



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Ben Hur Ribas Maciel

**UNIÃO POR DIFUSÃO DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL 316L USINADAS POR
LAPIDAÇÃO COM DIFERENTES ACABAMENTOS**

Florianópolis
2025

Ben Hur Ribas Maciel

**UNIÃO POR DIFUSÃO DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL 316L USINADAS POR
LAPIDAÇÃO COM DIFERENTES ACABAMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Fábio Antonio Xavier, Dr. Eng
Coorientador: Lucas de Andrade Caldas, Me.Eng.

Florianópolis

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela
BU/UFSC.

Dados inseridos pelo próprio autor.

Maciel, Ben Hur Ribas

União por difusão de chapas de aço inoxidável 316L
usinadas por lapidação com diferentes acabamentos / Ben
Hur Ribas Maciel ; orientador, Fábio Antonio Xavier,
coorientador, Lucas de Andrade Caldas, 2025.

97 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Mecânica,
Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Lapidação. 3. Acabamento de
superfície. 4. União por difusão. I. Xavier, Fábio
Antonio. II. Caldas, Lucas de Andrade. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

Ben Hur Ribas Maciel

**UNIÃO POR DIFUSÃO DE CHAPAS DE AÇO INOXIDÁVEL 316L USINADAS POR
LAPIDAÇÃO COM DIFERENTES ACABAMENTOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Mecânica

Florianópolis, 08 de agosto de 2025.

 Documento assinado digitalmente
Antonio Carlos Valdiero
Data: 30/10/2025 17:22:46-0300
CPF: ***.227.377-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Antonio Carlos Valdiero, Dr.Eng.

Coordenador do Curso

Banca examinadora

 Documento assinado digitalmente
Fabio Antonio Xavier
Data: 22/10/2025 10:13:10-0300
CPF: ***.591.289-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Fábio Antonio Xavier, Dr.Eng.

Orientador

Prof. Carlos Enrique Niño Bohórquez, Dr.Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Erick Cardoso Costa, Dr.Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina

Bianca Müller Martins, Me.Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2025

Dedico este trabalho aos meus pais, que edificaram nossa família sobre bases sólidas e nunca mediram esforços para educar seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me proporcionou as condições necessárias e foi minha base durante todo esse período.

Aos meus pais, Celso Tadeu Fucilini Maciel e Eliana Ribas Maciel, que sempre foram exemplos de dedicação e compromisso em diversos aspectos da vida. Apesar das dificuldades e da distância, estiveram sempre disponíveis para me auxiliar. Ao meu irmão, Odmartan Ribas Maciel, que sempre foi uma referência e um exemplo a ser seguido.

Aos meus avós maternos, Maria Ribas e Odorico Ribas, que sempre demonstraram carinho e preocupação com seu neto. Mesmo diante das dificuldades e limitações da vida no interior do Rio Grande do Sul, foram eles que instituíram, em nossa família, a valorização do ensino superior.

Ao meu orientador, Prof. Fábio Antonio Xavier, pela oportunidade, pelas orientações e pelo apoio ao longo de todas as etapas deste trabalho. Ao meu coorientador, Lucas de Andrade Caldas, por todo o suporte e, principalmente, pela constante disposição durante essa jornada. Ambos são verdadeiros exemplos de profissionais, cuja competência, ética e generosidade deixaram uma marca essencial nesta trajetória.

Aos meus amigos Dimitri, Diniz, Eduardo Güths, Giordan, Julia Pires e Tin, que estiveram ao meu lado nos últimos anos, acompanhando diferentes fases e momentos da minha vida. A presença de vocês nos momentos sérios e de descontração foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos de Ijuí, que, apesar da distância, sempre se fizeram presentes na minha vida, proporcionando ótimos momentos e me ensinando o verdadeiro significado do companheirismo.

À Universidade Federal de Santa Catarina, aos laboratórios nos quais desenvolvi atividades e a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, deixo também meu sincero agradecimento.

“Os milagres não são contrários à natureza, mas apenas ao que sabemos sobre a natureza.”

(Santo Agostinho)

RESUMO

A demanda por eficiência térmica em ambientes com restrições de espaço, como plataformas *offshore*, impulsiona o uso de trocadores de calor compactos fabricados em aços inoxidáveis austeníticos, como o AISI 316L, devido à sua elevada resistência à corrosão. No entanto, a complexidade geométrica e as limitações dos processos soldagem exigem métodos alternativos de união, como a união por difusão, cuja qualidade é diretamente influenciada pelo acabamento proveniente de processos de usinagem anteriores. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência dos parâmetros de lapidação, como pressão, velocidade de rotação do disco de lapidação e tempo de lapidação, no acabamento de chapas de aço inoxidável AISI 316L, bem como o impacto de diferentes acabamentos das chapas lapidadas na qualidade da união por difusão. Foram realizados experimentos com duas granulometrias de abrasivos de SiC (33 μm e 12,8 μm), aplicando um planejamento experimental do tipo 2^k com ponto central para determinar a condição ideal de lapidação, avaliando o acabamento de superfície e a taxa de remoção. Posterior, a condição ótima de lapidação foi aplicada em diferentes processos de acabamento, polimento e eletropolimento. Por fim, as amostras lapidadas, polidas e eletropolidas foram unidas por difusão para avaliar o impacto do acabamento na qualidade da união por difusão. O acabamento dos processos de usinagem foi caracterizado utilizando a interferometria de luz branca. A qualidade da união foi caracterizada utilizando microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS). Os resultados mostraram que o aumento do tempo de lapidação favorece a obtenção de superfícies mais homogêneas e com menor rugosidade. A condição ótima identificada (15 RPM, 12 kPa e 50 min) resultou em valores reduzidos de rugosidade média (S_a) e profundidade de vales (S_v), 0,265 μm e 2,732 μm , respectivamente. O aumento da pressão, de 6 kPa para 12 kPa, e da granulometria do abrasivo influenciaram significativamente no aumento da taxa de remoção de material, enquanto o aumento do tempo de lapidação ocasionou na redução da taxa. Quanto à união por difusão com diferentes acabamentos, a condição lapidada apresentou defeitos ao longo da linha de união, não havendo um preenchimento total dos vazios durante as etapas de difusão, o polimento manual apresentou um acabamento não homogêneo da superfície usinada, nas condições lapidada e polida observou-se a presença de uma região em que os contornos de grão não são visíveis apesar do ataque químico, não sendo constatadas grandes variações na composição química. As chapas eletropolidas apresentaram os melhores resultados, com menor rugosidade média e quando unida, menores vazios e a migração dos contornos de grãos através da linha de união.

Palavras-chave: lapidação; união por difusão; acabamento de superfície.

ABSTRACT

The demand for thermal efficiency in environments with space constraints, such as offshore platforms, drives the use of compact heat exchangers made of austenitic stainless steels, such as AISI 316L, due to their high corrosion resistance. However, geometric complexity and the limitations of welding processes require alternative joining methods, such as diffusion bonding, whose quality is directly influenced by the surface finish resulting from previous machining operations. In this context, the present work aimed to evaluate the influence of lapping parameters—such as pressure, lapping disc rotation speed, and lapping time—on the surface finish of AISI 316L stainless steel plates, as well as the impact of different surface finishes on the quality of the diffusion bond. Experiments were carried out using two SiC abrasive grit sizes (33 μm and 12.8 μm), applying a 2^k factorial experimental design with a central point to determine the optimal lapping condition, evaluating both surface finish and material removal rate. Subsequently, the optimal lapping condition was applied in different finishing processes: polishing and electropolishing. Finally, the lapped, polished, and electropolished samples were diffusion bonded to assess the effect of surface finish on bond quality. The machining surface finish was characterized using white light interferometry, while bond quality was analyzed using optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results showed that increasing the lapping time promotes the formation of more homogeneous surfaces with lower roughness. The optimal condition identified (15 RPM, 12 kPa, and 50 min) resulted in reduced values of average roughness (S_a) and valley depth (S_v), 0.265 μm and 2.732 μm , respectively. Increasing the pressure (from 6 kPa to 12 kPa) and the abrasive grit size significantly increased the material removal rate, whereas longer lapping times reduced it. Regarding diffusion bonding with different surface finishes, the lapped condition showed defects along the bond line, with incomplete void filling during the diffusion stages. Manual polishing produced a non-homogeneous surface finish, and in both lapped and polished conditions, a region with indistinct grain boundaries was observed despite chemical etching, with no significant variations in chemical composition. The electropolished plates presented the best results, showing the lowest average roughness and, when bonded, smaller voids and noticeable grain boundary migration across the bond line.

Keywords: lapping; diffusion bonding; surface finish.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das etapas do processo de união por difusão.....	21
Figura 2 - Representação esquemática de S_{sk}	24
Figura 3 - Representação esquemática de S_{ku}	24
Figura 4 - Esquemas do processo de lapidação plana, coplanar, cilíndrica e de perfil	26
Figura 5 - Sistema com quatro componentes do processo de lapidação	26
Figura 6 - Tensões residuais conforme a profundidade abaixo da superfície	28
Figura 7 - Taxa de remoção de material e da rugosidade conforme a dureza do abrasivo	30
Figura 8 - Taxa de remoção de material conforme o tamanho do grão abrasivo	31
Figura 9 – Rugosidade em função tamanho do grão abrasivo	32
Figura 10 - Carbetto de silício com granulometria de 8 μm e 23 μm	33
Figura 11 – (a) Taxa de remoção de material e (b) Rugosidade em função da concentração de abrasivo	34
Figura 12 – Diferentes tipos de discos de lapidação	35
Figura 13 - Esquema da distribuição de pressão para discos com e sem ranhuras	36
Figura 14 - Rugosidade e taxa de remoção de material em função da dureza da peça de trabalho.....	38
Figura 15 - Lapidadora coplanar com mecanismo de cinemática planetária	39
Figura 16 - Trajetórias hipocicloides e epicicloides.....	39
Figura 17 - Possíveis interações entre os componentes no processo de lapidação.....	41
Figura 18 – Remoção de material conforme o tipo de material e abrasão ...	43
Figura 19 - Mecanismo de corte frágil e dúctil	44
Figura 20 - Superfície do aço inoxidável AISI 304 lapidado, aproximada 500X	45
Figura 21 - Taxa de remoção de material em função do aumento da pressão	47
Figura 22 - Rugosidade e planicidade em função do aumento da pressão ..	48

Figura 23 - Rugosidade e planicidade em função do aumento da velocidade	49
Figura 24 - Comportamento da rugosidade em função do tempo de lapidação	50
Figura 25 - Taxa de remoção de material conforme o tempo de lapidação ..	51
Figura 26 - Mecanismos de remoção de material no polimento de metais ...	53
Figura 27 - Esquema do processo de eletropolimento	54
Figura 28 - Fluxograma das atividades desenvolvidas	57
Figura 29 - Geometria para lapidação, dimensões em mm	58
Figura 30 - Disposição das peças de trabalho na lapidadora	59
Figura 31 - Regiões das medições de rugosidade	62
Figura 32 - Geometria das amostras para união a partir da amostra lapidada, dimensões em mm	63
Figura 33 - Bancada de eletropolimento	63
Figura 34 - Posicionamento da amostra para união na matriz (a) e matriz fechada (b)	64
Figura 35 - Ciclo de união	65
Figura 36 – Projeção axonométrica da condição inicial	66
Figura 37 - Projeções axonométricas das condições 1 e 4	68
Figura 38 - Projeções axonométricas das condições 0 e 14	70
Figura 39 - Projeções axonométricas da condição 7	71
Figura 40 - S_a para as quinze condições avaliadas e conforme recebido	73
Figura 41 - S_a para as condições selecionadas após cada operação	75
Figura 42 - S_q para as condições selecionadas após cada operação	77
Figura 43 - S_p para as condições selecionadas após cada operação	78
Figura 44 - S_v para as condições selecionadas após cada operação	80
Figura 45 – Amostras com diferentes acabamentos, via lapidação (a), polimento mecânico (b) e	83
Figura 46 - Projeção axonométrica de amostras com acabamento via polimento (a) e	83
Figura 47 – S_a (a) e S_q (b) para os diferentes acabamentos	84
Figura 48 - S_p (a) e S_v (b) para os diferentes acabamentos	85
Figura 49 - Microestruturas da amostra lapidada após união por difusão. (a) aumento de 100X. (b) aumento de 200X	86

Figura 50 - Imagem obtida por MEV da amostra lapidada, com aumento de 2000X.....	87
Figura 51 - Microestruturas da amostra polida após união por difusão. (a) aumento de 100X. (b) aumento de 200X.	88
Figura 52 - Microestruturas da amostra polida após união por difusão, em uma segunda região. (a) aumento de 100X. (b) aumento de 200X.....	88
Figura 53 - Microestruturas da amostra eletropolida após união por difusão. (a) aumento de 100X. (b) aumento de 200X.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dureza dos materiais abrasivos em escala Mohs.	29
Tabela 2 - Composição química padrão para o aço inoxidável 316L	58
Tabela 3 - Parâmetros e valores avaliados	60
Tabela 4 – Condições e parâmetros utilizados	61
Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade das condições 1 e 4.....	68
Tabela 6 - Parâmetros de rugosidade das condições 0 e 14.....	70
Tabela 7 - Parâmetros de rugosidade da condição 7	72
Tabela 8 - Valores da mediana de S_a para as condições selecionadas	75
Tabela 9 - Valores da mediana de S_q para as condições selecionadas	77
Tabela 10 - Valores da mediana de S_p para as condições selecionadas	78
Tabela 11 - Valores da mediana de S_v para as condições selecionadas	80
Tabela 12 - Quantidade e taxa de remoção de material para a lapidação com abrasivos de 33 μm	81
Tabela 13 - Quantidade e taxa de remoção de material para a lapidação com abrasivos de 12,8 μm	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano de Ferro e Aço)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana para Testes e Materiais)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
DoE	<i>Design of Experiment</i> (Planejamento de Experimentos)
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (Espectroscopia por Energia Dispersiva)
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i> (Normas Industriais Japonesas)
LABMAT	Laboratório de Materiais
LABTUCAL	Laboratório de Tubos de Calor
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscópio Óptico
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	OBJETIVO GERAL	19
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	UNIÃO POR DIFUSÃO	20
2.2	PARÂMETROS DE RUGOSIDADE	23
2.3	LAPIDAÇÃO	24
2.3.1	COMPONENTES	29
2.3.1.1	ABRASIVOS	29
2.3.1.2	FLUIDO DE LAPIDAÇÃO	33
2.3.1.3	DISCO DE LAPIDAÇÃO	35
2.3.1.4	PEÇA DE TRABALHO	36
2.3.2	CINEMÁTICA DE LAPIDADORAS PLANAS	38
2.3.3	MECANISMOS DE REMOÇÃO	40
2.3.4	PARÂMETROS	45
2.3.4.1	PRESSÃO	46
2.3.4.2	VELOCIDADE	48
2.3.4.3	TEMPO	50
2.4	POLIMENTO	51
2.5	ELETROPOLIMENTO	54
3	METODOLOGIA	57
3.1	MATÉRIA-PRIMA	57
3.2	LAPIDAÇÃO	59
3.3	ANÁLISES DAS AMOSTRAS LAPIDADAS	61
3.4	POLIMENTO E ELETROPOLIMENTO	62
3.5	UNIÃO POR DIFUSÃO	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1	LAPIDAÇÃO	66
4.1.1	TEXTURA DA SUPERFÍCIE	66
4.1.1.1	PARÂMETROS DE ACABAMENTO DE SUPERFÍCIE	72
4.1.2	TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL	81

4.2	POLIMENTO E ELETROPOLIMENTO	82
4.3	UNIÃO POR DIFUSÃO	85
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
5.1	CONCLUSÕES	90
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 INTRODUÇÃO

A demanda por eficiência térmica e otimização de espaço em instalações *offshore*, como plataformas de petróleo e gás natural, tem impulsionado o desenvolvimento e a aplicação de trocadores de calor compactos. Esses dispositivos são projetados para oferecer alta eficiência térmica em volumes reduzidos, atendendo às restrições de espaço e peso de plataformas *offshore* de petróleo e gás (HESSELGREAVES; LAW; REAY, 2016; SEKULIC; SHAH, 2023).

Em aplicações *offshore*, torna-se essencial que o trocador de calor compacto apresente bom desempenho e elevada vida útil em ambiente marítimo, caracterizado pela presença de elevado teor de umidade, sais e cloretos. Assim, torna-se necessária a utilização de materiais capazes de resistir aos fenômenos corrosivos associados a este ambiente, a exemplo dos aços inoxidáveis austeníticos. Dentre estes, destaca-se o aço inoxidável austenítico AISI 316L, o qual apresenta elevada resistência à corrosão em virtude da formação de uma camada passivadora e resistência mecânica adequada à aplicação, apesar de ter uma condutividade térmica menor que a dos aços carbono (LI, Qi *et al.*, 2011).

Em virtude da necessidade de conciliar uma geometria complexa, com inúmeros canais internos que proporcionam o desempenho térmico desejado aliado a um baixo volume, a soldagem por técnicas convencionais torna-se dificultada. Apesar disso, a utilização desse tipo de material e geometria garante elevada vida útil em função da formação de uma camada passivadora e desempenho, o que torna necessário recorrer a métodos alternativos de soldagem, como o processo de união por difusão. Para a soldagem de trocadores de calor compactos por meio da técnica de união por difusão, faz-se o empilhamento das chapas e a soldagem ocorre em estado sólido, em temperaturas abaixo da temperatura solidus do material, em função da aplicação de uma combinação de pressão, temperatura e tempo.

O acabamento das chapas a serem soldadas, proveniente de processos de usinagem anteriores, está também intrinsecamente relacionado à qualidade da união, de modo que uma maior concentração de platôs na superfície, redução na rugosidade média e na distância entre os picos e vales, resulta em uma maior área de contato inicial e reduz a deformação plástica, favorecendo uniões de maior qualidade (MAHONEY; BAMPTON, 1993; SHIRZADI; ASSADI; WALLACH, 2001).

Desta forma, em pesquisas anteriores desenvolvidas pelo LABTUCAL - UFSC na fabricação de núcleos de trocadores de calor compactos via união por difusão de

chapas de aço AISI 316L, foram realizados estudos para otimização dos parâmetros de corte via jato d'água e a utilização de operações de acabamento como o eletropolimento para garantir a qualidade do acabamento de superfície das chapas a serem unidas por difusão, otimizando assim os resultados mecânicos e microestruturais das uniões (CALDAS, 2022; AMARAL, 2022).

Processos de acabamento como a lapidação plana, visam proporcionar alta planicidade, baixa rugosidade, alta precisão dimensional, além de um perfil de tensões residuais compressivo. Muitas vezes, esse processo antecede operações de acabamento que proporcionam níveis de rugosidade ainda menores, como o polimento mecânico e eletropolimento, os quais são diretamente influenciados pela rugosidade e planicidade iniciais da peça de trabalho. Amplamente empregadas na indústria de componentes de alta precisão, estas técnicas envolvem baixas taxas de remoção de material, sendo sua aplicação fundamental em setores como óptica, microeletrônica, engenharia de precisão e dispositivos biomédicos (HASHIMOTO *et al.*, 2016; KLOCKE, 2009; YANG *et al.*, 2017).

Desse modo, a lapidação plana, o polimento mecânico e o eletropolimento, são opções de processos de acabamento para melhorar a qualidade das superfícies a serem unidas por difusão, reduzindo defeitos de forma e a rugosidade das peças, sem causar grandes danos à subsuperfície ou alterações causadas por efeito térmico.

Com a finalidade de compreender o processo de lapidação plana e otimizar os parâmetros para a lapidação de chapas de aço inoxidável AISI 316L para posterior união por difusão, foi avaliada a influência de três parâmetros — velocidade de rotação do disco de lapidação, pressão aplicada à peça e tempo de lapidação — na taxa de remoção de material e no acabamento de superfície das peças por meio dos parâmetros de rugosidade. O processo de lapidação foi realizado com duas granulometrias de abrasivo, com diâmetro médio de 33 μm e 12,8 μm . De tal forma, quinze condições foram determinadas por meio de um planejamento experimental (DOE, *Design of Experiment*) do tipo 2^k fatorial com ponto central, sendo fabricadas três peças simultâneas para cada conjunto de parâmetros.

Posterior à determinação da melhor condição de lapidação, esta foi aplicada em somente uma união por difusão com o objetivo de avaliar o impacto na qualidade final dos componentes unidos em diferentes acabamentos. A mesma condição foi utilizada na realização dos processos de acabamento que comumente são aplicados posteriormente à lapidação para melhorar o acabamento de superfície, neste caso, o

polimento e o eletropolimento. Por fim, foram avaliadas as qualidades do acabamento de superfície e das uniões obtidas em amostras lapidadas, polidas e eletropolidas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da variação dos parâmetros de lapidação na união por difusão de chapas de aço inoxidável austenítico AISI 316L.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentre os objetivos específicos deste trabalho estão:

- Avaliar a influência dos parâmetros de lapidação na rugosidade da superfície gerada;
- Avaliar a influência dos parâmetros de lapidação na taxa de remoção de material em operações com abrasivos de diferentes granulometrias;
- Comparar os efeitos das operações de lapidação, polimento e eletropolimento na qualidade da união por difusão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 UNIÃO POR DIFUSÃO

A união por difusão, também chamada de soldagem por difusão, é um processo de soldagem em estado sólido que promove a união de materiais sem formação de fase líquida ou presença de zona termicamente afetada, preservando a microestrutura e as propriedades mecânicas do material de base (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016; MAHONEY; BAMPTON, 1993).

O coalescimento das superfícies ocorre em atmosfera de gás inerte ou vácuo, mediante aplicação de pressão mecânica em temperaturas tipicamente em torno de 80% da temperatura solidus em escala absoluta (Kelvin) da liga, por um determinado tempo. A pressão aplicada deve ser definida de modo a ser baixa suficiente para evitar deformações macroscópicas significativas na peça durante o processo, mas suficiente para garantir um contato íntimo entre as superfícies. A união por difusão pode ser realizada em materiais similares e dissimilares, com e sem aplicação de intercamada, além de ser uma alternativa para união de peças com geometrias complexas e descontinuidades, sendo um dos métodos mais seguros para a aplicação de manufatura aditiva. Devido a estas características, a união por difusão é utilizada em diversos setores como a indústria aeroespacial, automotiva, petroleira e química (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016; MAHONEY; BAMPTON, 1993).

O processo de união pode ser representado por meio de uma sequência metalúrgica de três estágios, os quais acontecem simultaneamente ao longo do tempo de união. A primeira etapa é a deformação das asperidades, em que há um aumento da área de contato em virtude da deformação dos picos de rugosidade das superfícies, formando uma linha de união composta por áreas de contato íntimo entre as superfícies separadas por vazios. Na segunda etapa ocorrem simultaneamente os mecanismos de fluência e difusão, sendo que o transporte de massa é controlado majoritariamente pela difusão, predominantemente pela difusão em contorno de grão, até alcançar um estado de equilíbrio de menor energia, diminuindo o tamanho e quantidade de vazios na linha de união. Na terceira etapa, os vazios presentes encontram-se predominantemente na região interna dos grãos, os quais são reduzidos e eliminados por meio da difusão volumétrica, desde que seja fornecida energia por tempo suficiente (MAHONEY; BAMPTON, 1993).

A Figura 1 apresenta uma representação das etapas da união por difusão, na qual 'a' representa o contato inicial das asperidades, 'b' representa o primeiro estágio

em que ocorre a deformação das asperidades, 'c' representa o estágio predominantemente controlado pela difusão nos contornos de grão e 'd' o estágio responsável majoritariamente pelo fechamento dos vazios internos dos grãos por difusão volumétrica.

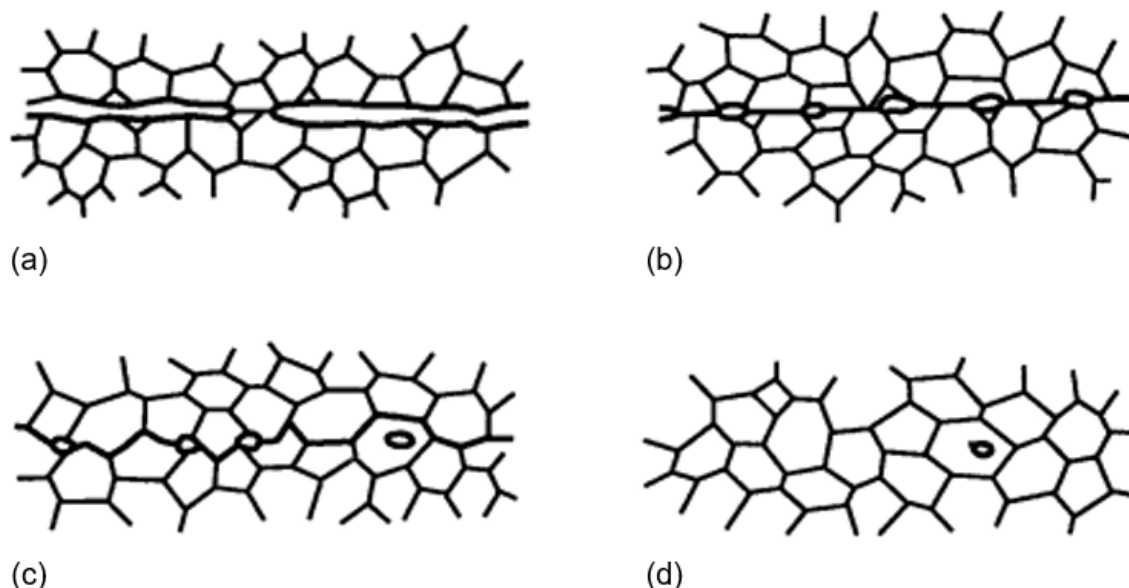


Figura 1 - Representação das etapas do processo de união por difusão
Fonte: Adaptado de MAHONEY; BAMPTON (1993).

As características dos materiais a serem unidos, como dureza, presença de uma camada de óxido estável e difusividade, bem como da sua superfície, a exemplo do encruamento localizado e da rugosidade, afetam diretamente a qualidade final das uniões, apresentando impacto principalmente ao longo da primeira etapa da união.

Dentre estas, destaca-se a presença de uma camada de óxido estável na superfície, uma vez que impede a difusão atômica ao longo da interface de união. Uma das técnicas para garantir o contato íntimo intermetálico das superfícies a serem unidas consiste em promover o rompimento parcial desta camada.

Para tal, pode-se utilizar a aplicação de pressão, de forma que, em virtude da rugosidade intrínseca aos processos de fabricação dos materiais, a área de contato real no início do processo é menor que a área aparente, sendo aplicada uma maior pressão nos topos das asperezas do material, promovendo a microdeformação plástica destas e o rompimento localizado da camada de óxido. Desta forma, a rugosidade das superfícies a serem unidas deve ser bem controlada, uma vez que, apesar de auxiliar na etapa inicial por meio da microdeformação das asperezas, o aumento da rugosidade aumenta o tamanho dos poros formados na linha de união,

exigindo maior tempo para sua completa eliminação nas etapas posteriores do processo (MAHONEY; BAMPTON, 1993; SHIRZADI; ASSADI; WALLACH, 2001).

Ademais, os processos de fabricação dos componentes podem influenciar na qualidade final das uniões para além da rugosidade. Materiais encruados, que passaram por um trabalho a frio, apresentam maior densidade de discordâncias e maior energia interna, provendo energia extra para o movimento atômico e favorecendo os fenômenos difusivos ao longo do processo de união, bem como favorecendo o processo de recristalização ao longo do ciclo térmico (MAHONEY; BAMPTON, 1993).

