	0,45 ± 0,05	0,001
9	0,1	1,00 ± 0,01	0,56 ± 0,02	0,00008	9	-	-	-	-

Tabela 41: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas das amostras de chumbo para os diferentes valores de fluência.

Amostras	y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,00	1,00 ± 0,01	0,26 ± 0,03	0,0001
2	0,00	1,00 ± 0,02	0,31 ± 0,04	0,0003
3	0,00	1,00 ± 0,01	0,31 ± 0,03	0,0002
4	0,00	1,00 ± 0,01	0,40 ± 0,02	0,0001
5	0,00	1,00 ± 0,02	0,34 ± 0,04	0,0003
6	0,00	1,00 ± 0,01	0,31 ± 0,02	0,0001
7	0,00	1,00 ± 0,01	0,400 ± 0,004	0,0000004
8	0,00	1,000 ± 0,003	0,40 ± 0,01	0,0001
9	0,00	1,000 ± 0,004	0,36 ± 0,01	0,0001

E.4 - PVC

Tabela 42: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas das amostras de PVC para os diferentes valores de fluência.

Amostras	y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,00	1,00 ± 0,01	0,26 ± 0,03	0,0000002
2	0,00	1,0000 ± 0,0002	0,260 ± 0,001	0,0000002
3	0,00	1,000 ± 0,001	0,250 ± 0,002	0,0000002
4	0,00	1,000 ± 0,001	0,300 ± 0,003	0,000002
5	0,00	1,0000 ± 0,0004	0,330 ± 0,001	0,00002
6	0,00	1,000 ± 0,002	0,310 ± 0,004	0,000003
7	0,20	0,9 ± 0,1	1,8 ± 0,5	0,01
8	0,40	0,7 ± 0,1	1,7 ± 0,4	0,01
9	0,32	0,8 ± 0,1	2,3 ± 0,6	0,02

E.5 - Polietileno

Tabela 43: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas das amostras de polietileno para os diferentes valores de fluência.

Amostras	y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,00	1,00 ± 0,01	0,32 ± 0,01	0,00003
2	0,00	1,000 ± 0,003	0,30 ± 0,01	0,00001
3	0,00	1,000 ± 0,002	0,34 ± 0,01	0,000001
4	0,00	1,00 ± 0,01	0,40 ± 0,01	0,0003
5	0,00	1,000 ± 0,001	0,400 ± 0,001	0,0000003
6	0,10	1,000 ± 0,003	0,60 ± 0,01	0,00001
7	0,51	0,50 ± 0,01	117,4 ± 0,1	0,002
8	1,00	0,40 ± 0,05	169,3 ± 0,4	0,003
9	0,35	0,65 ± 0,02	0,74 ± 0,01	0,0005

E.6 - Acrílico

Tabela 44: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as taxas de contagens das amostras de acrílico para os diferentes valores de fluência.

Amostras	y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,4 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,8 ± 0,4	0,01
2	0,601 ± 0,004	0,40 ± 0,01	0,60 ± 0,03	0,00003
3	0,43 ± 0,01	0,60 ± 0,02	0,5 ± 0,1	0,0003
4	0,73 ± 0,01	0,30 ± 0,01	0,6 ± 0,2	0,0003
5	0,44 ± 0,40	0,5 ± 0,4	252 ± 4	0,01
6	0,80 ± 0,2	0,22 ± 0,04	0,7 ± 0,4	0,001
7	-	-	-	-
8	0,920 ± 0,003	0,40 ± 0,05	0,8 ± 0,1	0,00001
9	-	-	-	-

E.7 - Vinil

Tabela 45: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas das amostras de vinil para os diferentes valores de fluência.

Amostras	y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,00	1,000 ± 0,001	0,200 ± 0,001	0,000001
2	0,00	1,000 ± 0,001	0,200 ± 0,004	0,000001
3	0,00	1,000000 ± 0,000003	0,200 ± 0,004	7,0 E-12
4	0,00	1,000 ± 0,001	0,210 ± 0,003	0,0000004
5	0,00	1,00000 ± 0,00002	0,200 ± 0,001	3 E-10
6	0,00	1,00 ± 0,01	0,21 ± 0,03	0,00002
7	0,20	0,80 ± 0,03	0,97 ± 0,11	0,001
8	0,21	0,80 ± 0,02	0,64 ± 0,06	0,0004
9	0,23	0,80 ± 0,03	0,90 ± 0,09	0,0005

E.8 - Concreto

Tabela 46: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas das amostras de concreto para os diferentes valores de fluência.