Wei *et al.* (2024) avaliaram a união por difusão do aço inoxidável austenítico AISI 304, com diversos valores de rugosidade, obtidas por meio de lixamento com abrasivos de diferentes granulometrias, alcançando superfícies com rugosidade média (R_a) de 0,380 a 0,045 μm . O estudo evidenciou que para superfícies com menores valores de rugosidade, a área de contato efetiva na interface aumenta significativamente, facilitando a difusão atômica e reduzindo o número e o tamanho dos poros (defeitos) na linha de união. Já superfícies mais ásperas resultaram em interfaces com maior quantidade de poros, reduzindo a qualidade da união.

A qualidade da união por difusão está diretamente relacionada à capacidade de eliminação dos poros iniciais formados entre as superfícies em contato, processo que depende tanto da topografia quanto da resposta mecânica das superfícies durante a deformação plástica inicial.

Resultados de união por difusão do aço inoxidável AISI 316 após a retificação foram menos efetivos que em superfícies laminadas a frio, mesmo em superfícies com valores similares de rugosidade média quadrática, pois a superfície laminada apresentara platôs dominantes e vales profundos, reduzindo a necessidade de deformações plásticas elevadas. Isso reforça a necessidade de caracterizar apropriadamente a textura da superfície do material a ser unido, como por exemplo a avaliação da distribuição das alturas e profundidade dos vales para otimizar o processo (Saranam *et al.*, 2021).

Amaral (2022) comparou os resultados de união por difusão em chapas empilhadas de aço inoxidável AISI 316L com duas variações de qualidade de acabamento de superfície, chapas com acabamento 2B, obtida por meio da laminação a frio seguida de recozimento e decapagem, e chapas eletropolidas. Chegou-se à conclusão que as chapas eletropolidas apresentaram valores inferiores de rugosidade

média, rugosidade média quadrática e principalmente profundidade dos vales, o que, por sua vez, resultou em uniões com melhores propriedades mecânicas, menores defeitos na interface de união e com microestrutura similar ao material de base.

2.2 PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

A rugosidade é um fator crítico na engenharia de superfícies, influenciando propriedades como atrito, desgaste, lubrificação e contato. Diversos parâmetros podem ser utilizados para caracterizar a topografia de superfície, sendo os parâmetros de amplitude utilizados para descrever e comparar superfícies.

A rugosidade média aritmética 3D (S_a) e rugosidade média quadrática 3D (S_q) avaliam a altura média da superfície; a assimetria 3D (S_{sk}) e a curtose 3D (S_{ku}) descrevem a distribuição e forma das alturas; e a profundidade do vale 3D (S_v) e a altura de pico 3D (S_p) dimensionam as alturas máximas da superfície (LEACH, 2013).

O parâmetro S_a representa a média aritmética dos valores absolutos das alturas da superfície em relação ao plano médio. O parâmetro S_q apresenta o desvio padrão da distribuição das alturas da superfície em relação ao plano médio. Ambos são parâmetros estáveis, uma vez que não são significativamente influenciados por riscos e ruídos de medição. Entretanto, por ser um desvio quadrático, o S_q torna-se mais sensível à presença de picos e vales extremos, sendo um parâmetro recomendado para avaliar a variabilidade do processo, juntamente com o S_a (BROWN, 2017; LEACH, 2013).

O parâmetro S_{sk} quantifica a simetria da distribuição das alturas da superfície em torno do valor médio. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática do parâmetro S_{sk} , em que valores negativos indicam a predominância de vales, enquanto valores positivos indicam a predominância de picos.

O parâmetro S_{ku} descreve o achatamento da distribuição das alturas. A Figura 3 apresenta uma representação esquemática desse parâmetro, em que a superfície com S_{ku} igual a três é considerada normal, valores superiores a três indicam superfícies com picos ou vales agudos, enquanto valores inferiores indicam superfícies mais planas.

A utilização conjunta desses parâmetros para análise topográfica é útil para entender a forma da superfície, indicando a predominância de vales ou picos e o seu formato, mais agudo ou plano. Superfícies com distribuição gaussiana tendem a ter valores de S_{sk} próximos a zero e S_{ku} próximos a três (BROWN, 2017; LEACH, 2013).

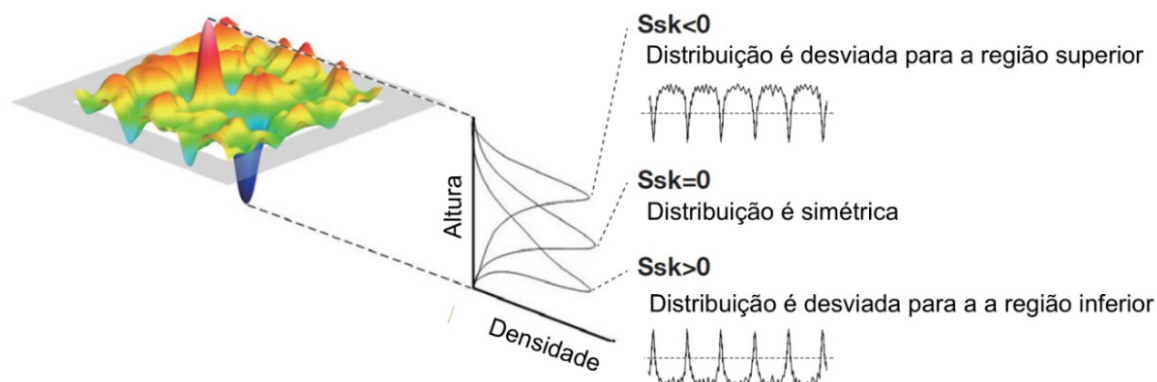


Figura 2 - Representação esquemática de S_{sk}
Fonte: Adaptado de Brown (2017).

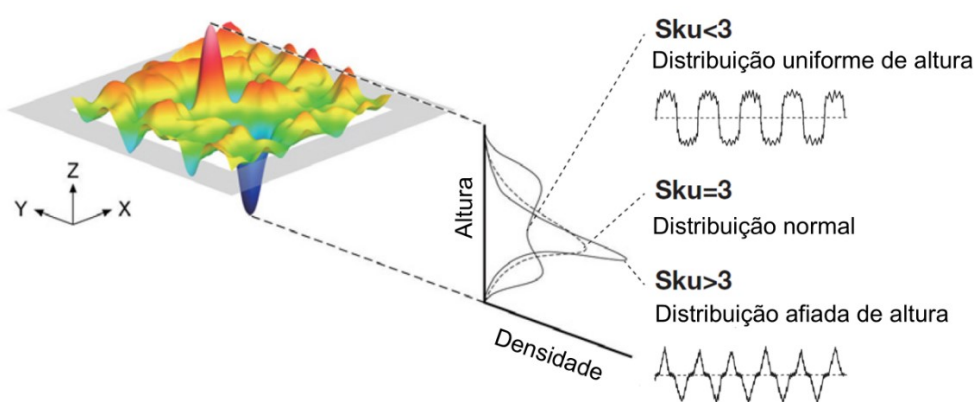


Figura 3 - Representação esquemática de S_{ku}
Fonte: Adaptado de Brown (2017).

O parâmetro S_v representa a profundidade máxima medida a partir do plano de referência até o ponto mais profundo do vale, enquanto o S_p é a altura do ponto mais alto da superfície em relação ao plano de referência. Em função desses parâmetros considerarem a maior distância entre um ponto e a linha média, estes são significativamente influenciados por riscos, contaminações e ruídos de medição (BROWN, 2017; LEACH, 2013).

2.3 LAPIDAÇÃO

A lapidação, assim como outros processos abrasivos, tem sido empregada na indústria há mais de 100 anos, com suas origens remontando ao período Neolítico. Naquela época, operações simples eram realizadas manualmente, e furos eram feitos ao rotacionar um pedaço de madeira com areia entre as partes (MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

As técnicas de acabamento, como lapidação e polimento, evoluíram de práticas artesanais para técnicas baseadas em princípios científicos, apresentando uma solução para acabamentos de superfície muito finos, alta precisão dimensional, planicidade, e danos mínimos a subsuperfície, tornando-se essencial em setores que demandam alta precisão, como na fabricação de componentes cerâmicos, semicondutores e ópticos (HASHIMOTO *et al.*, 2016; KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

De acordo com a norma DIN 8589 (2003), a lapidação é um processo de usinagem de geometria não definida, assim como a retificação, o brunimento e o polimento, sendo este último muitas vezes utilizado após a lapidação. No entanto, a lapidação distingue-se do brunimento e da retificação por empregar grãos abrasivos soltos, suspensos em um líquido ou pasta, para promover a remoção de material da peça de trabalho. Durante o processo, os grãos seguem trajetórias de corte não direcionais e são guiados por uma ferramenta ou disco de lapidação, que pode ou não realizar a transferência de forma.

De modo geral, a lapidação apresenta-se como um processo economicamente viável quando a aplicação exige elevada qualidade de acabamento de superfície. Nesse contexto, a menor taxa de remoção de material, em comparação a outros processos de usinagem, é compensada pela qualidade obtida. Esse processo pode ser aplicado a uma ampla variedade de materiais, incluindo metais, cerâmicas, vidros, rochas, gemas, plásticos e materiais utilizados em semicondutores.

Embora seja comumente empregada em superfícies planas, a lapidação também pode ser adaptada para geometrias diversas, como cilindros ou superfícies côncavas e convexas, por meio de modificações no método e no uso de ferramentas auxiliares, mantendo-se o movimento relativo entre a ferramenta e a peça, com uma película de abrasivo entre ambas. Em alguns casos, é possível realizar a operação de forma coplanar em ambos os lados da peça, o que, na lapidação plana, resulta em melhor paralelismo e uniformidade entre as faces. A Figura 4 apresenta aplicações do processo de lapidação para superfícies planas, cilíndricas e esféricas (HASHIMOTO *et al.*, 2016; KLOCKE, 2009; MARINESCU *et al.*, 2004; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

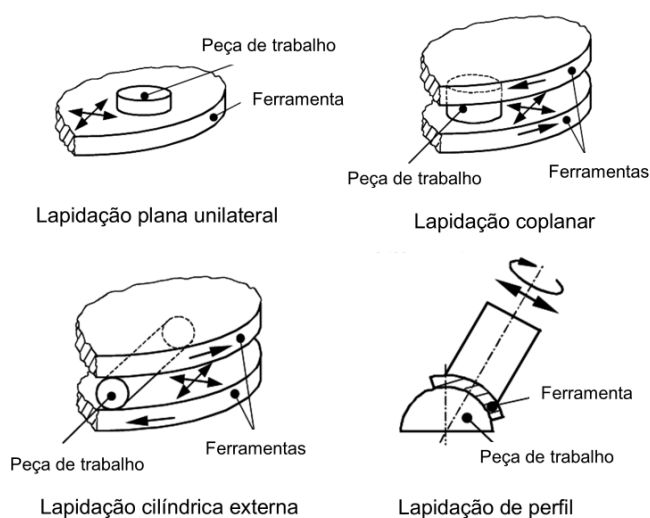


Figura 4 - Esquemas do processo de lapidação plana, coplanar, cilíndrica e de perfil
Fonte: Adaptado de DIN 8589 (2003).

O processo de lapidação pode ser estudado como um sistema complexo com quatro componentes fundamentais: abrasivo, fluido de lapidação, disco de lapidação e peça de trabalho. As interações ocorrem pelo movimento relativo e aplicação de uma pressão entre as partes, que resulta na remoção de material, sendo praticamente impossível de observar diretamente. Para superar essa limitação, adotar-se uma abordagem sistêmica do processo, avaliando as possíveis interações entre os componentes e demonstrando como fenômenos de abrasão mecânica emergem dessas interações, sendo posteriormente avaliadas as superfícies geradas, a fim de comprovar estas interações (EVANS *et al.*, 2003). A Figura 5 apresenta o processo de lapidação como um sistema de quatro componentes.

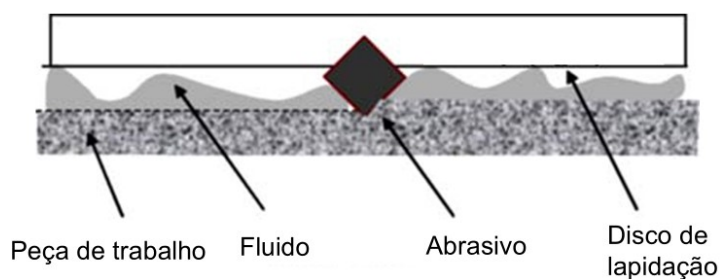


Figura 5 - Sistema com quatro componentes do processo de lapidação
Fonte: Adaptado de EVANS *et al.* (2003).

No processo de lapidação, a remoção de material ocorre principalmente por meio do deslocamento de material, consequência das deformações plásticas e fadiga induzidas pela rotação e deslizamento de abrasivos livres em contato com a

peça, bem como por microcortes promovidos por abrasivos fixos no disco. Neste processo, a taxa de remoção de material é considerada baixa, devido às reduzidas velocidades de corte e à rasa penetração dos grãos abrasivos na superfície de trabalho (MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

As superfícies obtidas pelo processo de lapidação apresentam, visualmente, um aspecto fosco, marcado pela sobreposição de traços de usinagem dispostos de forma aleatória, sem uma direção definida. Do ponto de vista mecânico, as peças lapidadas apresentam maior resistência ao desgaste, dificilmente apresentam alterações causadas pelo efeito térmico e rebarbas (EVANS *et al.*, 2003; KLOCKE, 2009; MOLEND; CHARCHALIS, 2014). Além disso, quando realizada a lapidação plana, a superfície final apresenta alta uniformidade, com elevado controle de rugosidade e planicidade (MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

Ao comparar peças metálicas lapidadas e retificadas, é identificado um perfil de tensões residuais trativas após o processo de retificação, em função das altas temperaturas do processo, enquanto em peças metálicas lapidadas são encontradas tensões residuais compressivas, principalmente nos primeiros micrômetros da superfície, resultado de um trabalho mecânico a frio no processo de lapidação. Estas tensões tendem a aumentar em profundidade e magnitude conforme o aumento da pressão aplicada e do tempo de lapidação, gerando maiores deformações plásticas no material. O aumento da velocidade relativa entre a peça e o disco de lapidação reduz a magnitude das tensões residuais compressivas, em função de um aumento da temperatura local (CHANDRASEKAR; SHAW; BHUSHAN, 1987; GAFAROV; SHARIFOV; GAFAROV, 2019). A Figura 6 apresenta os resultados de tensões residuais em uma superfície de ferrita de níquel-zinco lapidada com pasta de diamante, no qual é possível identificar o perfil de tensões residuais do processo de lapidação.

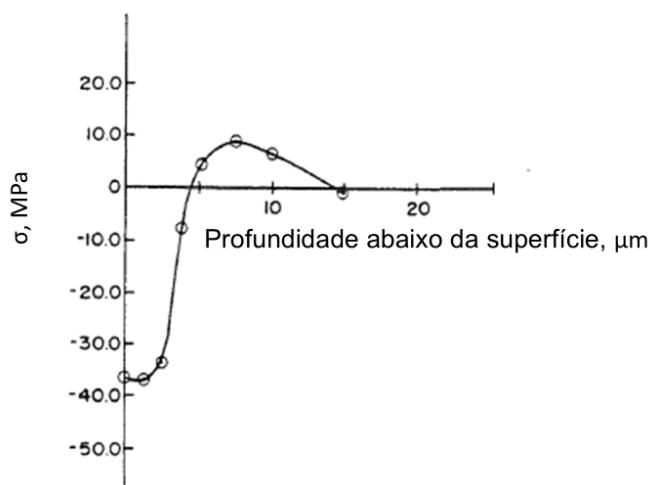


Figura 6 - Tensões residuais conforme a profundidade abaixo da superfície
 Fonte: Adaptado de CHANDRASEKAR; SHAW; BHUSHAN (1987).

Diversos parâmetros de usinagem e condições de processo influenciam diretamente a viabilidade econômica e a qualidade de peça usinada, alguns parâmetros significantes são:

- Abrasivo: tamanho, tipo, forma e distribuição dos grãos;
- Parâmetros de usinagem: velocidade relativa, pressão aplicada e tempo de lapidação;
- Materiais: composição do material, geometria e espessura da peça de trabalho e do disco de lapidação;
- Máquina: cinemática e posição da peça, forma de aplicação da pressão e vibrações;
- Fluido de lapidação: base do fluido, concentração de abrasivo e taxa de aplicação.

Com base nestes parâmetros, controlar as saídas do processo de lapidação, como a taxa de remoção de material, planicidade, rugosidade, tensões residuais e desgaste da ferramenta, é o grande desafio do processo e onde surgem as oportunidades de otimização (DESHPANDE, 2008; KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006). Sendo assim, é essencial o estudo dos componentes do processo, mecanismo de remoção de material, cinemática, e dos principais parâmetros de usinagem para que possam ser otimizados conforme a aplicação.

2.3.1 COMPONENTES

2.3.1.1 ABRASIVOS

Os materiais abrasivos utilizados na lapidação são determinados com base na dureza, tamanho, geometria e reatividade química com o material da peça, sendo as opções mais utilizadas na indústria o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carбето de silício (SiC) devido ao baixo custo e abrasivos com maior dureza, como diamante e o nitreto cúbico de boro (cBN). É importante que o abrasivo tenha uma dureza maior que a peça de trabalho, pois normalmente o aumento da dureza está diretamente relacionado ao aumento da taxa de remoção de material e à redução da rugosidade. Outrossim, a performance do abrasivo depende não apenas da dureza, mas também da forma de desgaste do mesmo (KLOCKE, 2009; MARINESCU *et al.*, 2004; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

A Tabela 1 apresenta a dureza em escala Mohs dos abrasivos utilizados na lapidação.

Tabela 1 - Dureza dos materiais abrasivos em escala Mohs.
Fonte: Adaptado de MARINESCU; UHLMANN; DOI (2006).

Abrasivo	Escala Mohs
Diamante	10,0
Nitreto cúbico de boro	9,9
Carбето de silício	9,5
Óxido de alumínio	9,0
Garnet	8 - 9,0
Quartzo	7,0

O cBN é utilizado na lapidação de carbetos e cerâmicos e é uma alternativa de elevada dureza para a lapidação de materiais ferrosos com alta dureza, principalmente aços ferramenta, ferros fundidos, aços para rolamentos, superligas de alumínio e materiais cerâmicos. O diamante, que pode ser natural ou sintético, apresenta uma dureza superior aos demais materiais, o que justifica a sua aplicação para a lapidação de materiais de elevada dureza e para materiais heterogêneos, como carbonetos e cerâmicos (MARINESCU *et al.*, 2004; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

Os abrasivos Al_2O_3 e SiC apresentam valores próximos de dureza, porém o Al_2O_3 possui uma tenacidade à fratura ligeiramente maior e é indicado para a lapidação de materiais com alta resistência à tração e materiais macios, como aço de baixo carbono, metais não ferrosos e materiais semicondutores. O SiC possui vasta

aplicação, principalmente em aços temperados, ligas de aço, ferro fundido cinzento, vidro e cerâmicas, sendo uma opção econômica e que proporciona uma alta taxa de remoção de material (MARINESCU *et al.*, 2004; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

Em testes realizados com aço S31600 e bronze C86300, Deshpande *et al.* (2008) observaram uma maior taxa de remoção de material com Al_2O_3 em comparação ao SiC. Segundo os autores, isso ocorreu devido à maior tenacidade à fratura do Al_2O_3 , o que permite que os grãos mantenham sua afiação por mais tempo, resultando em uma maior taxa de remoção de material e, consequentemente, alcançando tolerâncias mais estreitas de planicidade. Ademais, os valores de rugosidade média (R_a) obtidos com os dois abrasivos (Al_2O_3 e SiC) são semelhantes e demonstram uma redução em comparação ao garnet, que possui uma dureza inferior. A Figura 7 apresenta os resultados de taxa de remoção de material e rugosidade média aritmética (R_a), conforme a dureza do abrasivo para o aço S31600.

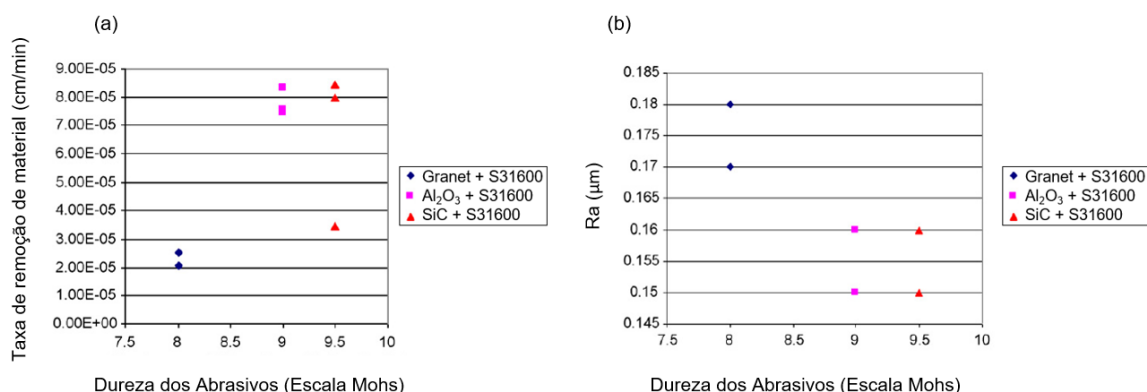


Figura 7 - Taxa de remoção de material e da rugosidade conforme a dureza do abrasivo
Fonte: Adaptado de DESHPANDE *et al.* (2008).

O tamanho dos grãos dos abrasivos utilizados na lapidação varia de 0,1 a 150 μm , sendo comumente utilizados grãos com diâmetros entre 5 e 40 μm . A caracterização do tamanho dos grãos é realizada por meio da especificação do diâmetro médio equivalente da esfera, também denominado diâmetro médio do grão ou diâmetro equivalente e seu desvio padrão. O aumento do tamanho do grão do abrasivo tem um impacto significativo na taxa de remoção de material e consequentemente na produtividade e viabilidade econômica do processo de lapidação. Abrasivos maiores realizam ranhuras profundas, as quais podem danificar

o acabamento, enquanto grãos pequenos retiram menos material durante o processo (KLOCKE, 2009; MARINESCU *et al.*, 2004; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

A quantidade de grãos em contato com a peça de trabalho e a pressão aplicada por cada grão na mesma é influenciada pela granulometria do abrasivo utilizado, de modo que a utilização de grãos menores proporciona mais pontos de contatos na peça de trabalho e menor pressão aplicada em cada ponto, o que explica os diferentes comportamentos observados com o aumento da pressão aplicada com diferentes granulometrias. Em experimentos realizados com aço 95X18 lapidado com cBN, Muratov *et al.* (2022) observaram um aumento da taxa de remoção de material conforme o aumento do tamanho dos grãos, sendo que para uma pressão de 14,71 kPa (0,15 kg/cm²) esse aumento é observado até valores intermediários de 7 µm e 10 µm, e há uma redução em grãos maiores de 14 µm, 20 µm e 28 µm, em operações com uma pressão de 30,4 kPa (0,31 kg/cm²) o aumento da taxa de remoção se manteve com o aumento do tamanho de grão do abrasivo até valores de 28 µm, conforme pode ser observado na Figura 8.

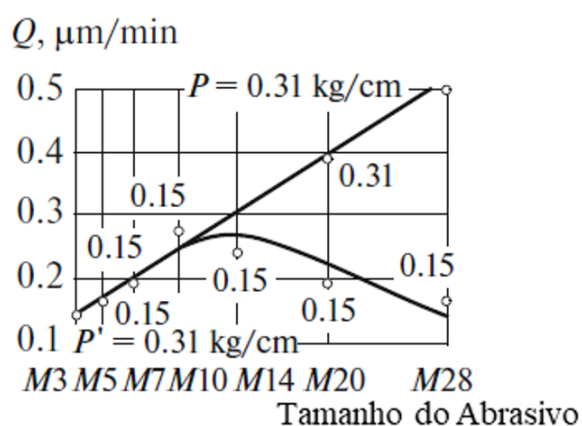


Figura 8 - Taxa de remoção de material conforme o tamanho do grão abrasivo
Fonte: Adaptado de MURATOV *et al.* (2022).

Grãos abrasivos de menor diâmetro são utilizados para operações de acabamento, uma vez que são menos agressivos à superfície do material, promovendo danos cada vez menos profundos. Desta forma, a remoção de material concentra-se cada vez mais nos picos da superfície, reduzindo os valores de rugosidade da peça lapidada. Por sua vez, grãos abrasivos maiores são utilizados quando elevadas taxas de remoção de material são necessárias, auxiliando ainda na remoção de grandes defeitos de forma. Farahnakian e Shahrajabian (2016)

observaram reduções significativas da rugosidade em função da redução do tamanho do abrasivo para aço AISI 52100 em diferentes tempos de lapidação, conforme é apresentado na Figura 9.

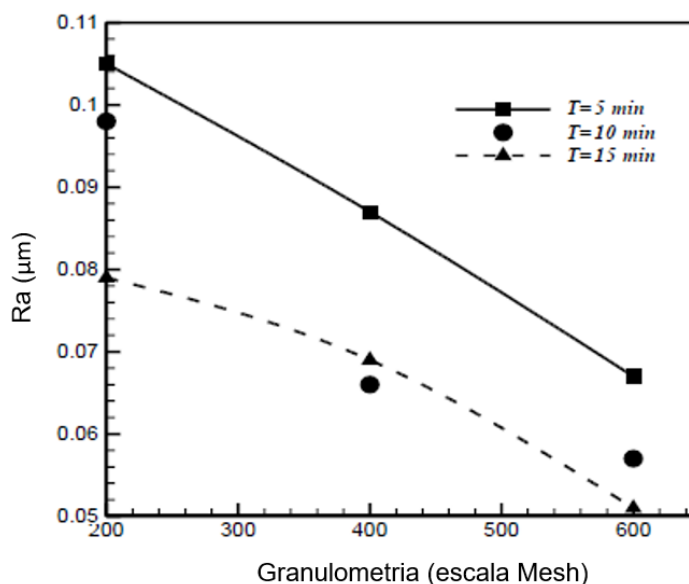


Figura 9 – Rugosidade em função tamanho do grão abrasivo
Fonte: Adaptado de FARAHNAKIAN; SHAHRAJABIAN (2016).

A geometria dos abrasivos é tipicamente poliédrica, incluindo dodecaedros, icosaedros e hexaedros, de modo que essas assimetria e alta poligonalidade têm impacto na cinemática das partículas durante o processo e na superfície gerada, em que formas mais angulares apresentam maior resistência ao rolamento e maior tendência ao deslizamento, assim gerando ranhuras mais profundas. Assim, deve-se buscar abrasivos nodulares e não angulares quando se deseja ter superfícies uniformes e com menor rugosidade (DE PAYREBRUNE, 2022; SHIBATA *et al.*, 2003). A Figura 10 apresenta abrasivos de SiC com granulometria de 8 μm e 23 μm, em que é possível observar a variação da geometria dos grãos, mesmo com um valor de diâmetro médio próximo.