Amostras	y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,70	0,30 ± 0,02	1,6 ± 0,2	0,0004
2	0,60	0,42 ± 0,03	1,7 ± 0,2	0,001
3	0,50	0,52 ± 0,03	1,7 ± 0,2	0,001
4	0,61	0,40 ± 0,03	1,9 ± 0,3	0,001
5	0,60	0,42 ± 0,03	1,6 ± 0,2	0,001
6	0,60	0,43 ± 0,03	1,8 ± 0,3	0,001
7	1,00	0,100 ± 0,004	0,6 ± 0,1	0,00002
8	1,00	0,040 ± 0,003	155,0 ± 0,2	0,00001
9	1,00	0,060 ± 0,004	107,0 ± 0,2	0,00002

E.9 - Concreto espelhado

Tabela 47: Parâmetros do ajuste da função expdecay1 obtidos para as contagens normalizadas das amostras de concreto espelhado para os diferentes valores de fluência.

Amostras	y_0	A_1	t_1	Chi ²
1	0,45	0,56 ± 0,04	1,70 ± 0,20	0,00144
2	0,35	0,67 ± 0,05	1,71 ± 0,24	0,00263
3	0,37	0,64 ± 0,04	1,70 ± 0,21	0,00185
4	0,53	0,49 ± 0,04	1,90 ± 0,30	0,00177
5	0,40	0,62 ± 0,05	1,90 ± 0,30	0,00295
6	0,34	0,68 ± 0,04	1,74 ± 0,21	0,00199
7	0,84	0,16 ± 0,01	1,31 ± 0,10	0,00004
8	0,86	0,15 ± 0,01	1,98 ± 0,36	0,00021
9	0,81	0,20 ± 0,01	1,82 ± 0,24	0,00019

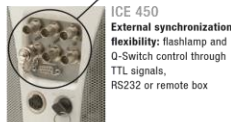


Quantel

Ultra

Ultra compact Q-Switched Nd:YAG oscillator

- 1064, 532, 355, 266, 213 nm and 1.57 μm available
- Alignment guaranteed
- Quick umbilical disconnects
- Compact and portable
- Gaussian or multimode resonators
- 50 million shots lamp lifetime guaranteed
- Built to withstand harsh environments



ICE 450 External synchronization flexibility: flashlamp and Q-Switch control through TTL signals, RS232 or remote box



	Dimensions All dimensions H x L x W are in mm [inches]	Weight All weights are in kg [lbs]
Optical laser head	51 x 206 x 76 [2 x 8 x 3]	0.9 [2]
Integrated Cooling and Electronics		
ICE 450	360 x 435 x 133 [14.2 x 17.2 x 5.25]	14 [31]
ICE450 Rack 19" (optional)	133 x 508 x 483 [5.25 x 20 x 19]	14.5 [32]
Remote Control	195 x 100 [7.7 x 4]	
Options		
Harmonic generators (2 ω, 2 ω/3 ω, 2 ω/4 ω):	L = 91 [3.6]	0.5 [1.1]
Wavelength separation (WS2)	L = 45 [1.8]	0.2 [0.45]
Fiber Optical Adaptor IR (FOA)	L = 76 [3]	0.4 [1]
Motorized Variable Attenuator (MTVAT)	L = 100 [4]	0.6 [1.3]
OPO	L = 95 [3.8]	0.6 [1.3]



Near field @1064 nm, Stable resonator Far field @1064 nm, GRM resonator



Near field @532 nm, Stable resonator Far field @532 nm, GRM

ULTRA
BIG SKY LASER SERIES



ICE 450 Rack 19"