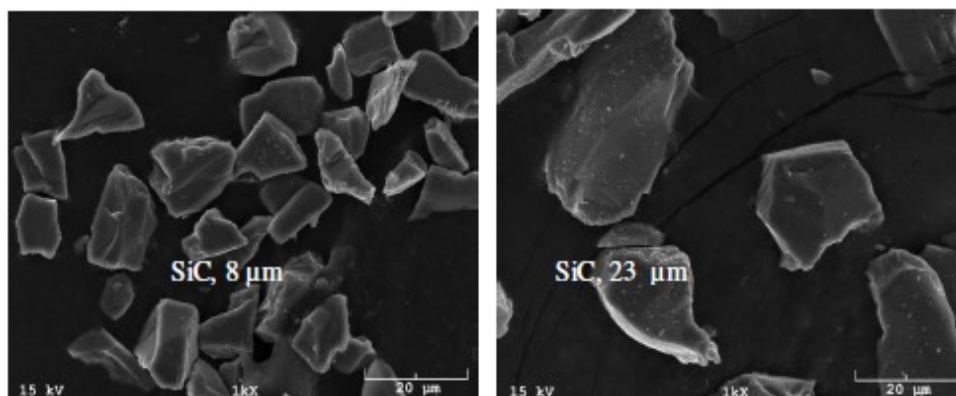


Figura 10 - Carbetto de silício com granulometria de 8 μm e 23 μm
Fonte: Adaptado de AGBARAJI (2008).

O desgaste dos grãos abrasivos durante a lapidação é um fenômeno crítico que altera dinamicamente a distribuição granulométrica no meio de trabalho. Este desgaste pode ocorrer em função de diversos mecanismos como, o desgaste da aresta de corte, a fragmentação dos grãos e a quebra dos grãos. A medida que grãos maiores se fragmentam sob carga, geram partículas menores que permanecem ativas no processo, modificando progressivamente a eficiência de remoção e a topografia da superfície caso não sejam removidas continuamente (HEISEL; AVROUTINE, 2001).

2.3.1.2 FLUIDO DE LAPIDAÇÃO

No processo de lapidação, os grãos abrasivos são dispersos em um fluido transportador ou pasta que é adicionado continuamente para formar uma película fina entre o disco de lapidação e a peça. As propriedades físicas do fluido, como a viscosidade, densidade e condutividade térmica, influem diretamente no transporte de material e são dependentes de parâmetros do processo como a pressão e temperatura do processo (EVANS *et al.*, 2003).

A espessura da película de fluido aumenta com a viscosidade do fluido e não deve exceder o tamanho dos grãos abrasivos, pois isso pode limitar o contato efetivo entre os grãos e a superfície da peça, reduzindo a capacidade de remoção de material. Dessa forma, a viscosidade do fluido utilizado deve ser reduzida para grãos pequenos, mas mantendo a capacidade de transporte dos grãos. De maneira geral, são utilizados fluidos como água, óleo, vaselina, parafina e outros, conforme as necessidades de lubrificação, qualidade da superfície e taxa de remoção desejadas no processo. As proporções entre abrasivo e fluido normalmente variam de 1:2 e 1:6 em peso, sendo

comumente reduzidas à medida que o tamanho dos grãos abrasivos é diminuído (KLOCKE, 2009; MARINESCU *et al.*, 2004; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

A Figura 11 apresenta o efeito do aumento da concentração de diamante disperso em uma solução de glicerina e água, em que é possível observar o aumento da taxa de remoção de material ao aumentar a concentração de 0,1% para 0,15% em peso, de modo que, em proporções maiores, não há um aumento significativo da taxa de remoção. No gráfico, da Figura 11b, é possível identificar a influência do aumento da concentração de abrasivo, que resulta em uma redução mais abrupta da rugosidade, tornando-se uma opção para redução do tempo de lapidação.

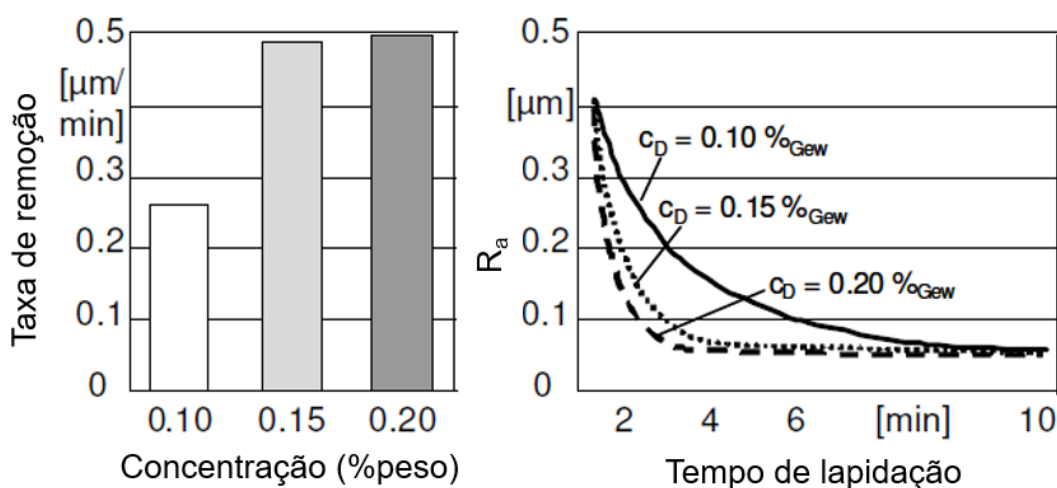


Figura 11 – (a) Taxa de remoção de material e (b) Rugosidade em função da concentração de abrasivo

Fonte: Adaptado de KLOCKE (2009).

A proporção de abrasivo na suspensão e a seleção do abrasivo têm um papel crucial na otimização dos custos envolvidos no processo, de modo que a correta definição destes parâmetros impacta diretamente no tempo de lapidação e no consumo de insumos durante o processo. Desta forma, estes parâmetros podem ser considerados os fatores mais influentes na eficiência do processo de lapidação, viabilizando a redução do consumo de insumos e o tempo de máquina, sem comprometer a qualidade da superfície gerada (ROUTELEA; MALHOTRA; KALIYAPERUMAL, 2018; RAMADASS; SAMBASIVAM, 2018; PARATE; YARASU, 2013).

2.3.1.3 DISCO DE LAPIDAÇÃO

O disco de lapidação atua como suporte para os grãos abrasivos suspensos no fluido, as peças e as gaiolas. O material do qual este componente é fabricado influencia diretamente no movimento do grão abrasivo e, conseqüentemente, no resultado do processo de lapidação. Os discos podem ser classificados em três categorias de dureza: discos macios (dureza inferior a 140 HB); intermediários (dureza entre 140 e 220 HB) e discos duros (dureza superior a 220 HB). Normalmente são utilizados discos de ferro fundido, cobre, ligas de aço endurecido, materiais cerâmicos e vidros (KLOCKE, 2009).

Discos de menor dureza facilitam a aderência dos grãos abrasivos à sua superfície, o que pode resultar em mecanismos de remoção de material por meio do corte e podem levar à presença de riscos profundos à peça. Discos de maior dureza resultam em menor desgaste do disco e maior remoção de material. Contudo, podem pressionar exageradamente os grãos abrasivos na superfície a ser usinada. A dureza ideal faz com que a maioria dos grãos rolem e não fiquem engastados no disco de lapidação ou na peça (KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006). A Figura 12 apresenta discos de lapidação fabricados com diferentes materiais e geometrias.



Figura 12 – Diferentes tipos de discos de lapidação
Fonte: MARINESCU; UHLMANN; DOI (2006).

A forma do disco de lapidação influencia diretamente a forma da superfície gerada pela lapidação, sendo possível utilizar superfícies côncavas e convexas para transferir a forma para a peça de trabalho. No caso da lapidação plana, a forma do disco deve ser homogênea, ter o mínimo de defeitos de forma e garantir que seu

desgaste seja uniforme durante o processo. Diversos modelos e *softwares* baseados na cinemática dos abrasivos e componentes do processo foram desenvolvidos para prever e uniformizar o desgaste do disco de lapidação considerando as peculiaridades de cada processo, como a utilização de anéis de condicionamento em diferentes posições, alterações na cinemática do processo e utilização de conceitos de lapidação coplanar (MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006; PARATE; RAVINDRA, 2014; PIOTROWSKI, 2020).

Ranhas de aproximadamente 1mm de largura podem ser utilizadas nos discos de lapidação visando evitar a estagnação da suspensão de abrasivo, melhorar a remoção de cavacos e uniformizar a distribuição da pressão sob a peça, o que resulta no aumento da precisão da planicidade das peças usinadas (MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006). Na Figura 13 são representados os efeitos das ranhas na distribuição de pressão na peça de trabalho.

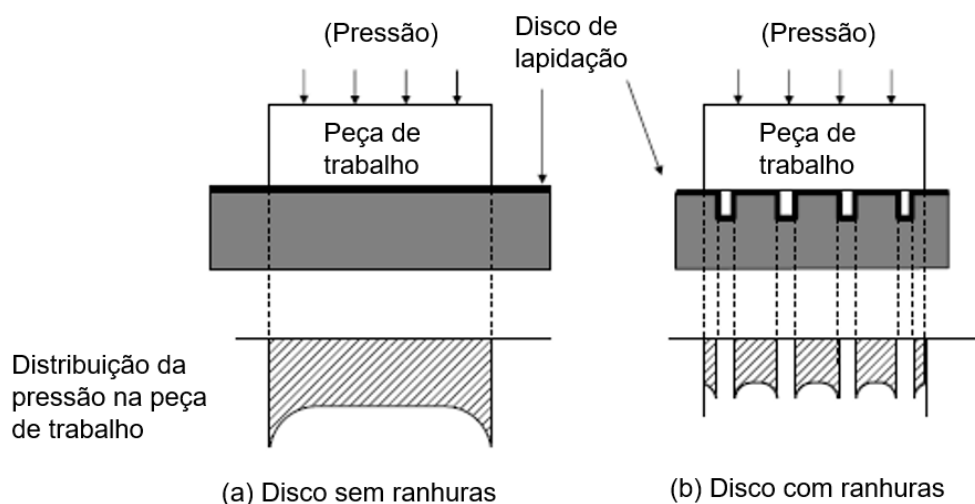


Figura 13 - Esquema da distribuição de pressão para discos com e sem ranhas
Fonte: Adaptado de MARINESCU; UHLMANN; DOI (2006).

2.3.1.4 PEÇA DE TRABALHO

A peça a ser usinada apresenta papel crítico nos mecanismos de remoção de material e na eficiência global dos processos de lapidação. A natureza química do material, seja metálica, covalente ou iônica e sua composição química determinam a susceptibilidade a distintos regimes de remoção. Adicionalmente, características microestruturais, como a orientação cristalográfica dos grãos, transformações de fase e heterogeneidades na composição, bem como variações de espessura provenientes

de processos de fabricação anteriores, podem comprometer significativamente a uniformidade do processo de lapidação (EVANS *et al.*, 2003).

As propriedades mecânicas do material, como a resistência à deformação plástica, tenacidade à fratura e dureza, assim como sua interação com os demais componentes, também influenciam significativamente a qualidade do processo de lapidação, impactando diretamente na transição entre os diferentes mecanismos de remoção de material, como remoção dúctil, fratura frágil e abrasão por dois ou três corpos (EVANS *et al.*, 2003).

Ensaio realizados com os aços inoxidáveis JIS 420 e JIS 440, utilizando Al_2O_3 e parâmetros similares de lapidação, demonstraram melhores resultados de acabamento de superfície para o JIS 440. Os autores indicam que, em virtude do maior percentual de carbono e cromo em sua composição, o JIS 440 apresenta uma microestrutura martensítica de maior dureza após o tratamento térmico, o que reduz a sua susceptibilidade à formação de irregularidades na superfície durante o acabamento abrasivo (THAMMASANG *et al.*, 2024; SINGPOMMAT; THERMSUK; INKAMPA, 2020; SORNSUPHAP; THERMSUK; KALCHUK, 2021).

Ao avaliar a influência da dureza da peça de trabalho na lapidação do aço C45 nas faixas de dureza 160, 440 e 650 HV, utilizando SiC F400/17, Molenda & Charchalis (2015) destacam a relevância da dureza do material na otimização dos parâmetros de lapidação. No estudo, as amostras com dureza intermediária de 440 HV apresentaram os melhores resultados na lapidação, com menor rugosidade média aritmética e taxa de remoção de material satisfatória na faixa de parâmetros avaliados. Estes resultados são explicados em virtude das amostras com menor dureza (160 HV) sofrerem danos abrasivos mais intensos, como riscos e sulcos, devido à penetração excessiva dos grãos de SiC. Deste modo, mesmo apresentando uma taxa de remoção satisfatória, o acabamento de superfície não é garantido. Por sua vez, nas amostras de maior dureza (650 HV), exige-se uma maior energia para remoção de material, reduzindo significativamente a eficiência do processo e a qualidade do acabamento de superfície (MOLEND; CHARCHALIS, 2015). A Figura 14 apresenta os valores da taxa de remoção de material e rugosidade média aritmética para as diferentes durezas.

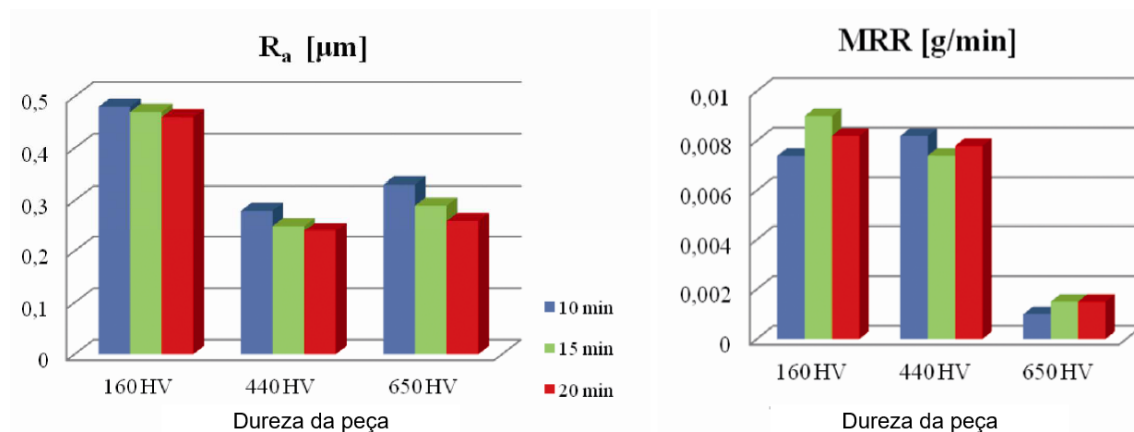


Figura 14 - Rugosidade e taxa de remoção de material em função da dureza da peça de trabalho
Fonte: Adaptado de MOLENDÁ; CHARCHALIS (2015).

2.3.2 CINEMÁTICA DE LAPIDADORAS PLANAS

Além dos componentes utilizados na lapidação, o conceito de máquina desempenha um papel fundamental no processo. O movimento relativo das peças em relação ao disco de lapidação, em trajetórias conforme a sua posição e conceito cinemático da máquina, afetam tanto a qualidade final da peça usinada quanto o desgaste do disco de lapidação, inclusive sendo necessário corrigir o disco conforme este é desgastado. Entre os conceitos de máquina utilizados, a cinemática planetária ocupa posição de destaque, ao proporcionar maior uniformidade de remoção de material, redução no desgaste desigual do disco de lapidação, além de otimizar as trajetórias da peça com o movimento das engrenagens satélites (DOI; KASAI; TONSHOFF, 1999; KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

Esse sistema é composto por uma engrenagem solar posicionada no centro do sistema, que rotaciona no mesmo eixo do disco de lapidação e promove a rotação das engrenagens satélites ou planetárias. O conjunto também inclui uma engrenagem anelar que faz a contenção do movimento das engrenagens satélites. A Figura 15 apresenta uma lapidadora plana coplanar com mecanismo de cinemática planetária.

Peças posicionadas a uma mesma distância do centro da engrenagem planetária apresentam movimentos semelhantes. No entanto, aquelas localizadas mais próximas às extremidades do disco de lapidação percorrem trajetórias maiores, devido à maior velocidade linear relativa durante o processo. Além do tipo de movimento realizado, é possível alterar tanto a velocidade relativa máxima e mínima da peça quanto a distribuição das trajetórias ao longo do disco, modificando os parâmetros das engrenagens satélites (PIOTROWSKI, 2020).

A posição e o conjunto de movimentos das engrenagens satélites, da peça de trabalho e dos abrasivos, determinam o padrão de desgaste do disco de lapidação, o qual pode comprometer a planicidade da superfície final, sendo desenvolvidos diversos modelos e softwares para determinar e controlar esse desgaste (MURATOV *et al.*, 2019; MURATOV; GASHEV, 2016; PIOTROWSKI, 2020).

Yang *et al* (2019), identificaram que a trajetória da peça de trabalho em um movimento planetário pode ser alterada por um movimento parasita, isto é, a folga entre a peça de trabalho e a engrenagem planetária, permitindo um movimento relativo que influencia no aumento da rugosidade da peça e, por isso, justifica a necessidade de desenvolver engrenagens planetárias ou gaiolas e fixações adequadas para cada geometria de peça a ser usinada.

Em máquinas de lapidação plana, outros conceitos de movimento e trajetória também são aplicados, embora em menor escala. Entre eles, destacam-se os movimentos os movimentos recíprocos das engrenagens planetárias em relação à peça de trabalho, a fixação das peças por meio de braços estacionários, nos quais apenas o disco de lapidação executa o movimento relativo, e as trajetórias do tipo *raster*, que descrevem figuras de Lissajous. Estas últimas resultam da combinação ortogonal de duas oscilações senoidais com amplitudes e frequências distintas (KHANOV *et al.*, 2015; BARYLSKI; PIOTROWSKI, 2019; CHEN *et al.*, 2021).

2.3.3 MECANISMOS DE REMOÇÃO

Os mecanismos de remoção presentes no processo de lapidação plana podem ser descritos como processos abrasivos de dois ou três corpos. No caso da abrasão de dois corpos para a lapidação, considera-se o grão abrasivo temporariamente fixado no disco de lapidação e este desliza na peça, promovendo um corte mais profundo e, conseqüentemente, removendo uma quantidade maior de material quando comparado à abrasão de três corpos.

Na abrasão de três corpos, considera-se que o grão abrasivo está livre para deslizar e rolar entre o disco de lapidação e a peça. Isso garante que a medida em que o grão rotaciona, gumes estão em contato com a peça e geram cortes menos profundos e em direções aleatórias.

Em condições normais, a lapidação é considerada um processo de abrasão de três corpos, mesmo com a eventual presença de mecanismos de abrasão de dois corpos. Independente do mecanismo de remoção, há a inserção dos gumes dos abrasivos na peça de trabalho e estima-se que a inserção seja de 5 a 10% do diâmetro médio do grão abrasivo (FARAHNAKIAN; SHAHRAJABIAN, 2016; MARINESCU *et al.*, 2004; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006). Na Figura 17 é representado o processo de lapidação, com as interações possíveis entre os componentes.

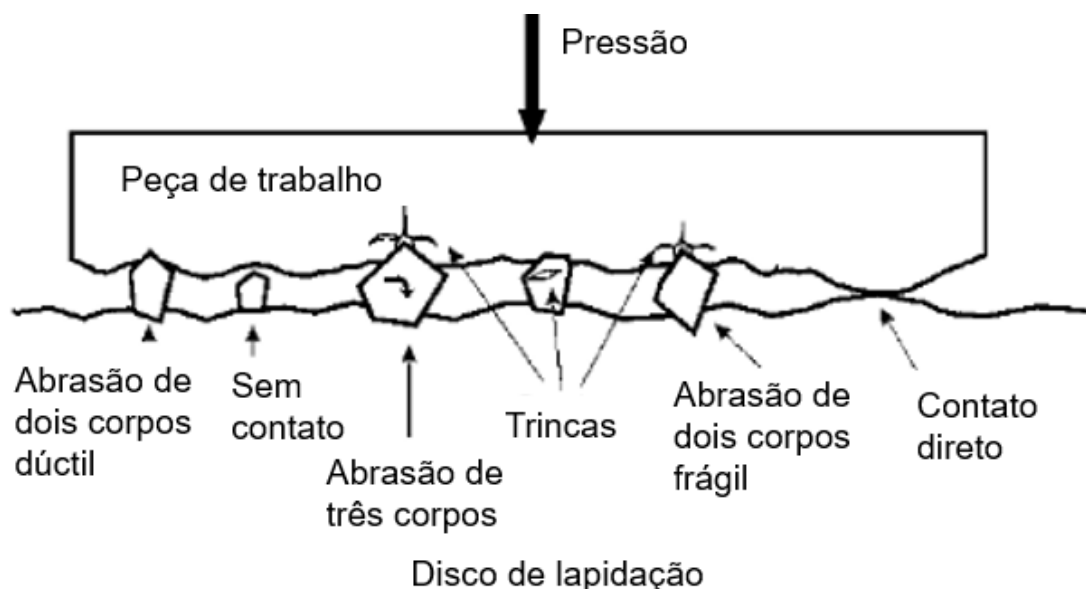


Figura 17 - Possíveis interações entre os componentes no processo de lapidação
Fonte: Adaptado de MARINESCU; UHLMANN; DOI (2006).

O processo de lapidação é fortemente afetado pela presença de grãos passivos, os quais não estão em contato com a peça e não contribuem diretamente para a remoção de material. Estes grãos formam-se a partir da quebra e desgaste dos grãos abrasivos, de modo que a inserção de grãos abrasivos e fluido de lapidação na folga de trabalho entre o disco de lapidação e a peça deve ser realizada de maneira contínua ou intermitentemente ao longo do processo.

Em virtude do movimento de rotação do disco, surgem forças centrífugas que, associadas ao uso de anéis de condicionamento, auxiliam no transporte de cavacos e materiais residuais do processo para fora da região da usinagem. A espessura e o

comportamento da película de fluido dependem da combinação entre a viscosidade do fluido, velocidade de rotação do disco e pressão aplicada, podendo ocorrer o contato direto entre a peça de trabalho e o disco de lapidação, o que, por sua vez, pode resultar em desgaste acelerado do disco de lapidação e danos à peça de trabalho (HEISEL; AVROUTINE, 2001; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006; PARATE; RAVINDRA, 2014).

Aliado à cinemática do abrasivo, deve-se considerar o material da peça de trabalho a ser usinada, o qual pode apresentar comportamento dúctil ou frágil. Nos materiais dúcteis, a remoção de material ocorre predominantemente por meio de mecanismos de deformação plástica, em especial quando há rotação e deslizamento do abrasivo, em que o material pode ser deformado plasticamente sem necessariamente ser removido, o que resulta na formação de sulcos e no encruamento de uma camada da superfície. Ademais, o contato repetitivo dos grãos pode levar à remoção por fadiga, onde múltiplas passagens encruam o material até seu rompimento, resultando na formação de cavacos. Estes mecanismos produzem superfícies com sulcos alongados e geram tensões residuais compressivas, devido ao encruamento da superfície (CHANG; HASHIMURA; DORNFELD, 2000; HASHIMOTO, 2016; MARINESCU *et al.*, 2004; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

Por outro lado, em materiais frágeis como vidros, cerâmicas e semicondutores, os mecanismos de remoção envolvem predominantemente fenômenos de fratura, como a geração e propagação de trincas, principalmente radiais e laterais, até que estas se interceptam e ocorra o lascamento do material. No caso da abrasão de dois corpos, em ambos os materiais há a formação e remoção de cavaco por mecanismo de corte, sendo a profundidade de corte em materiais frágeis reduzida (CHANG; HASHIMURA; DORNFELD, 2000; HASHIMOTO, 2016; MARINESCU *et al.*, 2004; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006). Na Figura 18 são representados os comportamentos de materiais dúcteis e frágeis conforme o modo de remoção de material.

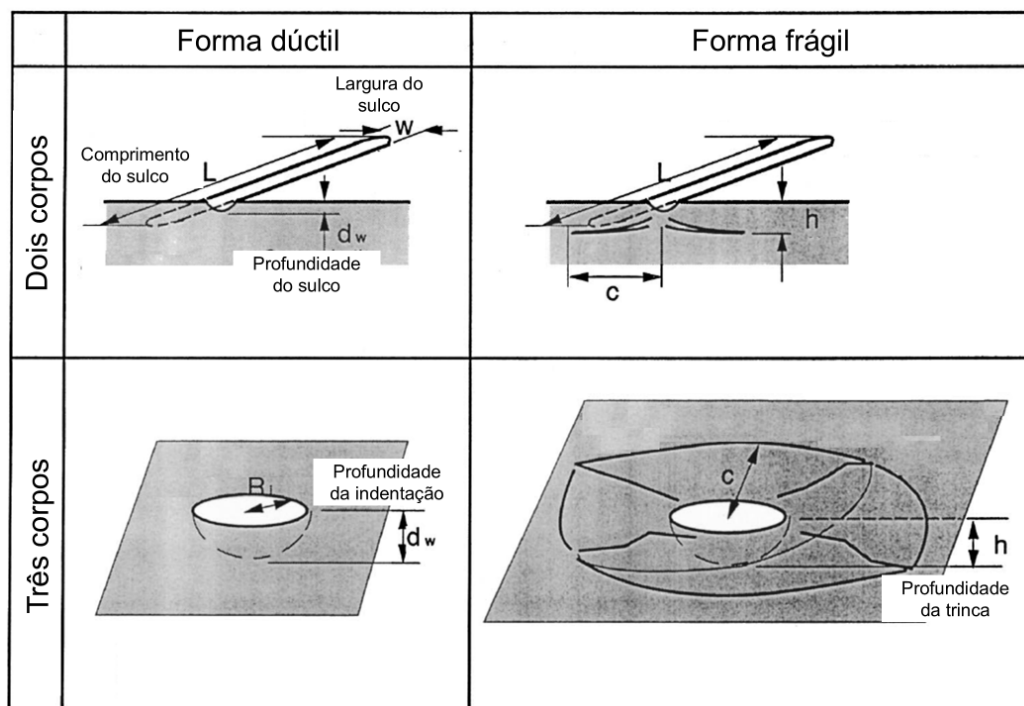


Figura 18 – Remoção de material conforme o tipo de material e abrasão
 Fonte: Adaptado de CHANG; HASHIMURA; DORNFELD (2000).

Modelos para determinar critérios que estabeleçam os padrões de movimento de um abrasivo durante a abrasão de três corpos foram desenvolvidos, levando em consideração fatores como a forma do grão, pressão aplicada, dureza das superfícies, tamanho da folga entre as faces, a concentração de grãos abrasivos e a lubrificação para determinar se o abrasivo irá deslizar ou rolar ao longo do processo (EVANS, 2003; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006; HEISEL; AVROUTINE, 2001).

Heisel e Avroutine (2001) desenvolveram um modelo levando em consideração principalmente a forma do grão abrasivo, avaliando as forças tangenciais e o atrito nas superfícies conforme são variados os ângulos formados entre as faces do abrasivo e a face do disco de lapidação ou da peça de trabalho. Os grãos abrasivos que rolam, são caracterizados por um baixo coeficiente de resistência ao rolamento, ou seja, a força tangencial necessária para iniciar esse movimento é menor que a força máxima de atrito nas superfícies de contato e essas forças de atrito são suficientemente altas para manter as conexões estáveis. Caso uma das faces apresente uma força de atrito máxima inferior à resistência de rolamento, o grão abrasivo tende a deslizar nesta superfície.

No estudo de Payrebrune (2022) foram conduzidas análises experimentais em sistemas tribológicos de três corpos contendo um número limitado de partículas,

tendo o objetivo de compreender a relação entre as forças de contato e a cinemática das partículas. Foram realizados testes com partículas individuais de diferentes geometrias (dodecaedro, icosaedro e hexaedro) e com uma camada de partículas abrasivas de carbeto de silício de variados tamanhos. Os resultados demonstraram que a razão entre força tangencial e força normal é um parâmetro confiável para identificar o modo de movimento das partículas, rolamento ou deslizamento. Além disso, verificou-se que a redução do tamanho do abrasivo, grãos de geometria mais arredondada, e o aumento da velocidade facilitam o movimento de rotação.

A utilização de sensores de vibração, aliada a filtros para eliminação de ruídos e técnicas de inteligência artificial permite identificar os padrões de vibração e emissão acústica de cada mecanismo de remoção e, dessa forma, detectar de maneira precoce possíveis anomalias e, com isso, interromper ou alterar o processo de lapidação de forma preventiva (SUWATTHIKUL *et al*, 2016; CHEN *et al*, 2022).

A profundidade de corte constitui uma característica fundamental para a definição do regime de remoção de material. Esta profundidade é influenciada tanto pelas propriedades intrínsecas do material, como a dureza, modulo de Young e tenacidade à fratura, quanto pelas condições de aplicação da força de corte. Quando a profundidade de penetração dos grãos abrasivos torna-se extremamente reduzida, a remoção efetiva de material deixa de ocorrer, sendo substituída por fenômenos como a aração ou o deslizamento por fricção na superfície da peça (HASHIMOTO *et al.*, 2016). A Figura 19 apresenta os mecanismos de corte frágil e dúctil.

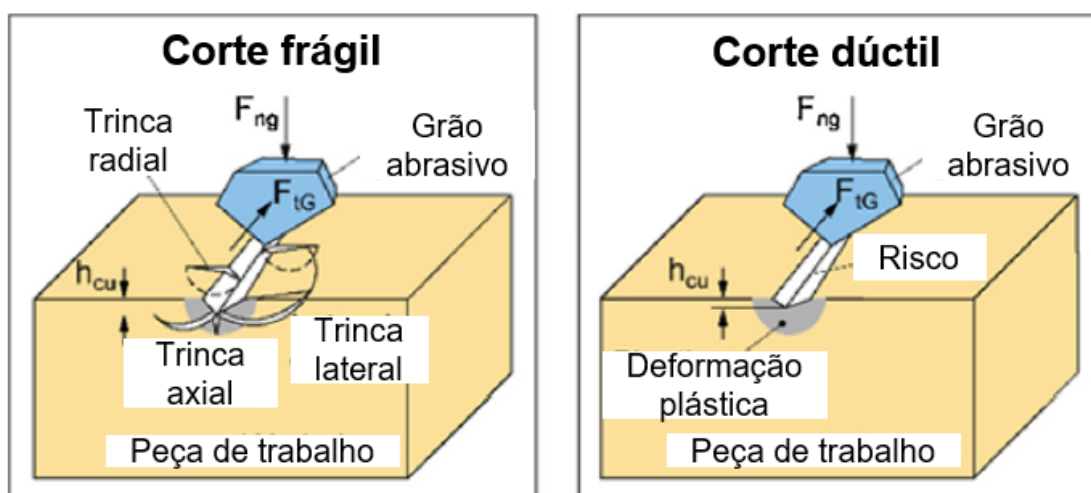


Figura 19 - Mecanismo de corte frágil e dúctil
Fonte: Adaptado de HASHIMOTO *et al.* (2016).

Em aços inoxidáveis lapidados é possível identificar que o modo dominante de remoção é por meio da deformação plástica, com a presença de alguns sulcos provenientes de grãos aderidos ao disco de lapidação (AGBARAJI, 2008; DESHPANDE, 2008). A Figura 20 apresenta a superfície de aço inoxidável AISI 304, lapidado com óxido de alumínio, gerada em um microscópio eletrônico de varredura com magnificação de 500X, em que é possível identificar marcas de deformação plástica em toda a peça e um sulco proveniente do mecanismo de remoção de dois corpos, bem como alguns abrasivos aderidos à superfície.

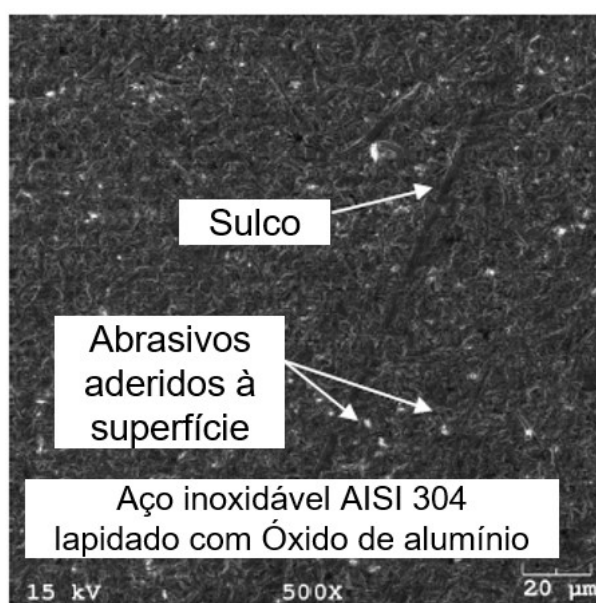


Figura 20 - Superfície do aço inoxidável AISI 304 lapidado, aproximada 500X
Fonte: Adaptado de AGBARAJI (2008).

2.3.4 PARÂMETROS

O processo de lapidação é influenciado por diversos parâmetros operacionais que impactam tanto a eficiência econômica quanto a qualidade final da peça. Entre os fatores que influenciam os aspectos econômicos, destacam-se a taxa de remoção de material, o tempo de máquina, o consumo de insumos e o desgaste do disco de lapidação. Em relação à qualidade da peça, a seleção dos parâmetros afeta a precisão dimensional, rugosidade superficial e as características da subsuperfície.

Os principais fatores controláveis no processo de lapidação incluem a pressão aplicada à peça de trabalho, a velocidade relativa entre a peça e o disco, e o tempo de lapidação, sendo este último determinante para a viabilidade econômica do processo. Nesta seção são discutidos esses três parâmetros, seus efeitos nas

respostas do processo e exemplos de aplicação em contextos industriais (KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

2.3.4.1 PRESSÃO

A pressão nominal aplicada é a razão da força aplicada à peça pela sua área total, que atua no contato efetivo entre os componentes do processo e a inserção necessária dos abrasivos para a remoção de material, sendo essa menor que a pressão real no início do processo, o que pode resultar em trincas, lascas e arranhões profundos.

No início do processo, a área de contato entre a peça de trabalho e a película de abrasivos é reduzida, o que diminui o número de grãos abrasivos ativos. Essa condição leva a uma concentração de pressão nos grãos em contato, resultando em uma pressão pontual significativamente mais elevada. O aumento do número de grãos abrasivos resulta na redução da carga aplicada por grão, assim, sob condições semelhantes, a utilização de grãos abrasivos menores ou em maiores proporções leva à diminuição da pressão pontual aplicada à peça de trabalho pelo grão abrasivo (GASHEV; MURATOV; ABLYAZ, 2022; MARINESCU *et al.*, 2004).

A pressão aplicada à peça de trabalho pode ter diversas fontes, como mecânica, hidráulica, pneumática, gravitacional e eletromagnética. Para evitar os problemas ocasionados pela elevada pressão real aplicada no início do processo, é possível variar a força aplicada em diversos estágios, sendo uma estratégia iniciar com uma pressão inferior à nominal e aumentá-la gradualmente até atingi-la e realizar a operação (CAI, 1998; GASHEV; MURATOV; ABLYAZ, 2022; MURATOV; GASHEV; LAGUNOV, 2017).

Como demonstrado por Muratov *et al.* (2017), a variação exponencial da força sobre a peça durante a lapidação aumentou a produtividade em 2,5 a 3 vezes, sendo estabilizada a pressão de contato em função da variação da área de contato. Essa abordagem permitiu a remoção de material mais rápida e eficiente, aumentou a taxa de remoção e permitiu a aproximação mais rápida da rugosidade aritmética média a um estado estável, quando comparado com a aplicação constante da força sobre a peça.

A pressão aplicada à peça durante o processo impacta diretamente na taxa de remoção do material, de modo que maiores pressões aumentam a taxa de remoção de material até um ponto de saturação. Contudo, o uso de pressões elevadas pode

acarretar danos na superfície usinada, como o aumento das tensões residuais compressivas na superfície usinada, até a quebra precoce dos abrasivos, levando a redução da taxa de remoção de material (DEACONESCU; DEACONESCU, 2014; KLOCKE, 2009; MURATOV, 2022).

Em ensaios de lapidação em aço 95X18 com CBN, Muratov *et al.* (2022) observaram que o aumento da pressão não causou variações significativas na rugosidade e que a taxa de remoção na lapidação aumenta linearmente com o aumento da carga até um limite de 0,4 kg/cm, após o qual a produtividade diminui devido à saturação conforme é apresentado na Figura 21.

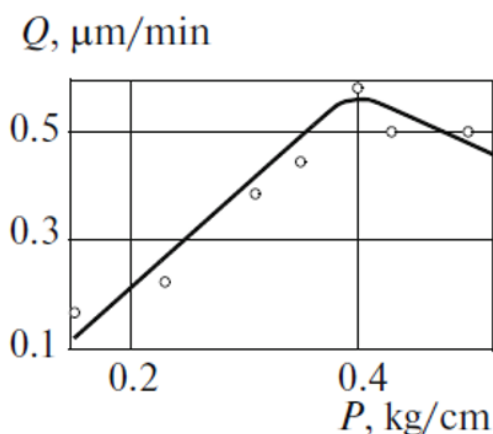


Figura 21 - Taxa de remoção de material em função do aumento da pressão
Fonte: MURATOV *et al.* (2022).

Em experimentos com aço AISI 52100 e utilizando abrasivos de Al_2O_3 , Farahnakian e Shahrajabian (2016), constataram que a pressão aplicada é o fator mais determinante na rugosidade final das peças usinadas, em que pressões elevadas de lapidação aumentaram significativamente a rugosidade em virtude da maior penetração dos abrasivos na peça de trabalho. Contudo, o aumento da pressão resultou na melhora da planicidade, promovendo o aumento da taxa e da uniformidade de remoção de material. Assim, indica-se a utilização de pressões maiores em operações de desbaste, visando remover defeitos de forma e pressões menores em operações de acabamento para garantir uma baixa rugosidade na superfície final. O comportamento da rugosidade e da planicidade variando em função do aumento da pressão é apresentado na Figura 22.

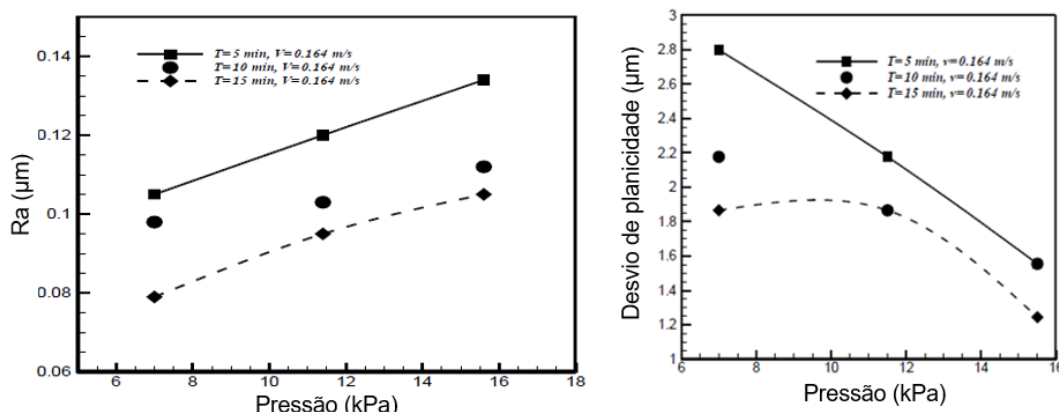


Figura 22 - Rugosidade e planicidade em função do aumento da pressão
 Fonte: Adaptado de FARAHNAKIAN; SHAHRAJABIAN (2016).

2.3.4.2 VELOCIDADE

A velocidade relativa entre o disco de lapidação e a peça de trabalho é um fator crucial no processo, pois determina o movimento relativo entre os componentes e influencia diretamente na distribuição dos abrasivos suspensos no fluido de lapidação. Esta velocidade deve ser suficientemente alta para gerar uma força centrífuga capaz de manter os abrasivos na região de contato efetivo, sem, no entanto, ser excessiva a ponto de deslocá-los para as bordas do disco e para fora da região de usinagem, prejudicando a eficiência do corte. Baixas velocidades dificultam o rolamento dos grãos abrasivos, favorecendo o deslizamento sobre a superfície da peça, com o aumento da velocidade e das forças tangenciais, o movimento de rotação dos grãos torna-se predominante, promovendo uma melhora no acabamento de superfície (DE PAYREBRUNE, 2022; KLOCKE, 2009).

Desta forma, uma faixa ideal para a velocidade relativa e para a razão entre a velocidade angular do disco de lapidação e da peça, deve ser alcançada. Quando essa razão é muito baixa, a taxa de remoção de material tende a ser insignificante. À medida que essa razão aumenta, há um incremento na trajetória percorrida pela peça, favorecendo uma maior taxa de remoção de material. No entanto, se essa razão se tornar demasiadamente elevada, a distribuição dos abrasivos na zona de lapidação torna-se inadequada, o que também resulta em uma redução da eficiência do processo (BERI, 2020; YU; LI; KEE, 2021).

Alterações bruscas de velocidade durante o início ou finalização do processo de lapidação podem ocasionar defeitos na superfície. Neste âmbito, Jiandong *et al.* (2010) apresentam uma solução viável para otimizar processos em alta velocidade, substituindo a aceleração brusca tradicional por perfis senoidais de velocidade. A

técnica demonstrou potencial para reduzir impactos mecânicos e danos à peça, especialmente em materiais sensíveis ou de alta precisão.

O aumento da velocidade de lapidação resulta em um aumento da temperatura do sistema, a qual pode variar em 40°C em condições normais até 100°C em condições severas. Este aquecimento ocorre de forma lenta, em alguns casos podendo levar mais de três horas para que se atinja a temperatura máxima do processo. Este aumento de temperatura pode resultar em um leve aumento da rugosidade da peça e na redução das tensões residuais compressivas geradas na superfície (BULSARA *et al.*, 1997; GAFAROV; SHARIFOV; GAFAROV, 2019; MOLEND; BARYLSKI, 2011; MOLEND; CHARCHALIS, 2017).

Ademais, o aumento da velocidade resulta ainda em um aumento das vibrações durante o processo, as quais estão associadas a maiores defeitos de forma e rugosidade na superfície, principalmente em peças de maior espessura que apresentam piora no nivelamento e paralelismo. Este fenômeno pode ser observado no trabalho de Farahnakian e Shahrajabian (2016), em que experimentos com aço AISI 52100 e grãos abrasivos de Al_2O_3 foram realizados e observaram-se redução na planicidade e aumento da rugosidade conforme a velocidade relativa entre o disco de lapidação e a peça aumentou, conforme apresentado na Figura 23.

Deve-se levar em consideração ainda que, associado ao aumento das velocidades de lapidação, há um aumento no consumo de insumos, como abrasivos e fluidos, além do aumento na possibilidade de contato entre a peça de trabalho e o disco de lapidação, em função do deslocamento de fluidos e abrasivos para as bordas do disco de lapidação (KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

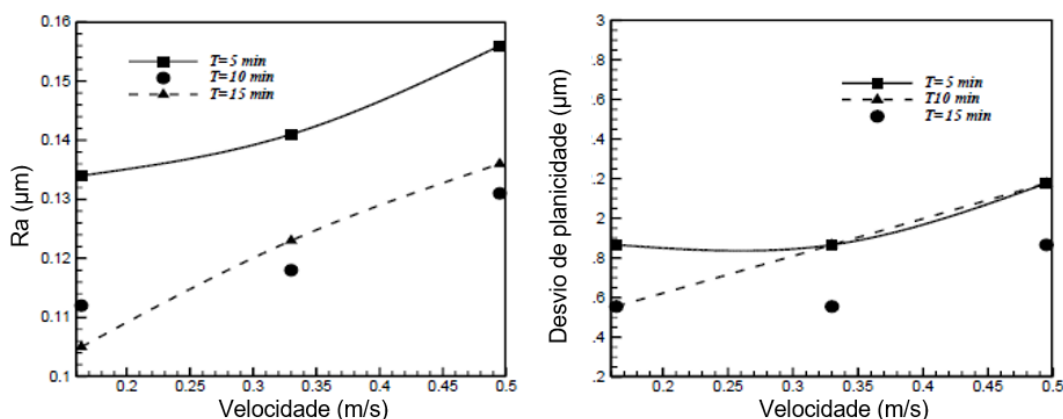


Figura 23 - Rugosidade e planicidade em função do aumento da velocidade
Fonte: Adaptado de FARAHNAKIAN; SHAHRAJABIAN (2016).

2.3.4.3 TEMPO

Quando avaliados os custos do processo de lapidação, o tempo de processo compõe uma das parcelas mais significativas, chegando a representar mais da metade dos custos totais do processo, estando também fortemente atrelado a rugosidade final da peça lapidada. De modo geral, o aumento do tempo de lapidação resulta em menores valores de rugosidade e tolerâncias mais estreitas de planicidade na peça, contudo, o comportamento da rugosidade em função do tempo de lapidação apresenta uma redução acentuada em um primeiro momento, seguido de uma estabilização nos valores de rugosidade. A Figura 24 apresenta o comportamento da rugosidade em função do tempo na lapidação de carbetto de silício infiltrado com silício (SiSiC) (FARAHNAKIAN; SHAHRAJABIAN, 2016; KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

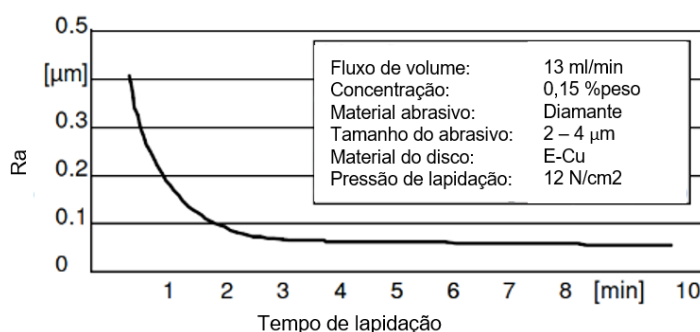


Figura 24 - Comportamento da rugosidade em função do tempo de lapidação

Fonte: Adaptado de KLOCKE (2009).

A taxa de remoção de material na lapidação plana não é constante, sendo acentuada no início do processo, pois há mais irregularidades na superfície, que decaem ao longo do tempo mesmo sob condições controladas de pressão e velocidade. Esse fenômeno também é atribuído ao desgaste do abrasivo e ao acúmulo de resíduos no disco de lapidação (LE; PETERSON, 1999). Na Figura 25 é apresentado um exemplo do comportamento de decaimento temporal da taxa de remoção de material.

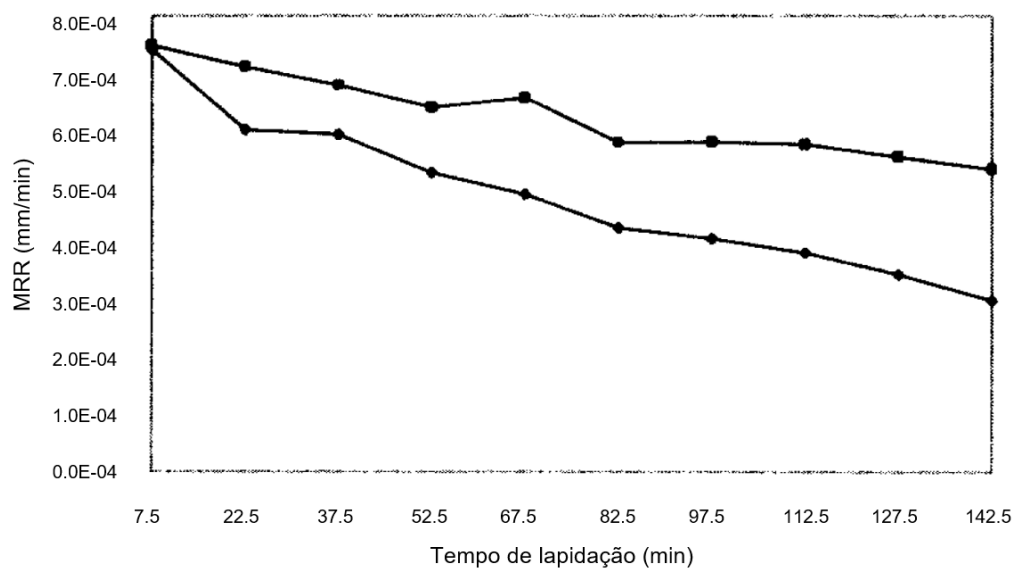


Figura 25 - Taxa de remoção de material conforme o tempo de lapidação
Fonte: Adaptado de LE; PETERSON (1999).

Desta forma, torna-se essencial a determinação do momento em que ocorre a estabilização na redução da rugosidade da peça ao longo do processo, de modo a reduzir desperdícios de consumíveis e de tempo de máquina/operador. Atingido este limite, deve-se encerrar o processo ou realizar alterações no sistema, como a utilização de abrasivos de menor tamanho, visando a melhora no acabamento da superfície.

2.4 POLIMENTO

Assim como na lapidação, no polimento tem-se uma dispersão de abrasivos em um fluido ou pasta, normalmente apresentando alta dureza e baixo tamanho de partícula, os quais são guiados por uma ferramenta contra a superfície da peça, removendo material da superfície por meio deste movimento relativo entre os corpos. Enquanto o processo de lapidação proporciona alterações na forma da superfície, o processo polimento concentra-se no acabamento da superfície, promovendo a eliminação de imperfeições deixadas por processos anteriores, como riscos e vazios (MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

As principais diferenças entre os processos de lapidação e polimento surgem em relação a utilização, no processo de polimento, de discos macios e partículas abrasivas de menor tamanho, as quais são levemente fixadas ao disco, bem como a utilização de baixas pressões. Neste processo ocorre apenas a remoção na camada

de superfície, produzindo uma superfície espelhada com valores reduzidos de rugosidade (KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

O disco de polimento deve ser resistente a ponto de manter a sua forma e dimensão, servindo como suporte e para a distribuição dos abrasivos, estabelecendo uma fixação fraca com estes. Os discos de polimento podem ser classificados quanto à sua maleabilidade em três categorias principais: maleáveis, como piche e poliuretano fundido; duros, exemplificados por feltros rígidos e espumas de poliuretano; e macios, como panos de algodão, veludo flocado, feltros sintéticos e panos de microfibra (KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

Os abrasivos normalmente utilizados no polimento de metais são feitos de óxidos como Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 , suspensos em água e com granulometria de 0,1 a 50 micrometros. Há também a possibilidade de utilizar diamante na forma de pasta, o qual apresenta uma dureza maior que a dos demais óxidos, facilitando a remoção de material e podendo ser utilizado em materiais de alta dureza (KLOCKE, 2009).

Os parâmetros de polimento atuam de maneira similar aos parâmetros de lapidação, de modo que o aumento da pressão aplicada e velocidade relativa exercem um aumento na taxa de remoção de material. Outras variáveis como a cinemática da máquina, tamanho, forma e concentração de abrasivos, estrutura e propriedades da peça, têm influência similar no resultado do polimento (KLOCKE, 2009; MARINESCU; UHLMANN; DOI, 2006).

Dentre os mecanismos de remoção de material no polimento de metais, predominam os mecanismos de abrasão de dois corpos, em que o material é removido por meio de cortes proporcionados pelo movimento relativos dos gumes dos abrasivos, os quais tem uma dureza maior que a peça de trabalho (EVANS, *et al*, 2003; KLOCKE, 2009).

Quando utilizados abrasivos com uma dureza inferior ao material usinado, há um pico de pressão e consequentemente de temperatura no contato entre os abrasivos e os picos das asperezas da superfície, levando a uma plastificação e deslocamento do material dos picos para os vales da superfície via mecanismos de conformação (EVANS *et al*, 2003; KLOCKE, 2009).

Mecanismos químicos também podem contribuir para a remoção de material durante o processo de polimento, dependendo do fluido abrasivo utilizado. Nesse contexto, reações de corrosão ocorrem entre o fluido e a peça, sendo normalmente utilizadas soluções ácidas. Os produtos das reações são posteriormente removidos

pela ação mecânica dos abrasivos, caracterizando o processo conhecido como polimento químico-mecânico ou polimento mecanoquímico (EVANS *et al.*, 2003; KLOCKE, 2009). A Figura 26 apresenta os mecanismos de remoção de material envolvidos no polimento de metais.

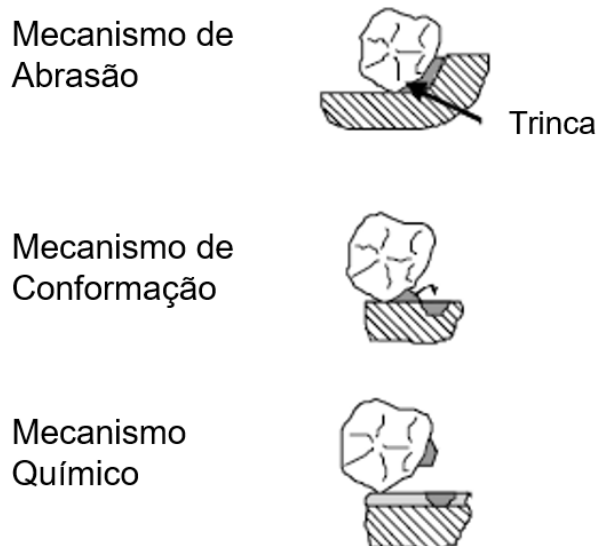


Figura 26 - Mecanismos de remoção de material no polimento de metais
Fonte: Adaptado de KLOCKE (2009).

No polimento químico-mecânico, o mecanismo de remoção de material predominante é de natureza química, seguido por uma ação mecânica para a remoção dos produtos da reação, sendo um processo utilizado na fabricação de células solares de filme fino em aço inoxidável AISI 316L (JIANG *et al.*, 2015). Por outro lado, no polimento mecanoquímico, os mecanismos de abrasão são predominantes, mesmo havendo mecanismos de remoção químicos significativos presentes no processo.

Técnicas de polimento são utilizadas para dar acabamento em aços inoxidáveis, sendo uma solução para aplicações que demandam rapidez e custo reduzido, além de ser uma solução eficiente para aplicação em superfícies planas (BOUELATA; ATTIA; YOUSSEF, 2022). Conforme demonstrado por Guo *et al.* (2025), o polimento mecânico com correção ativa de pressão mostrou-se uma técnica eficiente para redução significativa da rugosidade em aço inoxidável AISI 316L. A partir de uma superfície inicial com valor de S_a de $0,068 \mu\text{m}$, o processo, que utilizou óxido de alumínio como abrasivo, com granulometria média de $14 \mu\text{m}$ e concentração de 5% em volume, foi capaz de reduzir os valores de S_a para $0,021 \mu\text{m}$.

2.5 ELETROPOLIMENTO

O eletropolimento é um processo eletroquímico amplamente utilizado para a adequação do acabamento de superfície em metais, com destaque na melhoria da rugosidade, brilho e resistência à corrosão. O eletropolimento é particularmente eficaz em metais como aço inoxidável, alumínio, titânio e cobre, sendo frequentemente aplicado em indústrias médica, farmacêutica, alimentícia e aeroespacial, onde a qualidade da superfície é essencial para aplicação (HAN; FANG, 2019; YANG *et al*, 2017).

A peça a ser polida atua como ânodo, sendo conectada ao terminal positivo de uma fonte de alimentação elétrica, enquanto o eletrodo da ferramenta desempenha o papel de cátodo, ligado ao terminal negativo da mesma fonte. Quando uma diferença de potencial é aplicada, estabelece-se uma corrente eletrolítica que atravessa o eletrólito, normalmente um meio ácido (HAN; FANG, 2019; YANG *et al*, 2017). A Figura 27 apresenta um esquema do processo de eletropolimento, com ânodo, cátodo, eletrólito e fonte de energia destacados.