Ultra Specifications

RESONATOR ⁽¹⁾	ULTRA 20		ULTRA 50		ULTRA 100			
	⁽²⁾ TEM ₀₀	Stable	Stable	GRM	Stable	GRM		
REPETITION RATE (Hz)	1 to 20	1 to 50	1 to 20	20	1 to 20	20		
ENERGY PER PULSE (mJ)								
1064 nm	10	20		50		100		
532 nm	6	12		30		55		
355 nm	2	4		12		30		
266 nm	1	4		10	25	15		
213 nm					4			
1.57 μm *			8		25			
ENERGY STABILITY (%)							Variation from mean for 99% of shots (RMS)	
1064 nm	<2	<2.5	<2	<4	<2	<2		
532 nm	<3.5	<4	<2.5	<5	<2.5	<2.5		
355 nm	<4	<3	<3	<6	<2	<3		
266 nm	<5	<3	<3	<6	<2	<3		
213 nm					<2			
1.57 μm			<2		<2			
PULSE DURATION (ns)								FWHM +/- 2ns
1064 nm	9	11	8	7	8.5	7		
532 nm	8	10	7	7	6	6.5		
355 nm	7	9	6	6	6	5.5		
266 nm	7	9	6	6	6	6		
213 nm					5			
1.57 μm			8		7			
LINewidth (cm⁻¹)							Measured from Q-Switch Sync. Output Full Angle 99% of shots	
1064 nm				1				
532 nm				2				
355 nm				3				
266 nm				4				
1.57 μm				20				
JITTER (+/-ns WRT Q-Switch)				<2			Angle containing 86.5% energy. Other methods can predict lower values fro GRM systems	
POINTING STABILITY (μrad)				<50				
DIVERGENCE (mrad)								
1064 nm	<2.5	<6	<7	<1.5	<8	<1.5		
532 nm	<1.5	<5	<6	<1.5	<7	<1		
355 nm	<1	<4	<5	<1.2	<5	<1.5		
266 nm	<1	<4	<7	<1.5	<4	<1.5		
213 nm					<3			
1.57 μm			>12		<12			
BEAM DIAMETER (mm)	1.3	2.5	3		4			

ENERGY DRIFT OVER 8 HOURS PERIOD ⁽⁵⁾	< 10 %
POLARIZATION	
1064 nm	Horizontal
532 nm	Vertical
355 nm	Vertical
266 nm	Vertical
213 nm	Vertical
1.57 μm	Horizontal
SPECTRAL PURITY (%)	
532 nm	> 97
355 nm	> 90
266 nm	> 85
1.57 μm	> 99.9
OPERATIONAL TEMPERATURE RANGE ⁽⁵⁾	Operating ⁽⁴⁾ 10 °C - 40 °C
STORAGE TEMPERATURE RANGE ⁽⁵⁾	5 °C - 70 °C
ETHYLENE GLYCOL OPTION (EGW) ⁽⁵⁾ ⁽⁵⁾	
Operating ⁽⁴⁾	-10 °C - 40 °C
Storage	-30 °C - 70 °C
FLASHLAMP LIFETIME ⁽⁵⁾	> 50 million shots
MAX. ALTITUDE ⁽⁵⁾	3000 m [10.000 feet]
SERVICE REQUIREMENT	100 – 240 V 10 A 50 - 60 Hz Single phase
CABLE LENGTH	3 m [10 feet] other lengths available on request

* Other wavelength upon request

⁽¹⁾ Stable systems may operate over a wide range of rep. rate; GRM may not have such flexibility.
⁽²⁾ Engineering values.
⁽³⁾ 10% energy drop at 1064 nm.
⁽⁴⁾ For IR laser head only. Temperature performance available upon request for higher harmonics.
⁽⁵⁾ Specifications applying to all 1064 nm laser heads.

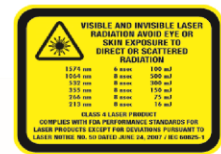
OPTIONS

LOW TEMPERATURE OPERATION (EGW)
 MOTORIZED OR MANUAL VARIABLE ATTENUATOR ON REQUEST
 FIBER OPTION ADAPTER AT 1064 NM OR 532 NM
 ON REQUEST
 ICE450 RACK19™

Note on beam divergence:
 Quantel pioneered beam measurement software and measures divergence as angle containing energy. For GRM systems, this returns a figure which can be considerably larger than that given using alternative criteria.