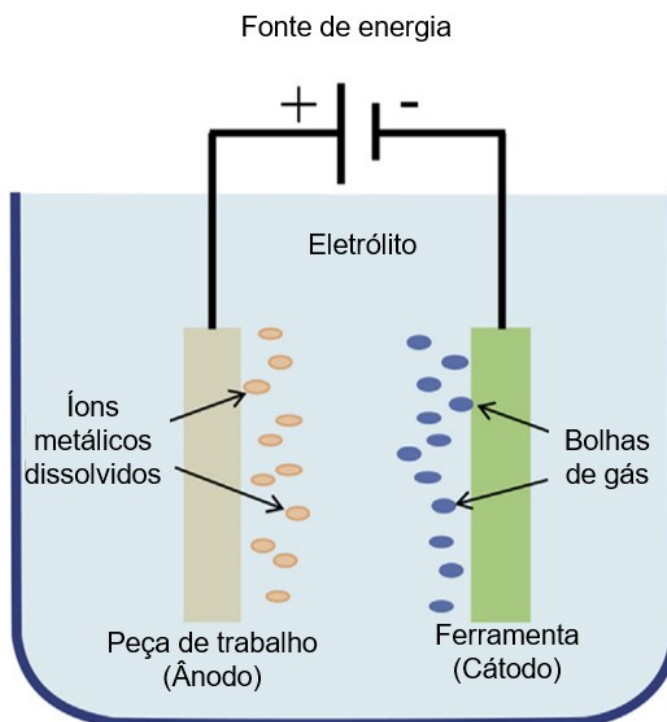


Figura 27 - Esquema do processo de eletropolimento
Fonte: Adaptado de HAN; FANG (2019).

Por meio do processo de eletrólise, ocorre a transferência de elétrons da superfície da peça para a superfície da ferramenta, essa perda de elétrons resulta na oxidação da peça, promovendo a conversão dos átomos metálicos da superfície em íons, os quais são subsequentemente dissolvidos na solução eletrolítica, promovendo a remoção controlada de material. Simultaneamente, na superfície da ferramenta, ocorre o processo de redução, caracterizado pelo ganho de elétrons provenientes da peça, o que leva à formação de gás hidrogênio (HAN; FANG, 2019; LEE, 2000; YANG *et al*, 2017).

Em nível microscópico, a remoção de material não se dá de maneira uniforme, ocorrendo preferencialmente nos picos da superfície devido à concentração de densidade de corrente nesses pontos, enquanto regiões de vale são menos afetadas, resultando em um nivelamento progressivo. O desempenho e a qualidade do eletropolimento são diretamente influenciados por diversos parâmetros operacionais, cujos efeitos precisam ser cuidadosamente ajustados. Entre os parâmetros mais relevantes destacam-se a composição do eletrólito, a temperatura da solução, a densidade de corrente, o tempo de processamento e a rugosidade inicial da peça (HAN; FANG, 2019; YANG *et al*, 2017).

Além de suavizar a superfície, o eletropolimento é capaz de melhorar significativamente a refletividade da superfície, conferindo um acabamento visualmente superior em relação ao polimento mecânico. Esse efeito decorre da uniformização da topografia, que reduz a dispersão difusa da luz incidente na superfície. A ausência de deformações plásticas típicas do polimento abrasivo também contribui para um brilho mais uniforme e durável. A significativa melhora na resistência à corrosão, ocorre em função da remoção de inclusões não metálicas e impurezas na superfície, criando uma camada passiva mais homogênea nos aços inoxidáveis (LEE, 2000; MOHAN *et al.*, 2001; YANG *et al*, 2017).

A densidade de corrente aplicada é um parâmetro importante que influencia as características do eletropolimento para o aço inoxidável AISI 316L, de modo que o seu aumento está associado a redução da rugosidade final da superfície. Contudo, um aumento excessivo resulta no aumento da formação de bolhas, que podem gerar defeitos como microcavidades e *pitting* (MOHAN *et al.*, 2001; YANG *et al*, 2017).

A rugosidade final obtida após o eletropolimento está diretamente relacionada à qualidade da superfície inicial da peça, sendo que superfícies com menor rugosidade de partida tendem a apresentar resultados mais satisfatórios. Alterações

na forma e a ondulação são menos significativas, o que reforça a importância do acabamento prévio da peça. Durante o eletropolimento do aço inoxidável AISI 316L, observou-se que a ondulação da superfície (W_t) apresentou comportamento menos previsível que a rugosidade, com aumentos associados ao tempo excessivo de eletropolimento, à má agitação do eletrólito e a distâncias inadequadas entre os eletrodos. Além disso, o processo removeu a camada deformada e eliminou a fase martensítica formada durante o polimento mecânico (COLOMBO *et al.*, 2024; LEE, 2000).

Após a revisão dos fundamentos dos quatro processos de fabricação abordados neste trabalho, que incluem a união por difusão, a lapidação, o polimento e o eletropolimento, e tendo em vista a associação dos processos de usinagem à união por difusão, o próximo capítulo apresenta as atividades desenvolvidas para atender aos objetivos desse trabalho.

3 METODOLOGIA

Este trabalho versa sobre o uso do processo de lapidação como condição para melhorar a qualidade de superfície para a posterior união por difusão. Desta forma, foram estabelecidas três rotas para a fabricação de amostras a serem unidas por difusão: amostras lapidadas na condição definida como o melhor acabamento de superfície; amostras na melhor condição de lapidação que passaram por uma etapa consecutiva de polimento mecânico; e amostras lapidadas na melhor condição eletropolidas em sequência. O fluxograma ilustrando todas as etapas do estudo divididos na avaliação do processo de lapidação e avaliação de amostras unidas por difusão, desde a matéria prima até as análises das uniões, é apresentado Figura 28.

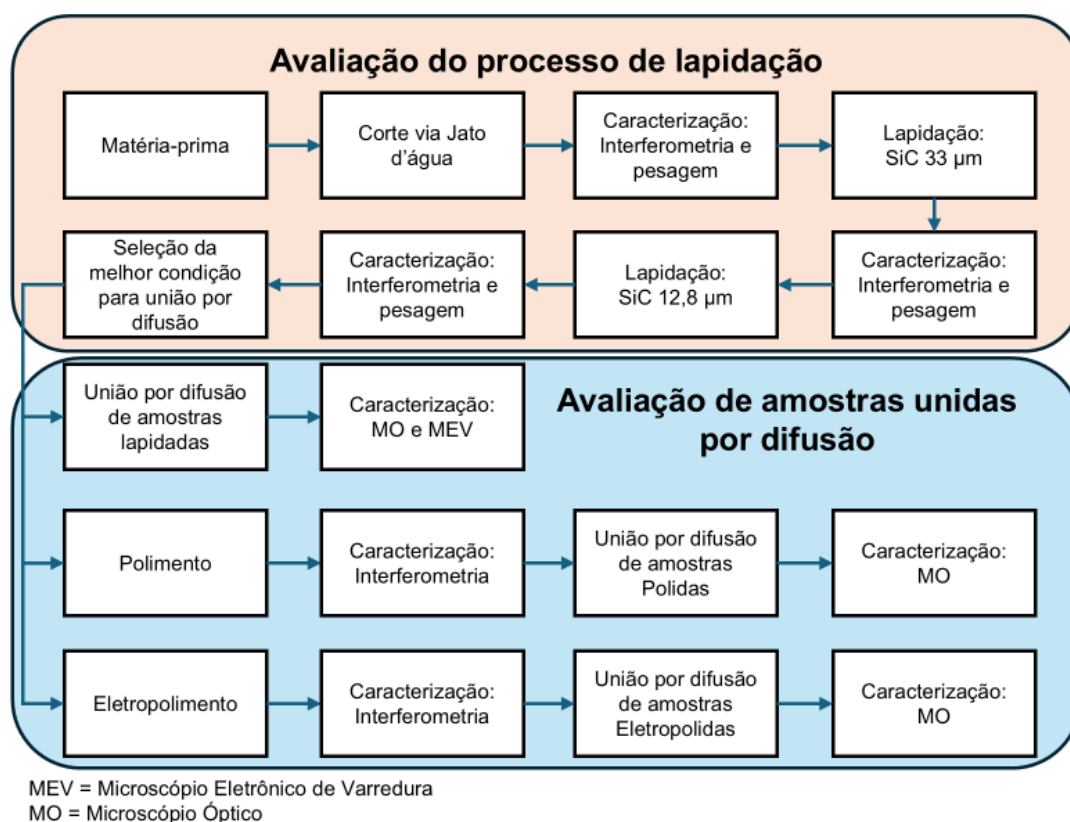


Figura 28 - Fluxograma das atividades desenvolvidas

3.1 MATÉRIA-PRIMA

O material selecionado para o presente trabalho foi o aço inoxidável AISI 316L, o qual é um aço inoxidável austenítico de baixo teor de carbono, contendo cromo (Cr), níquel (Ni) e molibdênio (Mo) como principais elementos de liga. Na Tabela 2 é apresentada a composição química padrão desta liga.

Tabela 2 - Composição química padrão para o aço inoxidável 316L
 Fonte: ASTM A240 (2004).

Elemento	Quantidade (% em peso)
C	0,03
Mn	2,00
P	0,45
S	0,03
Si	0,75
Cr	16.0-18.0
Ni	10.0-14.0
Mo	2.0 - 3.0
N	0,10

A designação “L” no aço inoxidável austenítico 316L indica um teor reduzido de carbono, limitado a no máximo 0,03% em peso. Essa característica é fundamental para minimizar a sensitização do material durante os processos de fabricação, evitando a precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão, que favorecem a ocorrência da corrosão intergranular.

A espessura da chapa utilizada é de 3 mm com acabamento de superfície tipo No. 2B, que consiste na laminação a frio, seguido de recozimento e decapagem, sendo finalizado com um passe de laminação a frio em cilindros polidos. Além disso, as chapas contam com uma película protetiva do tipo PVC em ambas as faces, de modo a proteger as mesmas durante corte e transporte. A geometria das amostras para lapidação é apresentada na Figura 29, sendo as dimensões das amostras de 100x100 mm, com raios de arredondamento de 5 mm e 3 mm de espessura.

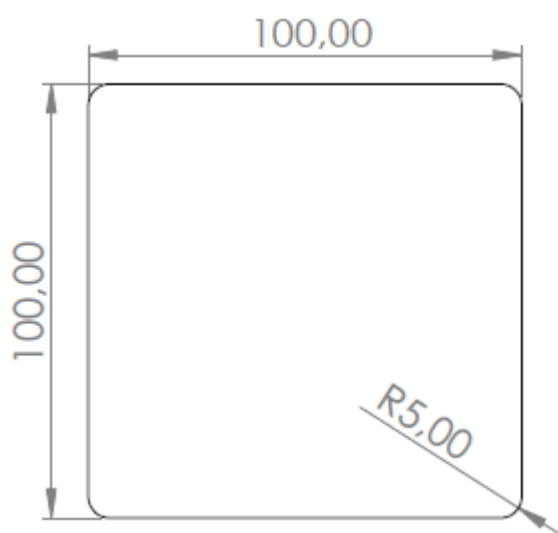


Figura 29 - Geometria para lapidação, dimensões em mm

As chapas foram cortadas via jato d'água abrasivo em um equipamento modelo Flow Waterjet, M2c 2030, disponível no LABTUCAL, com a utilização de abrasivos Garnet #80 Mesh, da marca Zirtec. Os parâmetros de corte utilizados foram os valores 125 mm/min de velocidade de avanço, 340 MPa de pressão do jato e 1,5 mm de distância entre o bocal e a peça. Posterior ao corte, foram retiradas as rebarbas em uma escova circular, sendo a remoção das rebarbas realizada em direção à região externa da peça.

3.2 LAPIDAÇÃO

A lapidação das amostras foi realizada na lapidadora plana, disponível no LMP. Seu acionamento é realizado por um motor elétrico, cujo movimento de rotação é transmitido ao disco de lapidação e a engrenagem solar, por um redutor de velocidade. A cinemática do equipamento consiste em um sistema planetário que conta com peça de trabalho, disco de lapidação, engrenagem anelar, engrenagens satélites e engrenagem solar. A peça de trabalho, é posicionada no centro da engrenagem satélite, de modo a acompanhar o movimento de rotação com a mesma velocidade angular, além disso foram confeccionados dispositivos para fixar as peças retas as bordas circulares da engrenagem satélite, assim evitando movimentos parasitas e colisões. A Figura 30 apresenta a disposição das peças de trabalho e das engrenagens na lapidadora.



Figura 30 - Disposição das peças de trabalho na lapidadora

A engrenagem solar da lapidadora utilizada possui seis dentes, enquanto cada uma das três engrenagens satélites conta com 23 dentes e diâmetro interno de 145 mm. A engrenagem anelar conta com 52 dentes. O disco de lapidação é fabricado em material cerâmico e apresenta diâmetro externo de 365 mm. Entre a borda do disco de lapidação e a estrutura da máquina há uma folga para a remoção dos resíduos de lapidação durante o processo.

Visando otimizar a taxa de remoção e garantir a melhora na qualidade da superfície, foram avaliados no presente estudo três parâmetros de lapidação: velocidade de rotação do disco de lapidação, pressão aplicada à peça e o tempo de lapidação. Ademais, estes parâmetros foram avaliados em duas operações, uma inicial com carbeto de silício, com diâmetro médio de partícula de 33 μm e uma segunda operação com carbeto de silício, com diâmetro de 12,8 μm .

A suspensão do abrasivo foi realizada em água com uma proporção de 1:5 em massa, sendo adicionado manualmente 50 ml a cada 5 minutos, resultando em uma taxa de 10 ml/minuto. Foi utilizado um novo disco de lapidação para cada granulometria do abrasivo, sendo realizada a limpeza do disco de lapidação e das engrenagens após cada condição de lapidação para evitar possíveis contaminações. A aplicação de pressão sobre as peças foi realizada por meio da força gravitacional, utilizando massas cilíndricas de 6,1 kg, 9,2 kg e 12,3 kg.

A definição dos parâmetros foi realizada por meio da construção de um *Design of Experiments* (DoE) fatorial do tipo 2^k com ponto central, sendo definidos dois níveis de intensidade para cada parâmetro. Os pontos centrais representam a média entre os níveis de intensidade dos parâmetros. A Tabela 3 apresenta os parâmetros e valores avaliados.

Tabela 3 - Parâmetros e valores avaliados

Parâmetros	(-a)	a	Ponto central
Rotação do disco (RPM)	15	25	20
Pressão Aplicada (kPa)	6	12	9
Tempo de lapidação (Minutos)	10	50	30

Ao montar as correlações entre os parâmetros, foram definidas quinze condições de operação que são apresentadas na Tabela 4, sendo fabricadas três amostras simultaneamente em cada condição de lapidação.

Tabela 4 – Condições e parâmetros utilizados

Condição	Rotação do disco (RPM)	Pressão Aplicada (kPa)	Tempo de lapidação (Minutos)
1	15	6	10
2	25	6	10
3	15	12	10
4	25	12	10
5	15	6	50
6	25	6	50
7	15	12	50
8	25	12	50
Ponto central			
0	20	9	30
Pontos axiais			
9 (-a,0,0)	15	9	30
10 (a,0,0)	25	9	30
11 (0,-a,0)	20	6	30
12 (0,a,0)	20	12	30
13 (0,0,-a)	20	9	10
14 (0,0,a)	20	9	50

3.3 ANÁLISES DAS AMOSTRAS LAPIDADAS

Após o processo de corte via jato d'água, realizou-se a limpeza das amostras, inicialmente em água corrente, seguido da remoção de sujidades com uma solução a base de acetona e por fim em banho ultrassônico contendo álcool etílico 96°GL durante 3 minutos, sendo refeita a limpeza em água corrente e em banho ultrassônico com álcool entre cada procedimento de lapidação. A caracterização da rugosidade e medida da massa das amostras lapidadas foi realizada após cada etapa do processo.

Para a determinação da massa das amostras foi utilizada uma balança digital com resolução de 0,1 grama. As medições de topografia e rugosidade foram realizadas em um interferômetro Zygo Newview 7300, localizado no LABMAT. Posteriormente as análises de interferometria, os pontos adquiridos foram tratados no software Mountains Map® Premium, para a extração dos parâmetros topográficos das superfícies geradas, sendo avaliados os parâmetros de rugosidade média aritmética (S_a), rugosidade média quadrática (S_q), assimetria (S_{sk}), curtose (S_{ku}), profundidade

do vale (S_v) e altura do pico (S_p) em quatro regiões, apresentadas na Figura 31. Essa distribuição foi escolhida para avaliar a uniformidade entre as regiões lapidadas em uma mesma peça.

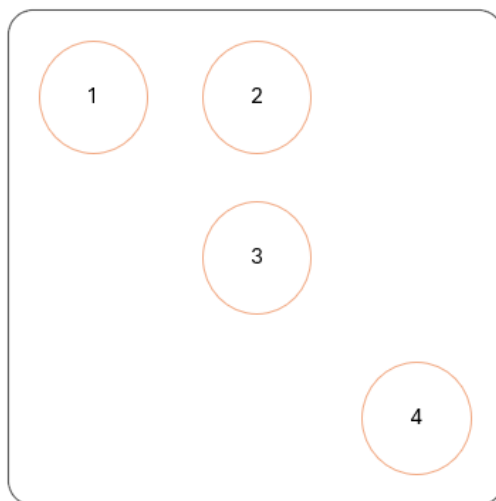


Figura 31 - Regiões das medições de rugosidade

3.4 POLIMENTO E ELETROPOLIMENTO

As operações de polimento e eletropolimento foram realizadas em peças lapidadas e seccionadas no corte via jato d'água em amostras de dimensão 40x40 mm². A geometria das amostras cortadas e as regiões em que foram seccionadas são apresentadas na Figura 32. Deve-se salientar que para o eletropolimento, as amostras contêm uma região adicional para a fixação no eletropolimento.

O polimento mecânico foi realizado na politriz PL02E, com duas operações de 10 minutos, sendo a primeira em pasta de diamante de 3µm e a segunda em pasta de diamante de 1µm, ambas com uma velocidade de rotação de 300 RPM. O eletropolimento foi realizado em solução de ácido sulfúrico e ácido fosfórico na proporção 1:1, durante 37 minutos com uma corrente de 10 amperes e tendo como cátodo uma cuba de aço inoxidável. A Figura 33 apresenta a bancada de eletropolimento.

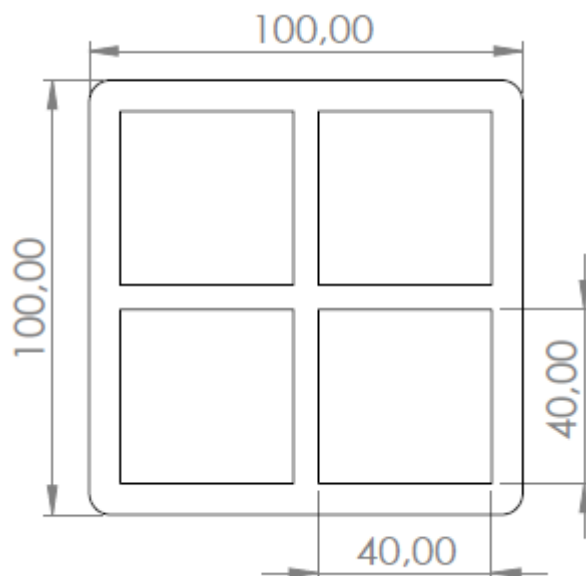


Figura 32 - Geometria das amostras para união a partir da amostra lapidada, dimensões em mm

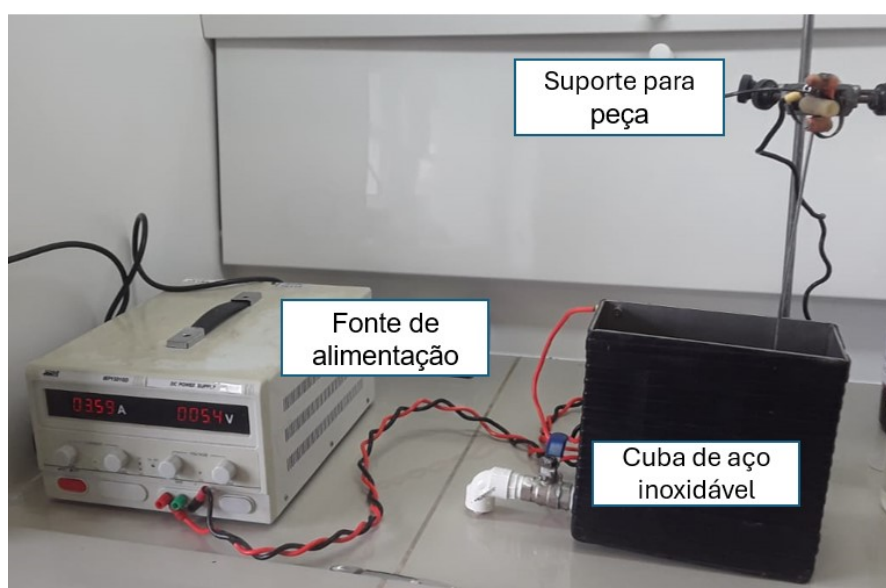


Figura 33 - Bancada de eletropolimento

As medições de rugosidade nas amostras polidas e eletropolidas foram realizadas no Zygo ZeGge PRO HRH, localizado no LMP. No total, nove pontos na região central de cada amostra, espaçados em 8mm, foram medidos. As medições foram tratadas com auxílio do software Mountains Map® Premium, sendo determinados os valores rugosidade média aritmética (S_a), rugosidade média quadrática (S_q), profundidade do vale (S_v) e altura do pico (S_p) das peças após os processos de acabamento.

3.5 UNIÃO POR DIFUSÃO

Antes de realizar a montagem e o procedimento de união, as peças foram limpas em um banho ultrassônico, com desengraxante industrial por 15 minutos, seguido de um segundo banho ultrassônico, contendo álcool etílico 96°GL, por 15 minutos. Na sequência, duas amostras com o mesmo acabamento de superfície foram posicionadas na matriz, com as faces usinadas em contato, sendo o fechamento da matriz, com 12 conjuntos de porcas e parafusos, sendo utilizado um torquímetro para controlar o torque aplicado, resultando em uma aplicação de 15MPa na peça. Para garantir que as amostras não fossem unidas às matrizes, aplicou-se uma camada de pó de nitreto de boro hexagonal (hBN). A Figura 34 apresenta o posicionamento das amostras para união na matriz e a matriz fechada com os conjuntos de porca e parafuso.

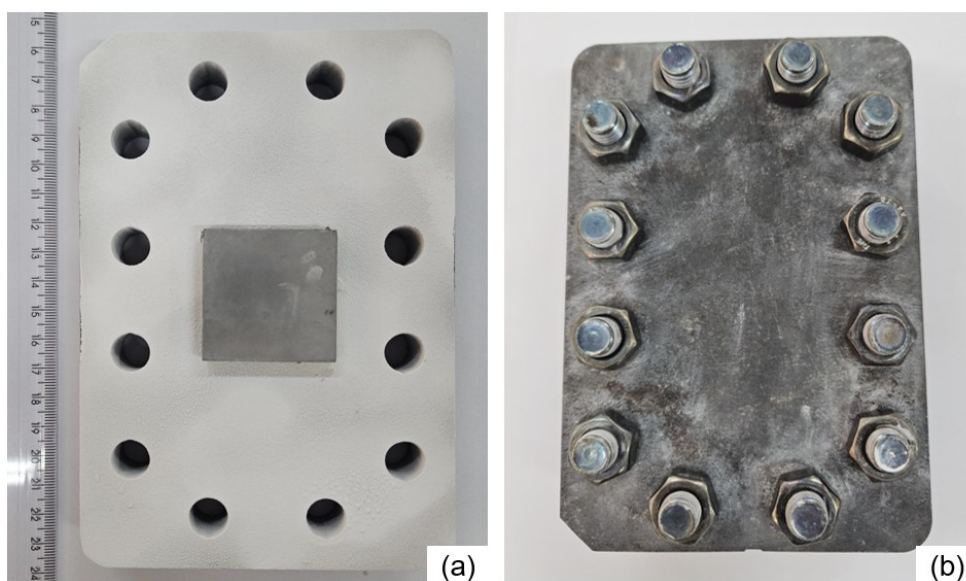


Figura 34 - Posicionamento da amostra para união na matriz (a) e matriz fechada (b)

Cada condição de acabamento foi unida em um ciclo próprio, em um forno tubular, com temperatura de patamar de 1080 °C por 6 horas em uma atmosfera de Argônio, com taxa de aquecimento de 10°C/min e o resfriamento realizado de forma natural. A Figura 35 apresenta a temperatura em função do tempo para os ciclos de união realizados.

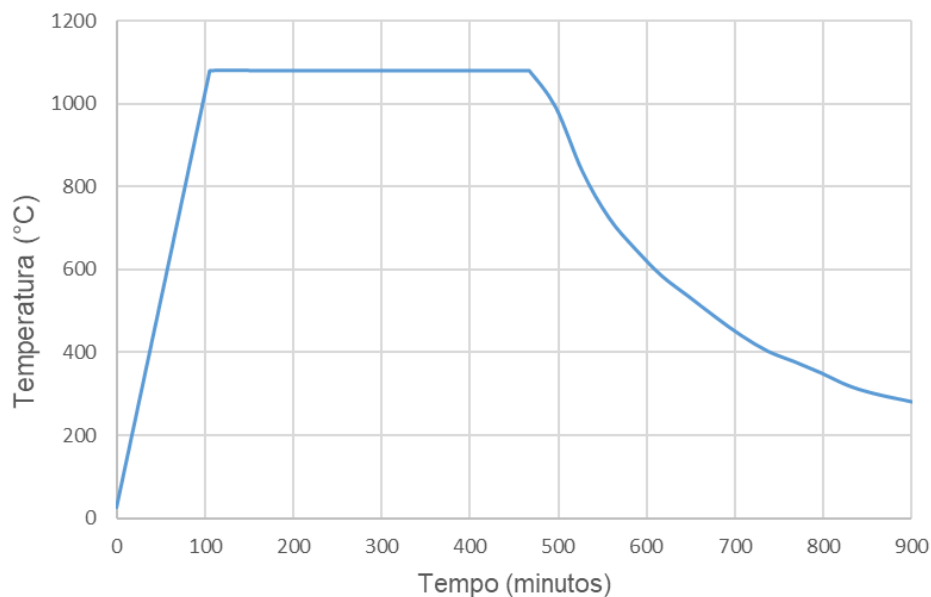


Figura 35 - Ciclo de união

Após a união, as amostras foram retiradas e cortadas para preparação metalográfica, iniciando-se o lixamento com lixas de SiC, nas sequências de granulometrias #220, #400, #600, #1000, #1500 e #2000, seguido do polimento em pasta de diamante com 3 μ m e 1 μ m, respectivamente. Como uma última etapa foi realizado o ataque eletrolítico.

A análise microestrutural foi realizada em microscópio ótico (MO), sendo avaliadas as características microestruturais na linha de união. Ademais, na condição lapidada, foi realizada a caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS), com o objetivo de identificar a composição química das regiões de interesse.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 LAPIDAÇÃO

4.1.1 TEXTURA DA SUPERFÍCIE

Por meio do interferômetro de luz branca foram reconstruídas as projeções axonométricas das superfícies. Assim, observa-se que o material conforme o recebido, com acabamento No. 2B, apresentou uma superfície predominantemente formada por vales e defeitos localizados abaixo da linha média, o que é confirmado por um valor médio de S_{sk} de -2,86.