For more details and technical drawings, please visit www.quantel-laser.com



Quantel - France
 2 bis, avenue du Pacifique
 Z.A. de Courtaboeuf - BP 23
 91941 Les Ulis Cedex - France
 Tel. +33 (0)1 69 29 17 00

Quantel - USA
 601 Haggerty Lane
 Bozeman, MT 59715 - USA
 Tel. +1 406 586 0131 / 1 877 QUANTEL

Quantel - GmbH
 Worringer Str. 30
 50668 Köln - Germany
 Tel. +49 (0) 221 / 677856750

E-mail : quantel@quantel-laser.com

www.quantel-laser.com



REFERÊNCIAS

- [1]: Carvalho, J. F. Primórdios e percalços do programa eletronuclear. **Estudos Avançados**, v. 27, p. 267-271, 2013. ISSN 0103-4014.
- [2]: Severa, J.; Bár, J. **Handbook of Radioactive Contamination and Decontamination**. Elsevier, 1991. ISBN 9780444987570.
- [3]: Veiko, V. P.; Mutin, T. Y.; Smirnov, V. N. e Shakhno, E. A. Laser decontamination of radioactive nuclides polluted surfaces. **Laser Phys**, v. 21, p.608–613, 2011.
- [4]: Phipps, C. **Laser Ablation and Its Applications**. Springer, 2007. ISBN 9780387304526.
- [5]: Kumar, A.; Biswas, D. J. Particulate size and shape effects in laser cleaning of heavy metal oxide loose contamination off clad surface. **Opt Laser Technol**, 2018. doi:10.1016/j.optlastec.2018.04.027.
- [6]: Kumar, A. *et al.* Laser-Assisted Decontamination of Fuel Pins for Prototype Fast Breeder Reactor. **Nucl Technol**, 2017. doi:10.13182/nt13-a16434.
- [7]: Anthofer, A.; Kögler, P.; Friedrich, C.; Lippmann, W.; Hurtado, A. Laser decontamination and decomposition of PCB-containing paint. **Opt Laser Technol**, 2017. doi:10.1016/j.optlastec.2016.07.006.
- [8]: Sugathan, B.; Nilaya, J. P.; Pillai, V. P. M.; Biswas, D. J. Studies on surface pitting during laser assisted removal of translucent ellipsoidal particulates from metallic substrates. **Opt Lasers Eng**, 2017. doi:10.1016/j.optlaseng.2016.11.009.
- [9]: Nikishin, G. D. *et al.* Application of laser technologies for stabilization of environmental safety improvement in the course of utilization of nuclear-powered submarines. **Radiation and Environmental Safety in North-West Russia**, v. 9, 2006.
- [10]: Delaporte, P. *et al.* Radioactive oxide removal by XeCl laser. **Applied Surface Science**, v.197, p. 826-830, 2002. doi:10.1016/S0169-4332(02)00456-7.
- [11]: Anthofer, A.; Lippmann, W.; Hurtado, A. Development and testing of a laser-based decontamination system. **Opt Laser Technol**, v. 48, p. 589–598, 2013.
- [12]: Potiens, A. J. *et al.* Laser decontamination of the radioactive lightning rods. **Radiat Phys Chem**, v. 95, p. 188–190, 2014.
- [13]: Coelho, H. P. J. B. ., Raele, M. P.; Secco, M. Estudo da Viabilidade de Descontaminação de Amostras do Tubo de Refrigeração do Reator do IPEN Via Laser. (2015).
- [14]: KOSCHMIEDER, E. L. Bénard Cells and Taylor Vortices. Cambridge University Press, 1993.
- [15]: Hitz, B.; Ewing, J.J.; Hecht, J. **Introduction to Laser Technology**. IEEE Computer Society Press, 2014. ISBN 978-0470916209.
- [16]: Kannatey-Asibu Jr, E., 2009, “Principles of Laser Materials Processing”, Ed. John Wiley & Sons, New Jersey, United States of America.
- [17]: R.W. Fuerschbach, J.T. Norris, R.C. Dykhuizen, and A.R. Mahoney, Development and Evaluation of an In-Situ Beam Measurement for Spot Welding Lasers, *Welding Journal* 83(2004) 154-159.
- [18]: Comissão Nacional de Energia Nuclear. **GERÊNCIA DE REJEITOS RADIOATIVOS DE BAIXO E MÉDIO NÍVEIS DE RADIAÇÃO**. (2014). COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN. **Gerência de Rejeitos Radioativos de baixo e médio níveis de radiação**. CNEN-NE-8.01. Rio de Janeiro, 2014.