Ademais, as medições apresentaram valores de S_{ku} superior a três, com um valor médio de 22,62. Valores de S_{ku} maiores que 3 indicam que a superfície é composta por picos e vales mais agudos, irregularidades intensas e concentradas.

Não foram verificadas grandes variações na textura da superfície entre as amostras conforme recebido, sendo observado em todos os casos a presença de linhas dispostas em uma única direção, característica comum do processo de laminação a frio, seguido do recozimento. A projeção axonométrica da condição conforme recebida é apresentada na Figura 36.

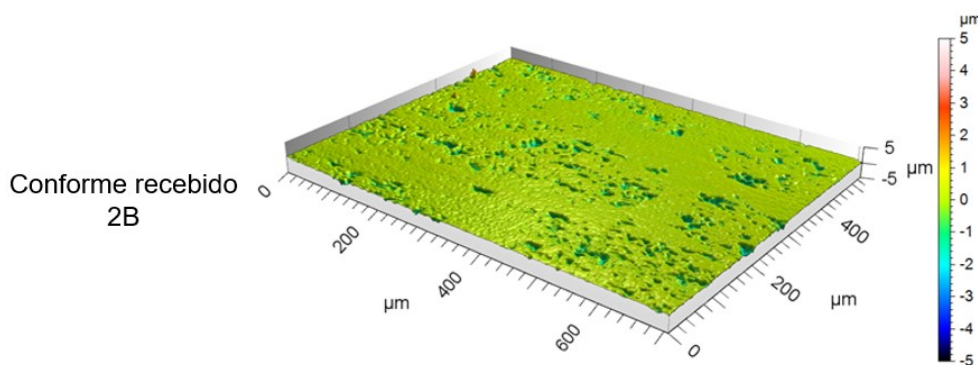


Figura 36 – Projeção axonométrica da condição inicial

Na avaliação das amostras lapidadas por um tempo de 10 minutos, observou-se que a superfície da amostra não se manteve uniforme ao longo de toda a região lapidada, sendo verificada grande dispersão nos valores de rugosidade média entre pontos próximos a borda e pontos em regiões centrais da amostra, indicando a presença de desvios de planicidade, os quais fazem com que certas regiões da peça sejam parcialmente usinadas.

A Figura 37 apresenta as projeções axonométricas após a primeira e a segunda operação de lapidação, abrasivos de 33 e 12,8 μm respectivamente, para duas condições de lapidação, sendo mantido o tempo fixo em 10 minutos.

Na condição 1 foi utilizada uma velocidade de rotação do disco de 15 RPM e pressão aplicada de 6 kPa, enquanto na condição 4 ambos os parâmetros foram elevados, sendo utilizada uma velocidade de rotação do disco de 25 RPM e aplicada uma pressão de 12 kPa.

As projeções revelam a formação de uma nova textura de superfície nas amostras, característica do processo de lapidação. Apesar disto, os valores de S_{sk} ainda se mantiveram negativos, apesar de apresentarem valores mais próximos a zero, indicando uma maior simetria na altura da superfície em relação à linha média. Os valores de S_{ku} aproximaram-se de três, indicando uma maior normalidade na distribuição das irregularidades, esse comportamento reflete uma redução na presença de picos agudos e vales profundos, características típicas da superfície laminada. A Tabela 5 apresenta os valores de S_a , S_{sk} e S_{ku} para os pontos de medição e condições são exibidos na Figura 37.

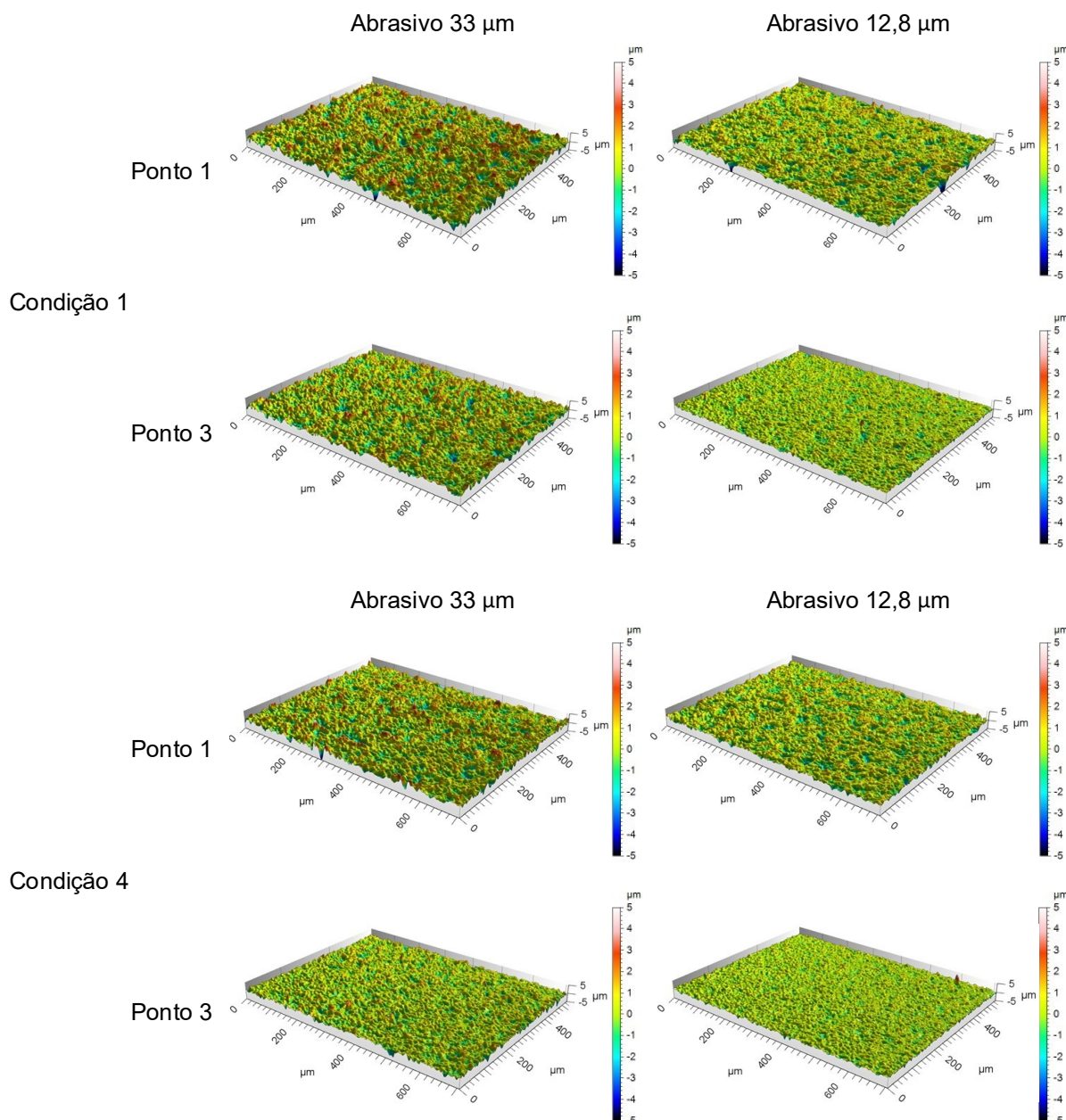


Figura 37 - Projeções axonométricas das condições 1 e 4

Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade das condições 1 e 4

Condição	Ponto	Abrasivo 33 μm			Abrasivo 12,8 μm		
		S _{sk}	S _{ku}	S _a (μm)	S _{sk}	S _{ku}	S _a (μm)
1	1	-0,59	4,36	0,941	-1,80	9,74	0,650
	3	-0,40	4,04	0,736	-0,41	4,59	0,342
4	1	-0,47	4,32	0,763	-0,12	4,33	0,590
	3	-0,44	4,85	0,512	-0,75	5,58	0,308

Ao avaliar as condições 0 e 14, referente aos valores intermediários de pressão e velocidade (9 kPa e 20 RPM) com tempos de lapidação de 30 e 50 minutos respectivamente, observa-se uma menor diferença nos valores de rugosidade média

entre os pontos 1 e 3 após a segunda operação, para ambas as condições. Este resultado destaca-se nas peças lapidadas durante um maior tempo (condição 14), confirmando que há diferenças de altura e irregularidades de forma na peça que fazem com que determinadas regiões só sejam usinadas após um maior período de remoção de material.

Quando comparado apenas o tempo de lapidação, a redução na rugosidade média foi pouco expressiva com o aumento de 20 minutos, com valores de S_a variando de 0,279 μm para 0,263 μm no ponto central da peça, para as condições 0 e 14, respectivamente. Contudo, verificou-se que a redução no tamanho das partículas abrasivas contribui significativamente para a melhoria do acabamento de superfície. Na condição 14, observada no ponto central da peça, o valor de S_a foi reduzido em 64,17%, passando de 0,734 μm para 0,263 μm .

Na amostra lapidada durante o tempo de 30 minutos, condição 0, são observadas algumas irregularidades de maior intensidade, na forma de picos elevados, enquanto na amostra lapidada durante 50 minutos essas irregularidades são menos pronunciadas. Com relação a utilização de diferentes granulometrias de abrasivos em procedimentos sequenciais, é observado que não há grandes alterações na distribuição e forma dos picos e vales conforme o abrasivo para estas condições, mas há reduções significativas nos valores de rugosidade média. A Figura 38 apresenta as projeções após a primeira e a segunda operação, obtidas nos mesmos pontos, para as condições 0 e 14, enquanto a Tabela 6 apresenta os valores de S_a , S_{sk} e S_{ku} para os pontos de medição e condições apresentados na Figura 38.

Nas demais condições são observados comportamentos semelhantes, uma superfície com um maior número de vales e sendo estes agudos, com uma maior uniformidade nos valores de rugosidade média conforme o aumento do tempo de lapidação. Além disso, pontos próximos as bordas operam em uma maior velocidade relativa ao disco de lapidação que pontos próximos ao centro da peça, em função do movimento de rotação em torno do próprio centro da peça, o que resulta em maiores valores de rugosidade média.

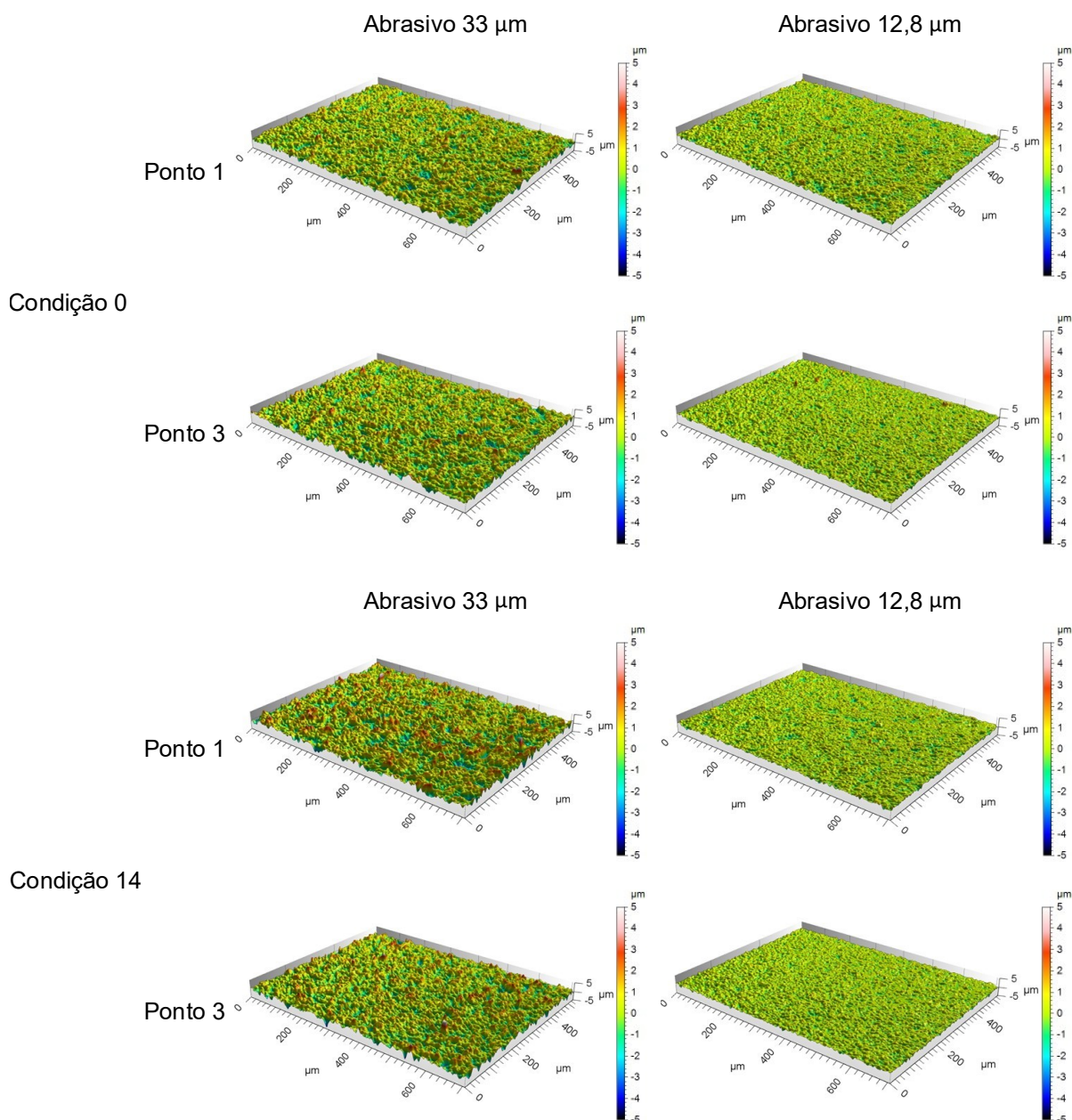


Figura 38 - Projeções axonométricas das condições 0 e 14

Tabela 6 - Parâmetros de rugosidade das condições 0 e 14

Condição	Ponto	Abrasivo 33 μm			Abrasivo 12,8 μm		
		S _{sk}	S _{ku}	S _a (μm)	S _{sk}	S _{ku}	S _a (μm)
0	1	-0,70	4,93	0,595	-0,53	4,78	0,323
	3	-0,34	4,11	0,635	-0,19	5,14	0,279
14	1	-0,44	4,22	0,856	-0,52	4,52	0,297
	3	-0,32	4,44	0,734	-0,33	3,85	0,263

A presença de picos elevados na superfície após a etapa de lapidação com o abrasivo de menor granulometria foi observada em algumas amostras. Estes picos podem ser atribuídos à fadiga do material provocada pela lapidação ou à incrustação

de partículas abrasivas. Tal comportamento foi mais evidenciado nas condições 6 e 7, lapidadas nas condições 25 RPM – 6 kPa – 50 min e 15 RPM – 12 kPa – 50 min, respectivamente. A condição 6 foi caracterizada por uma alta velocidade de rotação do disco combinada com baixa pressão aplicada, deixando mais propensas a formação de picos residuais em função de eventuais vibrações, enquanto a condição 7, caracterizada pela combinação de baixa velocidade de rotação com alta pressão aplicada, resultou em uma maior pressão aplicada pelos abrasivos na superfície por períodos prolongados, favorecendo a retenção localizada de abrasivos e a formação de cristas de materiais plastificados.

Na Figura 39 são apresentadas as projeções axonométricas das amostras lapidadas na condição 7, com valores médios de S_{sk} , S_{ku} e S_a destacados na Tabela 7. Nestes, destaca-se os valores de S_{sk} superiores a um e de S_{ku} acima de três observados no ponto 1 da condição 7, indicando uma predominância de picos agudos na superfície. No entanto, verifica-se que os valores são fortemente associados a defeitos pontuais na superfície, conforme destacado na Figura 39. Esta hipótese também é corroborada pelo fato de que estas irregularidades não impactam de forma significativa nos valores de rugosidade média, parâmetro mais estável e menos sensível a variações localizadas do que o S_{sk} e S_{ku} .

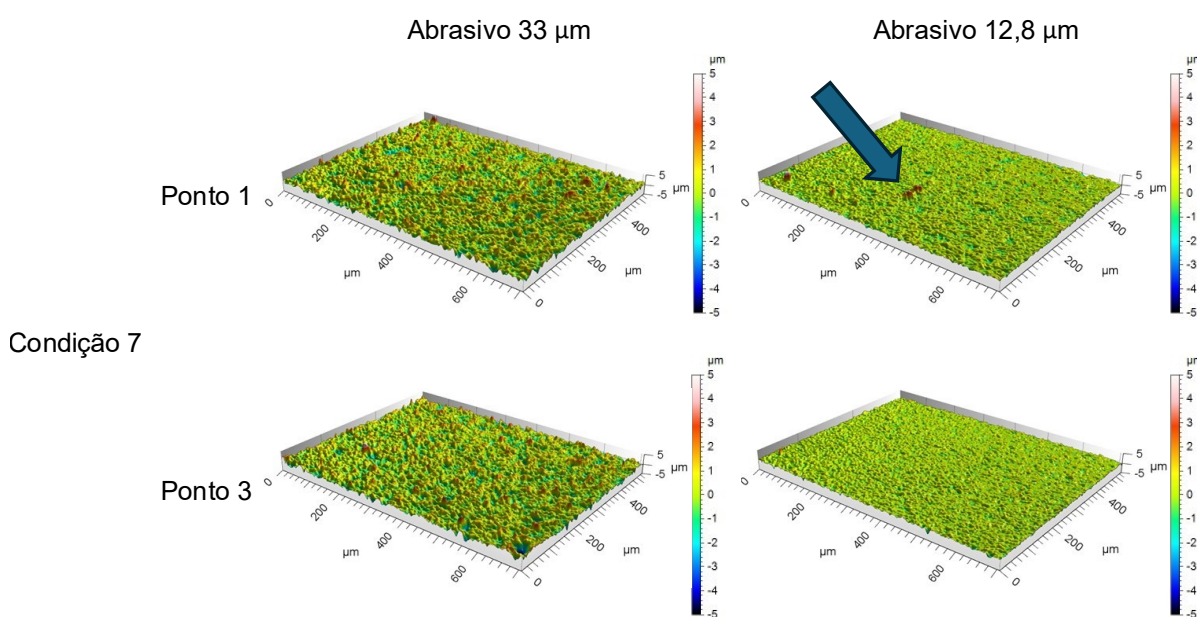


Figura 39 - Projeções axonométricas da condição 7

Tabela 7 - Parâmetros de rugosidade da condição 7

Condição	Ponto	Abrasivo 33 μm			Abrasivo 12,8 μm		
		S_{sk}	S_{ku}	S_a (μm)	S_{sk}	S_{ku}	S_a (μm)
7	1	-0,36	4,69	0,624	1,07	19,87	0,274
	3	-0,41	5,51	0,626	-0,19	4,70	0,231

A presença de picos elevados pontuais na superfície não é deletéria para o posterior processo de união por difusão, uma vez que esses picos estão sujeitos a uma pressão significativamente maior na etapa inicial de aplicação de pressão para a união por difusão, sendo rapidamente conformados. Essa deformação localizada pode, inclusive, favorecer o rompimento da camada de óxido superficial, possibilitando a formação de pontos de contato íntimo entre os materiais, o que contribui para a eficácia da união por difusão.

Observa-se que as operações de lapidação, para ambos os abrasivos, alteram significativamente a distribuição e forma dos picos e vales na superfície, mantendo uma predominância de vales presente na superfície laminada, mas aproximando-se de uma superfície com distribuição simétrica entre vales e picos. Os picos e vales presentes ainda apresentam característica aguda, porém em uma menor intensidade que na superfície apenas laminada. Assim, acredita-se que vales com uma forma menos aguda possam auxiliar no processo de união, favorecendo a formação de vazios menores ao longo da linha de união, os quais devem ser posteriormente fechados por meio das difusões em contorno de grão e volumétrica.

De modo geral, após a lapidação houve a remoção das marcas de laminação, linhas dispostas em uma única direção. O movimento aleatório dos grãos abrasivos durante o processo de lapidação, mesmo guiados pelo disco de lapidação, realizando rotações e deslizamentos sobre a superfície da peça geraram uma superfície sem direcionalidade e com marcas de deformações.

4.1.1.1 PARÂMETROS DE ACABAMENTO DE SUPERFÍCIE

Os parâmetros que avaliam a altura média da superfície, rugosidade média aritmética (S_a) e rugosidade média quadrática (S_q) e os parâmetros de alturas máximas da superfície, profundidade do vale (S_v) e a altura de pico (S_p), são apresentados em forma de diagrama de caixas, como uma forma de quantificar os resultados dos processos de lapidação, com a indicação da mediana e as dispersões dos valores nos quartis. O intervalo interquartil apresenta a dispersão da metade

central dos dados. Foram utilizadas as medições realizadas nas quatro regiões em cada uma das três peças lapidadas simultaneamente.

Os defeitos de forma e ondulação presentes na superfície inicial fazem com as regiões de maior altura sejam preferencialmente usinadas ou conformadas, de modo que apenas após a remoção dessas regiões são usinadas as demais regiões da peça. Este fenômeno faz com que sejam necessários maiores tempos de lapidação, uma vez que condições lapidadas em menores tempos, condições 1, 2, 3, 4 e 13, apresentaram maiores variações nos valores de rugosidade média.

Este resultado pode ser observado na Figura 40, onde são apresentados os valores do parâmetro S_a , para as quinze condições avaliadas em ordem crescente de tempo de lapidação após as operações com os dois abrasivos, bem como o valor medido no material conforme recebido.

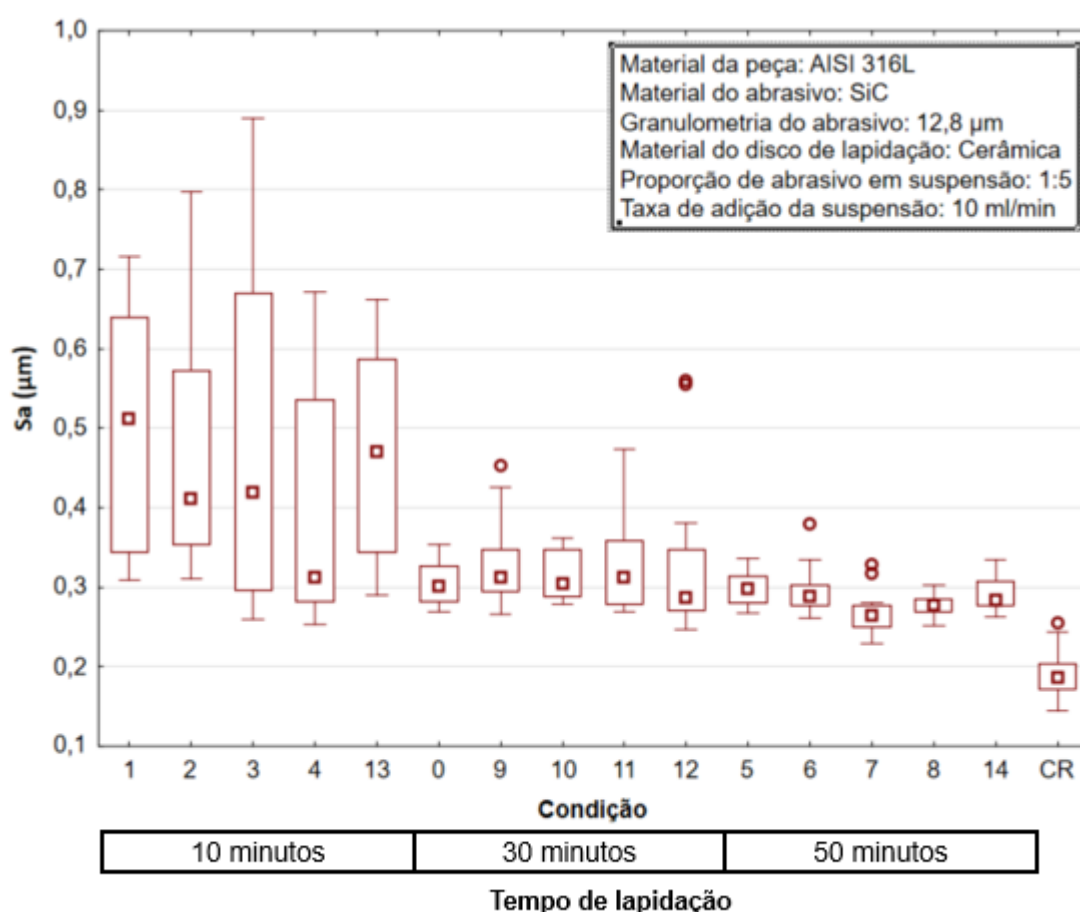


Figura 40 - S_a para as quinze condições avaliadas e conforme recebido

Ao analisar os resultados ordenando as condições por tempo de lapidação, observa-se faixas de dispersão de valores como as condições 1, 2, 3, 4 e 13 que

utilizaram um tempo de 10 minutos e apresentaram uma grande variação nos valores de rugosidade média, tornando essas condições inadequadas, uma vez que um dos objetivos da utilização do processo de lapidação é tornar a superfície mais homogênea. Apesar do baixo valor de mediana observado na condição 4, as cinco condições lapidadas em 10 minutos serão desconsideradas na avaliação dos demais parâmetros de rugosidade, em função da dispersão dos valores entre as regiões avaliadas em uma mesma amostra e entre as amostras.

As condições que utilizaram um tempo de lapidação de 30 minutos, 0, 9, 10, 11 e 12 apresentaram uma melhora na variação dos resultados de S_a em comparação as condições com menores tempos, porém ainda apresentam uma elevada dispersão dos resultados. Para efeito de comparação do impacto do tempo de lapidação entre as diferentes condições, será utilizada posteriormente apenas a condição 0 entre amostras submetidas a 30 minutos de lapidação, visto se tratar do ponto central dos parâmetros avaliados e por apresentar os melhores resultados dentro desta condição de tempo.

Observa-se também que para todas as condições, a superfície apresenta valores de S_a maior que a chapa conforme recebido, isso ocorre em função da granulometria dos abrasivos utilizados não ser fina o suficiente para gerar uma superfície com valores inferiores de rugosidade.

Na Figura 41, são apresentados os valores de S_a após a operação com o primeiro abrasivo (33 μm) e o segundo abrasivo (12,8 μm), para as condições lapidadas durante 50 minutos, as quais apresentaram os melhores resultados na análise inicial de rugosidade média, bem como a amostra conforme recebido e a condição 0 indicando o ponto central. Nesta análise, os resultados foram divididos em duas faixas de rugosidade média, uma para cada granulometria de abrasivo, sendo os maiores valores de rugosidade observados para os abrasivos com maior granulometria (33 μm), que promovem uma maior indentação na superfície, enquanto os abrasivos mais finos removem material em camadas mais superficiais da peça. A Tabela 8 apresenta os valores da mediana de rugosidade média para as condições selecionadas, e o Intervalo interquartil após a segunda operação.

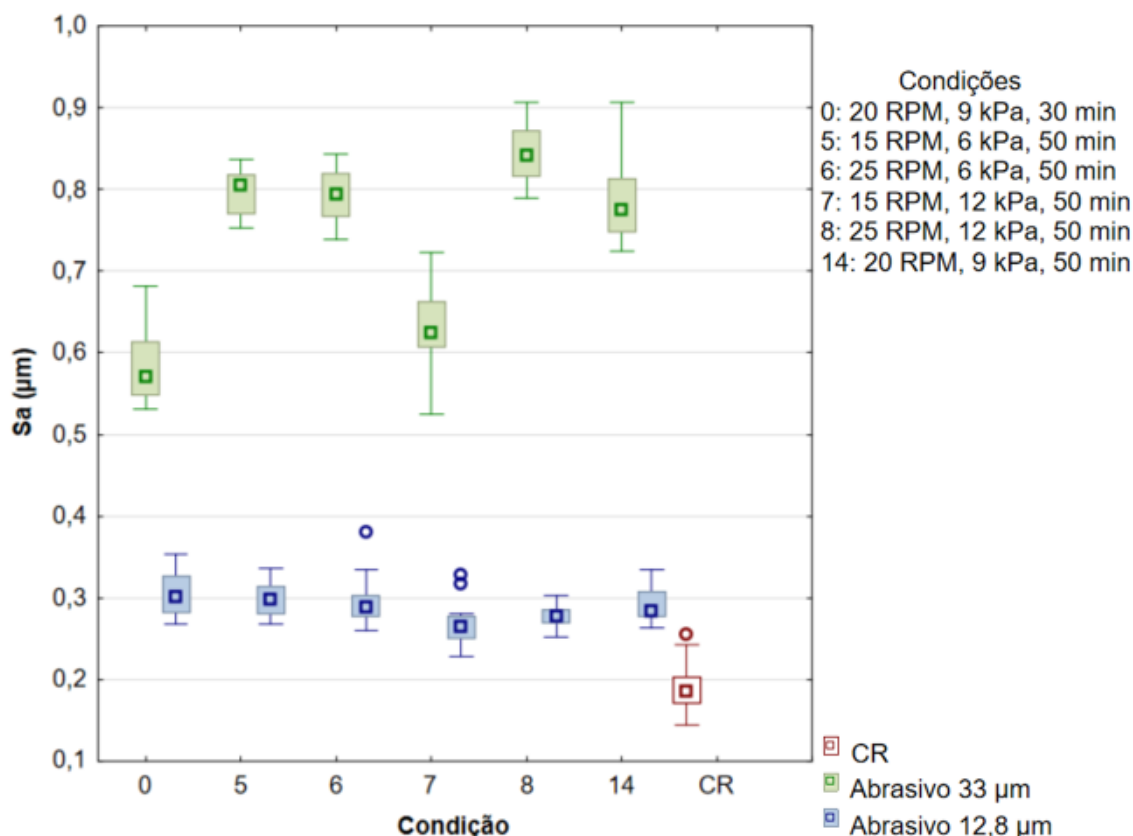


Figura 41 - S_a para as condições selecionadas após cada operação

Tabela 8 - Valores da mediana de S_a para as condições selecionadas

Condição	Abrasivo 33 μm	Abrasivo 12,8 μm		Redução (%)
	Mediana	Mediana	Intervalo interquartil	
0	0,571	0,301	0,042	47,28
5	0,805	0,299	0,033	62,92
6	0,793	0,289	0,021	63,57
7	0,625	0,265	0,024	57,62
8	0,841	0,277	0,015	67,11
14	0,775	0,284	0,025	63,37

As condições 0 e 14 utilizam valores médios de velocidade de rotação do disco e pressão aplicada (20 RPM e 9 kPa) e tempos de 30 e 50 minutos, respectivamente. Após a primeira operação, a condição 14 apresentou valores mais elevados de S_a , o que sugere uma má remoção dos cavacos e abrasivos desgastados na lapidação com os abrasivos maiores, um efeito que não foi observado nas condições com abrasivos mais finos. Ademais, não foram identificadas variações significativas nos valores de S_a entre as duas condições após a aplicação do segundo abrasivo, o que indica que o aumento do tempo total de lapidação na condição 14 não resultou em melhorias que justifiquem o aumento no tempo de lapidação nessas condições.

Avaliando os valores de mediana das populações, a condição 8, que apresentou os maiores valores de S_a após a primeira operação, evidenciou a maior redução percentual e uniformidade dos valores após a segunda operação, com o menor intervalo interquartil. Além disso, ao comparar essa condição com as demais, observa-se uma leve redução nos valores da rugosidade média com o aumento da pressão para 12 kPa. A condição 7 que utilizou o mesmo valor de pressão, associado a uma velocidade de rotação inferior (15 RPM) e consequentemente um processo menos agressivo, apresentou valores levemente inferiores de S_a após a segunda operação. Ademais, essa condição apresentou uma melhor resposta para os abrasivos de 33 μm .

A avaliação do desvio médio quadrático mostra que há um comportamento semelhante ao encontrado no parâmetro S_a , porém como este amplifica as irregularidades encontradas, as condições 6 e 7 que haviam apresentado *outliers* de S_a , e picos elevados nas projeções axonométricas, apresentaram uma maior dispersão dos valores. Outrossim, a condição 0, que foi lapidada por 30 minutos também apresentou maiores valores de intervalo interquartil.

A condição 8 apresentou novamente a maior redução percentual do valor da mediana após a segunda operação, esse resultado indica que a combinação de altos valores de pressão e velocidade de rotação foi eficaz na lapidação de superfícies com condição inicial mais deficiente, promovendo uma melhoria significativa no acabamento de superfície.

A Figura 42 apresenta os resultados de S_q após a operação com o primeiro abrasivo e o segundo abrasivo, para as condições selecionadas, enquanto a Tabela 9 apresenta os valores de mediana de S_q .

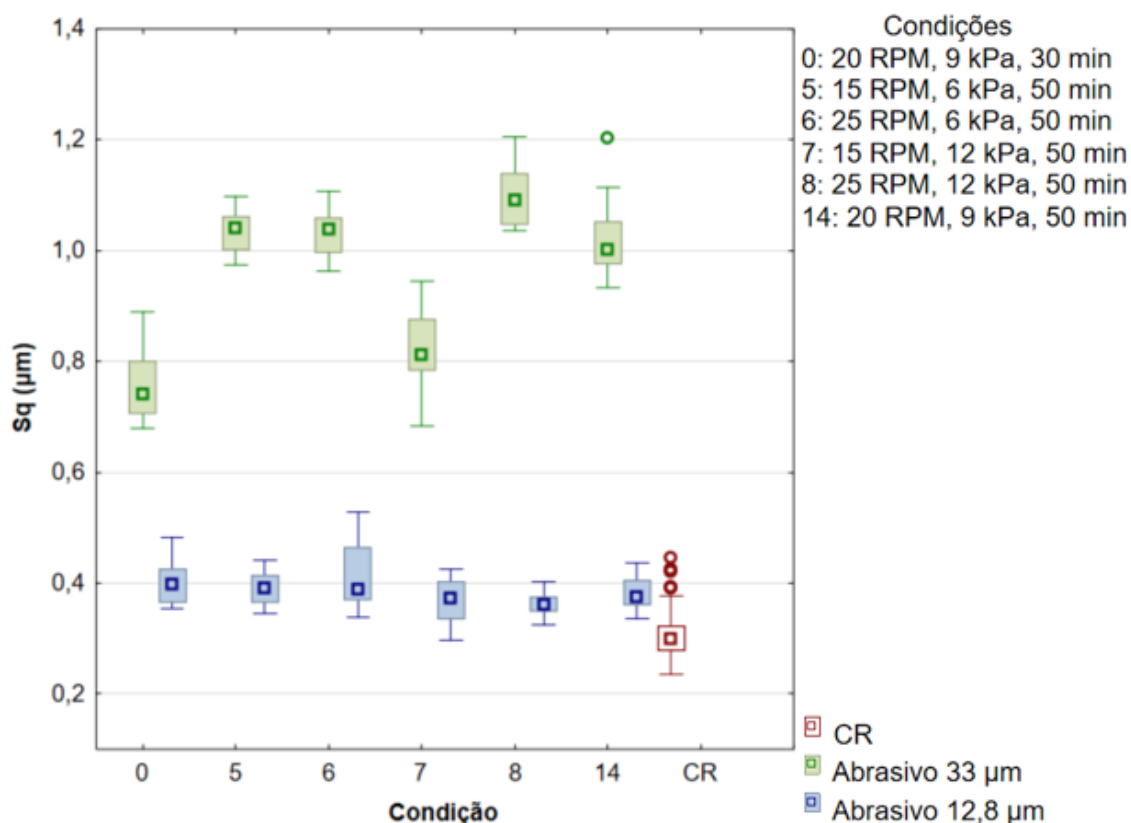


Figura 42 - S_q para as condições selecionadas após cada operação

Tabela 9 - Valores da mediana de S_q para as condições selecionadas

Condição	Abrasivo 33 μm	Abrasivo 12,8 μm		Redução (%)
	Mediana	Mediana	Intervalo interquartil	
0	0,741	0,399	0,054	46,18
5	1,041	0,392	0,042	62,39
6	1,039	0,389	0,078	62,55
7	0,812	0,372	0,050	54,27
8	1,090	0,361	0,024	66,86
14	1,002	0,375	0,034	62,61

Avaliando as condições para os dois parâmetros apresentados anteriormente, é identificado que as condições 7 e 8, as quais utilizaram 12 kPa de pressão aplicada, possuem melhor distribuição de material em torno da linha média da superfície após o processo de lapidação com o abrasivo de 12,8 μm. No entanto, para determinar qual das condições é mais adequada ao processo de união, faz-se necessário avaliar as alturas da superfície.

Sendo assim, a Figura 43 apresenta os valores de S_p para as condições avaliadas, seguido da Tabela 10 que apresenta os valores de mediana de S_p para as mesmas condições. O parâmetro S_p apresenta uma maior sensibilidade a defeitos

localizados na superfície, como a presença de partículas abrasivas encrustadas, cristas formadas por movimentos irregulares de grãos abrasivos e vibrações do sistema durante o processo. Em função dessa sensibilidade, observa-se uma maior dispersão nos valores medidos para esse parâmetro, refletindo variações pontuais na topografia superficial.

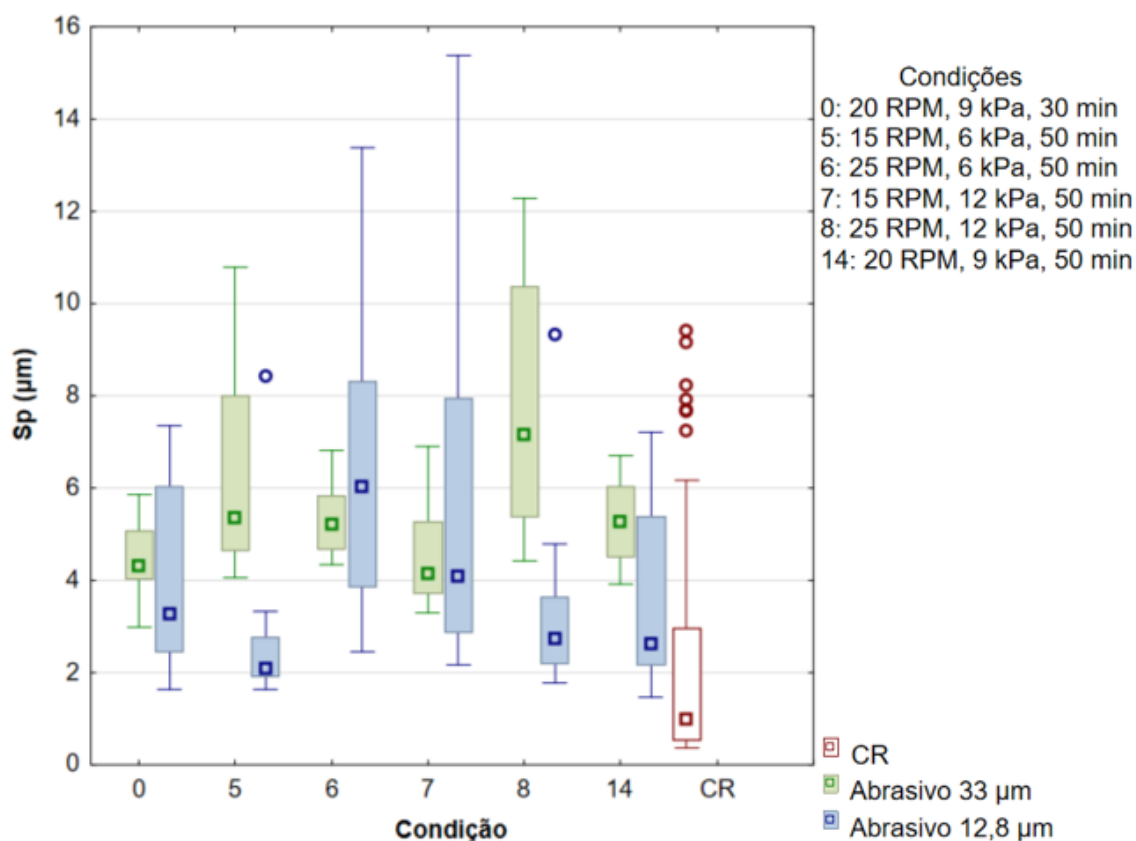


Figura 43 - S_p para as condições selecionadas após cada operação

Tabela 10 - Valores da mediana de S_p para as condições selecionadas

Condição	Abrasivo 33 μm	Abrasivo 12,8 μm		Redução (%)
	Mediana	Mediana	Intervalo interquartil	
0	4,323	3,277	3,252	24,19
5	5,365	2,086	0,754	61,13
6	5,220	6,037	3,448	-15,65
7	4,133	4,095	4,408	0,93
8	7,143	2,731	1,315	61,77
14	5,278	2,623	3,044	50,31

As condições 0 e 14 apresentaram valores similares com relação à altura do maior pico da superfície, indicando que o tempo de lapidação apresenta menor influência no valor da altura máxima de pico que os demais parâmetros de lapidação.

De modo geral, os abrasivos maiores, utilizados na primeira operação geraram uma superfície com picos maiores, indicado pelos valores de mediana. Contudo, as condições 6 e 7 apresentaram maiores picos após a segunda operação, o que pode ser explicado pela presença de picos isolados, conforme apresentado nas projeções axonométricas. Observa-se que condições que utilizaram uma combinação de baixa pressão e alta velocidade e vice-versa, estão mais propensas a gerar picos pontuais em função de eventuais vibrações e formação de cristas de material plastificado.

A utilização de uma relação de pressão aplicada e velocidade de rotação em um mesmo patamar, ambos elevados ou baixos como nas condições 8 e 5 respectivamente, faz com que o sistema opere com menos instabilidades, eventuais vibrações e melhor distribuição dos abrasivos, gerando menores picos para abrasivos mais finos.

A Figura 44 apresenta os resultados do parâmetro S_v . Estes resultados exibem diferentes faixas da profundidade dos vales conforme o tamanho do grão abrasivo. Sendo assim, é possível observar que grãos maiores tem maior inserção na peça de trabalho e assim geram vales mais profundos na superfície. Após a segunda operação, todas as condições apresentam valores de mediana em torno de $3,02 \mu\text{m}$, conforme é apresentado na Tabela 11. Entre as amostras, destaca-se, a condição 7, a qual apresentou valores elevados para a altura dos picos, apresentando os melhores resultados com relação ao tamanho dos vales para ambos os abrasivos, com a menor mediana e intervalo interquartil após a segunda operação. Acredita-se que, na condição 7, embora tenha sido aplicada a maior pressão (12 kPa) — o que favorece a penetração dos abrasivos na superfície —, a baixa velocidade associada (15 RPM) a essa condição promoveu predominantemente a deformação plástica do material em direção aos vales, preenchendo-os em vez de removê-los por arrancamento.

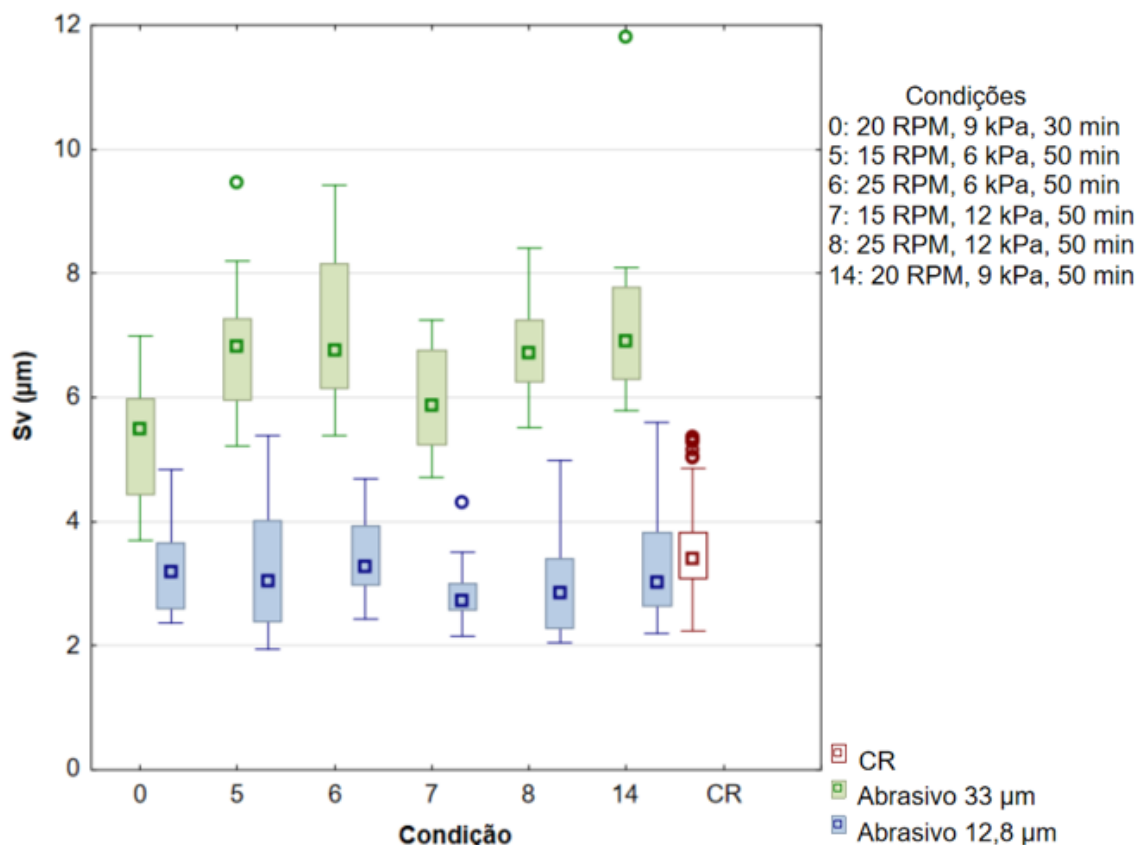


Figura 44 - S_v para as condições selecionadas após cada operação

Tabela 11 - Valores da mediana de S_v para as condições selecionadas

Condição	Abrasivo 33 μm	Abrasivo 12,8 μm		Redução (%)
	Mediana	Mediana	Intervalo interquartil	
0	5,495	3,181	1,029	42,11
5	6,824	3,035	1,392	55,53
6	6,753	3,275	0,758	51,50
7	5,879	2,732	0,428	53,52
8	6,713	2,858	0,928	57,42
14	6,903	3,029	0,913	56,13

Por fim, a condição 0 apresentou bons resultados em um menor tempo, sendo uma condição eficiente, caso seja seguido de mais operações de lapidação. Considerando que esta seja a superfície final para a união por difusão, as condições 7 e 8 apresentaram os melhores resultados, principalmente em relação aos parâmetros S_a e S_q , o que ficou evidenciado na condição 7. Deste modo, a condição 7 (15 RPM, 12 kPa e 50 minutos) foi a selecionada para posterior união por difusão, apresentando ainda as menores profundidades de vales, o que reduz os tamanhos de vazios que devem ser fechados durante os processos difusivos.

4.1.2 TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL

A taxa de remoção de material tem um papel fundamental nos resultados do processo de lapidação, sendo que maiores remoções de material apontam uma maior planicidade da superfície. A taxa de remoção de material medida apresentou variações significativas de acordo com os parâmetros utilizados e com a granulometria do abrasivo. As Tabelas 12 e 13 apresentam a quantidade de material removido em cada amostra e a taxa de remoção média de cada condição para os abrasivos de 33 μm e 12,8 μm , respectivamente.

Tabela 12 - Quantidade e taxa de remoção de material para a lapidação com abrasivos de 33 μm

Condição	Quantidade de material removido (g)			Taxa de remoção de material média (g/min)
	Amostra A	Amostra B	Amostra C	
0	1,8	1,9	1,9	0,062
1	0,7	0,6	0,6	0,063
2	0,6	0,7	0,6	0,063
3	0,7	0,7	0,8	0,073
4	0,9	0,7	0,7	0,077
5	2,3	2,4	2,3	0,047
6	2,6	2,5	2,6	0,051
7	2,6	2,6	2,6	0,052
8	2,6	2,7	2,6	0,053
9	1,9	1,9	1,9	0,063
10	2	2,1	1,9	0,067
11	1,7	1,8	1,6	0,057
12	2	2,1	2,2	0,070
13	0,7	0,7	0,7	0,070
14	2,6	2,5	2,5	0,051

A utilização de um abrasivo de maior granulometria na etapa inicial resultou em um processo mais agressivo, com características típicas de uma operação de desbaste, em que ocorre maior remoção de material. Esse comportamento está associado à maior capacidade de penetração das partículas abrasivas na superfície da peça, decorrente da combinação entre o maior tamanho dos grãos e o aumento da pressão pontual exercida sobre cada partícula. Como abrasivos maiores apresentam menor número de grãos por unidade de área, a força aplicada é distribuída em menos pontos de contato, elevando a pressão local e a eficiência do corte.

Tabela 13 - Quantidade e taxa de remoção de material para a lapidação com abrasivos de 12,8 μm

Condição	Quantidade de material removido (g)			Taxa de remoção de material média (g/min)
	Amostra A	Amostra B	Amostra C	
0	1,4	1,3	1,6	0,048
1	0,4	0,6	0,5	0,050
2	0,5	0,5	0,5	0,050
3	0,6	0,5	0,6	0,057
4	0,5	0,7	0,6	0,060
5	1,7	1,8	1,8	0,035
6	2	2	2	0,040
7	2,1	2,3	2,1	0,043
8	2,3	2,4	2,4	0,047
9	1,2	1	1,3	0,039
10	1,3	1,2	1,4	0,043
11	1,1	1	1,2	0,037
12	1,2	1,5	1,4	0,046
13	0,6	0,6	0,6	0,060
14	2,3	2	2	0,042

O aumento da pressão aplicada também contribuiu para o aumento da taxa de remoção de material, embora de forma menos expressiva do que a variação da granulometria do abrasivo. Para ambos os abrasivos utilizados, a aplicação de pressões mais elevadas e, conseqüentemente de uma maior força normal de contato, favoreceu a penetração das partículas abrasivas na superfície da peça, facilitando o processo de remoção. Por outro lado, a influência da velocidade do disco de lapidação foi pouco significativa em comparação aos demais parâmetros, ficando dentro da incerteza da balança utilizada para as medições.

Embora o aumento do tempo de lapidação resulte na maior quantidade total de material removido, observou-se uma tendência de redução na taxa de remoção ao longo do processo. Esse comportamento ocorre porque, nas etapas iniciais, a remoção é facilitada pela presença de irregularidades mais pronunciadas, que são eliminadas com maior facilidade. Com o tempo, fatores como o desgaste progressivo dos abrasivos, a possível saturação da suspensão de abrasivos com resíduos metálicos e o encruamento da superfície contribuem para a redução da eficiência do processo.

4.2 POLIMENTO E ELETROPOLIMENTO

As amostras lapidadas são visualmente foscas, enquanto as amostras que passaram por um processo posterior de polimento apresentam algumas regiões

espelhadas. As amostras que passaram pelo eletropolimento, após a lapidação, têm uma superfície completamente especular. A Figura 45 apresenta, da esquerda para a direita, amostras de 40 x 40 mm com diferentes acabamentos, sendo lapidada, polida e eletropolida, respectivamente.

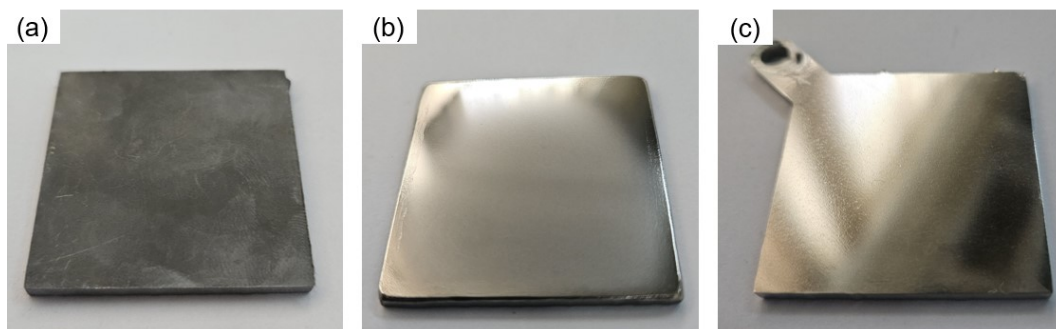


Figura 45 – Amostras com diferentes acabamentos, via lapidação (a), polimento mecânico (b) e eletropolimento (c)

A Figura 46 apresenta as projeções axonométricas para o acabamento de polimento e eletropolimento. Ambas as condições resultaram em superfícies com predominância de picos agudos. O acabamento polido apresenta uma textura semelhante a lapidação, com marcas de deformações e sem direcionalidade. Observa-se também a presença de riscos na projeção da condição polida, ocasionados por possíveis contaminações de partículas maiores no pano de polimento e eventuais limitações operacionais do polimento manual. Já a amostra eletropolida não apresenta uma superfície predominada por marcas de deformação, e sim uma textura suavizada, ocasionada pela remoção de material via eletrólise.

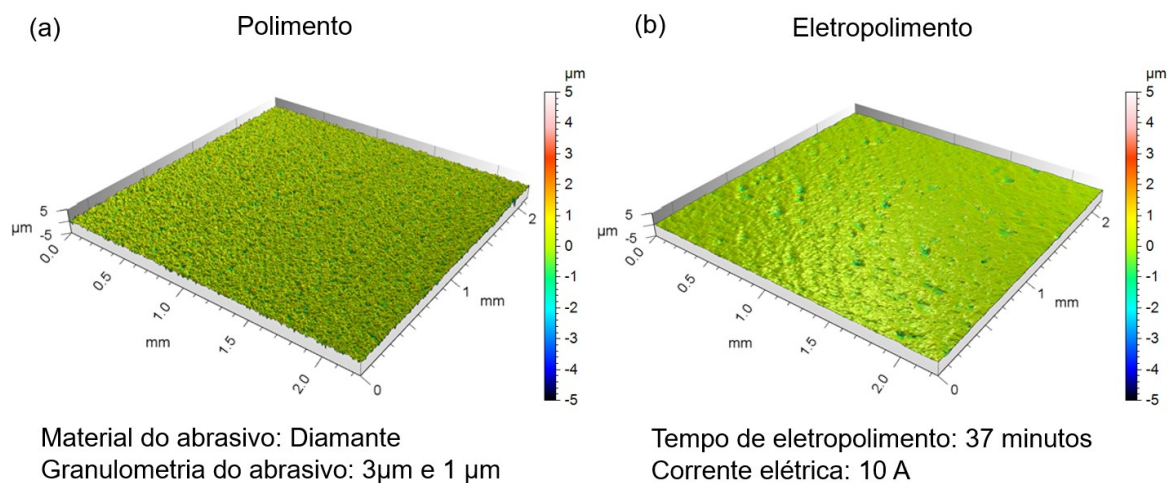


Figura 46 - Projeção axonométrica de amostras com acabamento via polimento (a) e eletropolimento (b)

Os valores dos parâmetros de rugosidade em cada condição diferem significativamente quanto à distribuição das alturas, a Figura 47 apresenta os valores de S_a e S_q para os diferentes acabamentos. Observa-se que o eletropolimento foi efetivo para a redução da rugosidade média de maneira uniforme, enquanto o polimento gerou microarranhões e deformações superficiais não uniformes, resultando em um aumento nos valores de S_a e S_q .

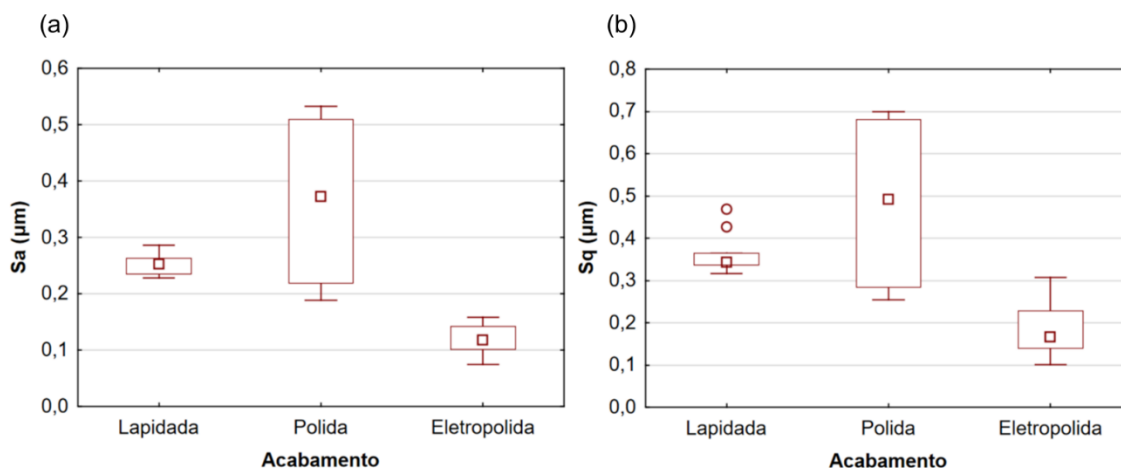


Figura 47 – S_a (a) e S_q (b) para os diferentes acabamentos

Quanto às alturas máximas da superfície, a Figura 48 apresenta os valores de altura máxima dos picos e profundidade máxima dos vales, S_p e S_v respectivamente. Apesar de realizar uma remoção preferencial nos picos da superfície, o eletropolimento ainda apresenta picos residuais do processo de lapidação. Porém essa remoção de material, desloca a linha média da superfície, resultando em uma menor distância entre o fundo do vale e a linha média. O mecanismo de abrasão do polimento mostrou-se efetivo na remoção dos picos da superfície, entretanto, o mesmo resultou em vales mais profundos, ocasionados por microarranhões de partículas abrasivas.

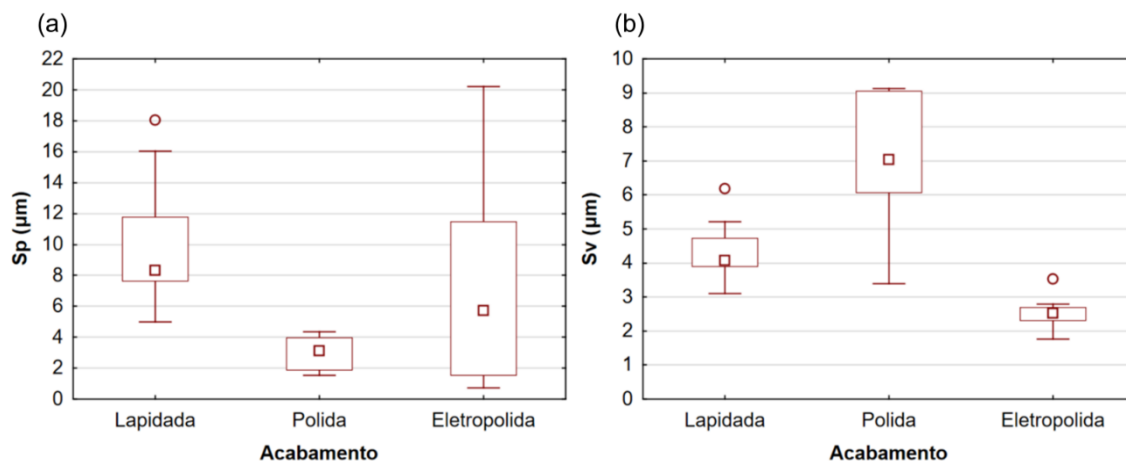


Figura 48 - S_p (a) e S_v (b) para os diferentes acabamentos

Ao comparar os processos de polimento mecânico e eletropolimento, observa-se que o eletropolimento promove uma remoção preferencial dos picos da superfície, sendo mais eficaz na redução da rugosidade média (S_a) e, consequentemente, na diminuição da distância entre os vales e a linha média da topografia. No entanto, essa técnica não é suficientemente efetiva na eliminação dos picos mais acentuados formados durante a lapidação. Por outro lado, o polimento mecânico apresenta limitações associadas à variabilidade do fator humano, especialmente no controle da pressão aplicada e da execução dos movimentos com a peça. Como consequência, verificou-se um aumento nos valores de rugosidade média e na profundidade dos vales. Apesar disso, o processo foi eficiente na remoção dos picos agudos remanescentes da lapidação.

4.3 UNIÃO POR DIFUSÃO

Para determinar a qualidade e características da união por difusão em cada condição, foram analisadas as microestruturas na região da interface de união. Essa análise permite identificar a presença de descontinuidades, zonas de difusão, possíveis falhas ou defeitos, além de fornecer informações sobre a efetividade do processo de união. A união por difusão das três condições de acabamento de superfície foi realizada a uma temperatura de 1080 °C, durante 6 horas, com pressão aplicada de 12 MPa. A Figura 49 apresenta as microestruturas na interface de união, após o processo de união por difusão com dois diferentes aumentos, 100x e 200x, para a condição lapidada.

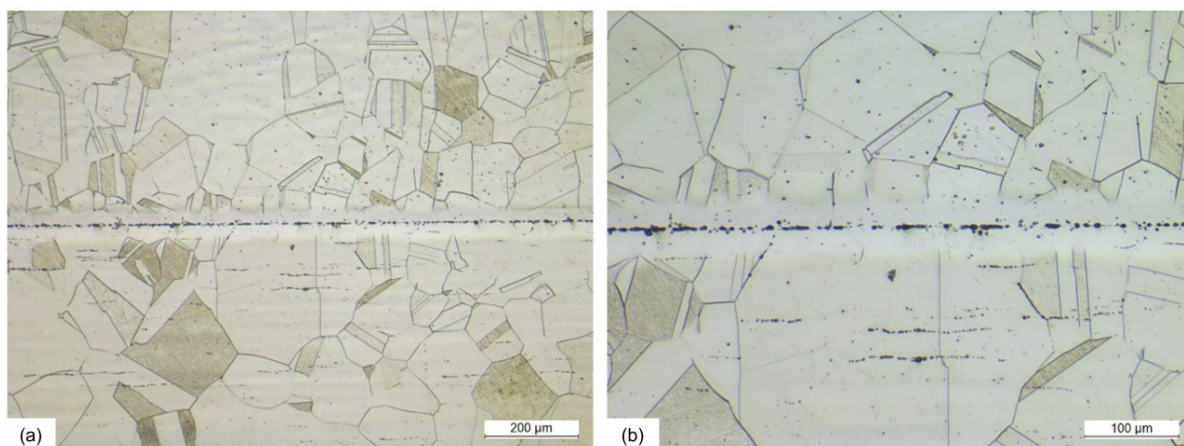


Figura 49 - Microestruturas da amostra lapidada após união por difusão. (a) aumento de 100X. (b) aumento de 200X

Observa-se a presença de defeitos ao longo da linha de união, não havendo um preenchimento total dos vazios durante as etapas de difusão. Os vazios verificados são de maneira geral pontuais, com formato circular e espalhados, os quais são menos prejudiciais ao comportamento mecânico da peça após a união. Foram também identificados vazios contínuos e alongados na região da interface, os quais são considerados críticos para o comportamento da peça unida. Esses defeitos atuam como concentradores de tensão, favorecendo a nucleação e propagação de trincas sob solicitação mecânica, além de reduzirem significativamente a área efetiva de contato, comprometendo o percentual de união entre as superfícies. As causas desses vazios são associadas à presença de partículas abrasivas incrustadas de SiC, bem como aos valores de rugosidade das peças lapidadas, os quais podem ser considerados elevados para o processo de união por difusão.

A partir da análise das imagens, observa-se a presença de uma região ao redor da linha de união na qual os contornos de grão não são visíveis, mesmo após o ataque químico. Essa ausência de revelação microestrutural impede a identificação clara da migração ou continuidade dos grãos através da interface de união. Para verificar se há alterações da composição química da região ao redor da interface de união, foram avaliadas 5 seções horizontais da amostra lapidada. A Figura 50 apresenta uma imagem obtida por MEV da amostra lapidada, com aumento de 2000X, com indicações das seções analisadas no EDS, cujas composições químicas são apresentadas na Tabela 14.

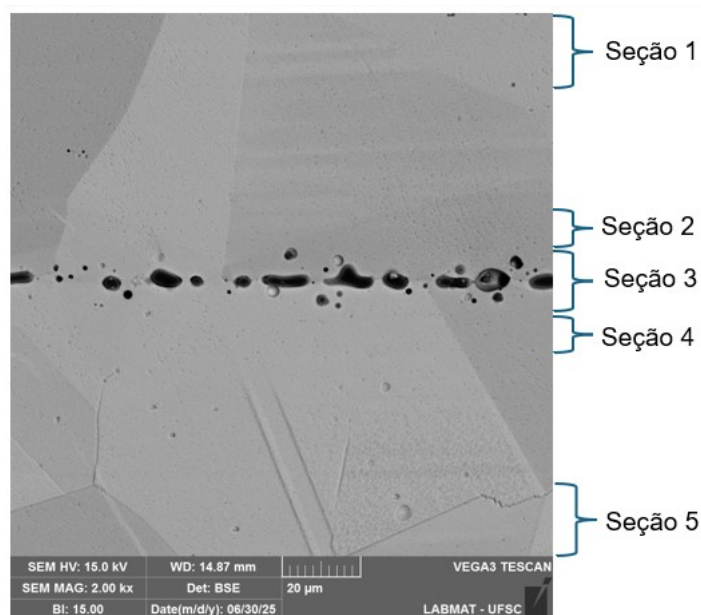


Figura 50 - Imagem obtida por MEV da amostra lapidada, com aumento de 2000X

Na figura anterior, observam-se pequenas variações na composição química nas seções 2 e 4, em comparação ao material de base (seções 1 e 5), destacando-se apenas um leve aumento na concentração de silício, ainda dentro dos limites especificados para o material. Já na linha de união, seção 3, verifica-se um aumento significativo na quantidade de Silício. Esse aumento mais pronunciado na interface de união, e menos evidente nas regiões de material de base, é atribuído à presença de partículas abrasivas de carbeto de silício (SiC) que ficaram encrustadas na superfície durante o processo de lapidação. Em relação à presença de Oxigênio, esta está associada aos óxidos previamente existentes na superfície das amostras, os quais, embora tenham sido deslocados durante o processo de união por difusão, permaneceram retidos na interface.

Acredita-se que este fenômeno, em que os grãos não estão visíveis mesmo com o ataque químico, ocorra em consequência do trabalho mecânico a frio da lapidação, o qual pode ter gerado um alto nível de encruamento da superfície que não foi completamente eliminado após a união por difusão.

Quando avaliada a condição polida, também é observada uma região em torno da linha de união em que os contornos de grão não estão visíveis. Ademais, observam-se vazios semelhantes aos presentes na condição lapidada, entretanto, verifica-se uma redução aparente na quantidade e proximidade destes vazios, indicando um aumento na qualidade da união nessa região. Outro aspecto interessante, é a presença de um vazio com maior altura, como consequência da

presença de vales profundos no acabamento do processo de polimento. A Figura 51 apresenta as microestruturas na interface de união, após o processo de união por difusão com dois diferentes aumentos, 100x e 200x, para a condição polida.

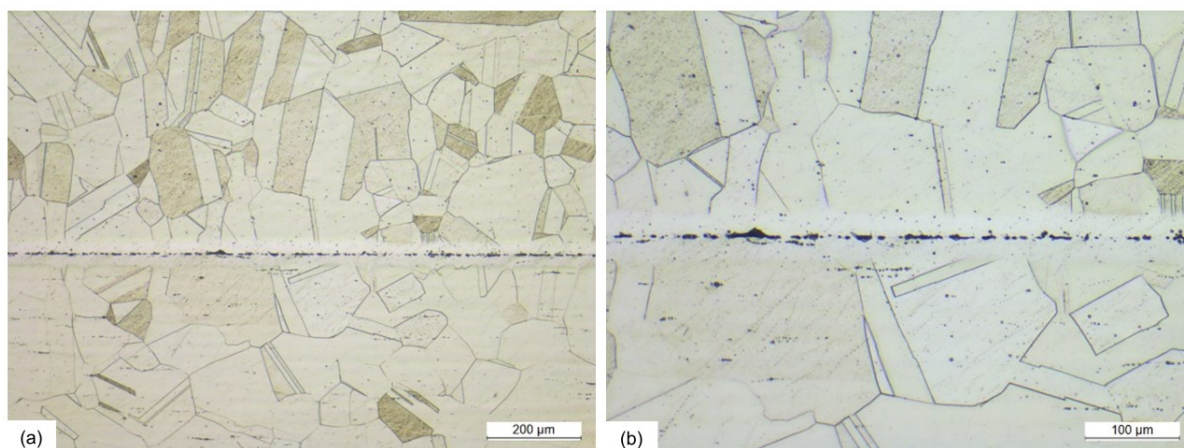


Figura 51 - Microestruturas da amostra polida após união por difusão. (a) aumento de 100X. (b) aumento de 200X.

A superfície polida apresentou uma grande dispersão dos valores de rugosidade média e isso resulta em diferentes características ao longo da linha de união. Diferentemente da região anterior, que provavelmente havia valores inferiores de rugosidade, a região ilustrada na Figura 52 apresentou uma linha de união com vazios longos e contínuos, representando uma piora na união ocasionada pelo processo de polimento nessa região.

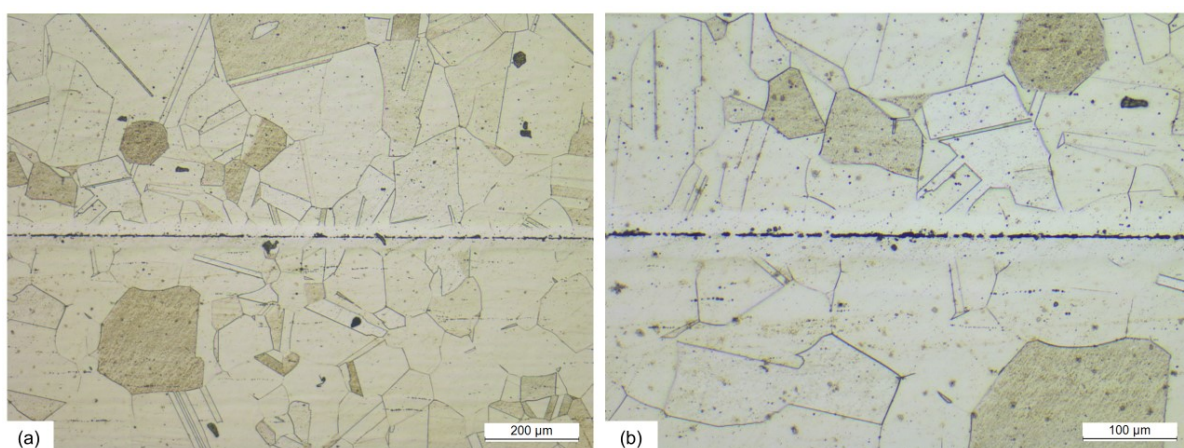


Figura 52 - Microestruturas da amostra polida após união por difusão, em uma segunda região. (a) aumento de 100X. (b) aumento de 200X.

Na amostra unida após o eletropolimento, apresentada na Figura 53, é possível identificar uma melhora na união em comparação às outras duas condições,

com uma redução dos vazios e migração dos grãos através da linha de união. A migração dos grãos através da linha de união indica que ocorreu a difusão atômica ao longo da linha de união e esta deixou de ser uma descontinuidade da estrutura, melhorando as propriedades mecânicas da união e mantendo as propriedades do material de base.

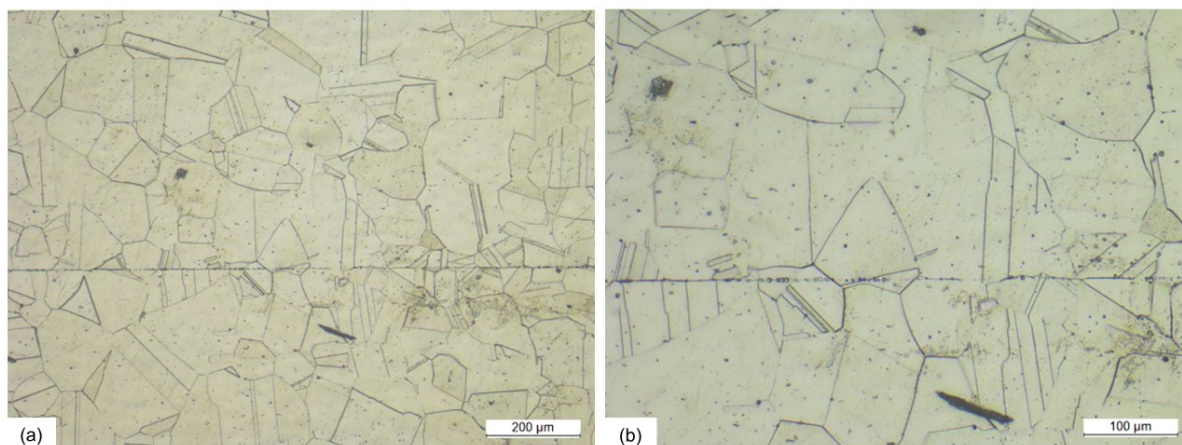


Figura 53 - Microestruturas da amostra eletropolida após união por difusão. (a) aumento de 100X. (b) aumento de 200X.

Ao comparar as condições polida e eletropolida com a condição apenas lapidada, observa-se uma melhora da qualidade da união conforme o acabamento de superfície é melhorado, ou seja, reduzindo a rugosidade média das partes a serem unidas. O polimento promoveu uma melhoria discreta na redução dos vazios em algumas regiões, porém o aumento da rugosidade média em outras regiões proporcionou uma piora significativa na qualidade da união. Enquanto o eletropolimento resultou em uma melhora mais significativa, com diminuição expressiva dos vazios e favorecimento da migração dos grãos através da linha de união.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

O processo de lapidação alterou a textura da superfície das chapas, apresentando uma superfície sem direcionalidade e com marcas de deformações. Os valores de S_{sk} e S_{ku} indicam que as superfícies apresentaram predominância de vales, mas aproximaram-se de uma superfície com distribuição simétrica entre vales e picos. Os picos e vales presentes apresentam característica aguda, porém a intensidade desta foi reduzida com o processo de lapidação.

O tamanho dos abrasivos utilizados tem grande influência sobre os valores de rugosidade e taxa de remoção de material, sendo que a utilização de abrasivos com $33\text{ }\mu\text{m}$ aumentaram significativamente a taxa de remoção de material com o aumento da profundidade de indentação dos abrasivos na superfície. A utilização de abrasivos com $12,8\text{ }\mu\text{m}$ proporcionou menores valores de rugosidade média por remover camadas mais superficiais das amostras, sendo evitados riscos profundos nas superfícies lapidas.

O aumento do tempo de lapidação, apresentou uma melhora significativa no acabamento de superfície, principalmente na homogeneidade da rugosidade em diferentes regiões da superfície. O aumento deste parâmetro resultou ainda em uma redução gradativa da taxa de remoção de material.

A relação entre pressão e velocidade aplicada influenciaram diretamente, não apenas na rugosidade média da superfície gerada, mas nas alturas máximas de picos e vales. A melhor condição definida foi a condição 7 que utilizou 15 RPM de velocidade de rotação do disco de lapidação, 12 kPa de pressão aplicada e 50 minutos de tempo de lapidação, resultando no menor valor de mediana de S_a entre as condições ($0,265\text{ }\mu\text{m}$) e em vales menos profundos, com uma mediana de S_v de $2,732\text{ }\mu\text{m}$.

O processo de polimento foi eficiente na remoção dos picos presentes na superfície após o processo de lapidação, mas apresentou um aumento na rugosidade média, como consequência das limitações operacionais do processo de polimento manual, enquanto o eletropolimento reduziu significativamente os valores de rugosidade média da peça e profundidade dos vales.

A união por difusão de chapas lapidadas resultou em uma linha de união contendo uma maior quantidade de vazios de maior tamanho, os quais devem ser evitados, estando associados a redução das propriedades mecânicas da união. O

processo de polimento após a lapidação apresentou variações na aparência da linha de união, com regiões com melhorias discretas e regiões com vazios contínuos e longos, resultado de um acabamento não uniforme da superfície. Com a união das chapas eletropolidas, observou-se uma redução significativa do tamanho dos vazios, bem como a migração dos grãos através da linha de união, indicando uma união considerada bem-sucedida. Estes resultados estão de acordo com os valores observados de rugosidade média associada a cada um dos processos, indicando que a adequação do acabamento de superfície é fator primordial para a formação de uniões reprodutíveis e de qualidade.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros sugere-se:

- Adicionar mais uma etapa de lapidação, com abrasivos menores para obter menores níveis de rugosidade;
- Avaliar as tensões residuais compressivas geradas pela lapidação;
- Avaliar os efeitos de diferentes estados de tensões residuais na união por difusão;
- Realizar o processo de polimento automatizado, reduzindo o fator operador;
- Realizar estudos na região em que os contornos de grãos não foram atacados nas condições lapidadas e polidas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGBARAJI, Casmir I. Surface characterization and tribology in flat lapping of metals. The University of Oklahoma, 2008.

AMARAL, Maria Cristina. Influência do eletropolimento na união por difusão de chapas em aço inoxidável 316L. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "ASTM A240: Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications", ASTM International, v. I, p. 12, 2004. DOI: 10.1520/A0240.

ABOUELATA, Ahmed M. Awad; ATTIA, Adel; YOUSSEF, Gehan I. Electrochemical polishing versus mechanical polishing of AISI 304: surface and electrochemical study. Journal of Solid State Electrochemistry, v. 26, n. 1, p. 121-129, 2022.

BARYLSKI, Adam; PIOTROWSKI, Norbert. Non-conventional approach in single-sided lapping process: kinematic analysis and parameters optimization. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 100, p. 589-598, 2019.

BERI, Tufa Habtamu *et al.* Effect of rotational speed ratio between platen and work piece on lapping processes. Machining Science and Technology, v. 24, n. 6, p. 1000-1015, 2020.

BROWN, C. A. Introduction to Surface Roughness Measurement. Worcester: Olympus Corporation, 2017.

BULSARA, Vispi H. *et al.* Polishing and lapping temperatures. 1997.

CAI, G. Q. *et al.* Analysis on lapping and polishing pressure distribution. CIRP Annals, v. 47, n. 1, p. 235-238, 1998.

CALDAS, Lucas de Andrade. Influência do processo de corte via jato d'água abrasivo na qualidade de chapas de aço AISI 316L com canais unidas por difusão em estado sólido. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

CHANDRASEKAR, S.; SHAW, M. C.; BHUSHAN, B. Comparison of grinding and lapping of ferrites and metals. 1987.

CHEN, Jiapeng *et al.* In-situ manifestation of lapping mechanisms by rapid intelligent pattern recognition analysis (RIPRA) of acoustic emission via a point density fuzzy C-means (PD-FCM) method. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 79, p. 924-933, 2022.

CHEN, Zhenzhen *et al.* Surface quality improvement by using a novel driving system design in single-side planetary abrasive lapping. *Materials*, v. 14, n. 7, p. 1691, 2021.

COLOMBO, Diego *et al.* Electropolishing of AISI 316L: effect on surface characteristics and corrosion behavior. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 130, n. 9, p. 4207-4219, 2024.

DE PAYREBRUNE, Kristin M. Relation of kinematics and contact forces in three-body systems with a limited number of particles. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, v. 20, n. 1, p. 095-108, 2022.

DEACONESCU, Andrea; DEACONESCU, Tudor. Improving the quality of surfaces finished by lapping by robust parameter design. *Journal of Economics, Business and Management*, v. 2, n. 1, p. 1-4, 2014.

DESHPANDE, Lalit Suhas *et al.* Observations in the flat lapping of stainless steel and bronze. *Wear*, v. 265, n. 1-2, p. 105-116, 2008.

DIN. DIN 8589: Fertigungsverfahren – Abtragen – Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag, 2003.

DOI, Toshiro K.; KASAI, Toshio; TONSHOFF, Hans K. Lapping and polishing. In: *Handbook of Ceramic Grinding & Polishing*. William Andrew Publishing, 1999. p. 354-442.

EVANS, Chris J. *et al.* Material removal mechanisms in lapping and polishing. *CIRP annals*, v. 52, n. 2, p. 611-633, 2003.

FARAHNAKIAN, Masoud; SHAHRAJABIAN, H. Experimental study on surface roughness and flatness in lapping of AISI 52100 steel. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, v. 9, n. 2, p. 61-68, 2016.

GAFAROV, A. M.; SHARIFOV, Z. Z.; GAFAROV, V. A. Residual Stress in the Surface Layer after Asymmetric Lapping. *Russian Engineering Research*, v. 39, p. 659-664, 2019.

GASHEV, E. A.; MURATOV, K. R.; ABLYAZ, T. R. Loading Devices for Plane Lapping. *Russian Engineering Research*, v. 42, n. 8, p. 844-846, 2022.

GIETZELT, Thomas; TOTH, Volker; HUELL, Andreas. Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and. Joining Technologies, p. 195, 2016.

GUO, Zhaozhi *et al.* Experimental study on mechanical polishing of 316L stainless steel with a novel active pressure correction method. Materials Today Communications, v. 42, p. 111299, 2025.

HAN, Wei; FANG, Fengzhou. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 139, p. 1-23, 2019.

HASHIMOTO, Fukuo *et al.* Abrasive fine-finishing technology. CIRP annals, v. 65, n. 2, p. 597-620, 2016.

HESSELGREAVES, John E.; LAW, Richard; REAY, David. Compact heat exchangers: selection, design and operation. Butterworth-Heinemann, 2016.

JIANDONG, Yang *et al.* A new method of controlling lapping speed in high speed lapping machine. In: 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. IEEE, 2010. p. 97-100.

JIANG, Liang *et al.* Chemical mechanical polishing of stainless steel as solar cell substrate. ECS Journal of Solid State Science and Technology, v. 4, n. 5, p. P162, 2015.

KHANOV, Almaz Mullayanovich *et al.* Precision machining of mechanical seals on the machine" rastr 220". Modern Applied Science, v. 9, n. 6, p. 278, 2015.

KLOCKE, Fritz. Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping. 1. ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. xxiv, 433 p. DOI: 10.1007/978-3-540-92259-9.

LE, Xiaobin; PETERSON, M. L. Material removal rate in flat lapping. Journal of Manufacturing Processes, v. 1, n. 1, p. 71-78, 1999.

LEACH, R. Characterisation of areal surface texture. Berlin, Germany: Springer, 2013.

LEE, E.-S. Machining characteristics of the electropolishing of stainless steel (STS316L). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 16, p. 591-599, 2000.

LI, Qi *et al.* Compact heat exchangers: A review and future applications for a new generation of high temperature solar receivers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 9, p. 4855-4875, 2011.

MAHONEY, Murray W.; BAMPTON, Cliff C. Fundamentals of diffusion bonding. In: Welding, Brazing, and Soldering. ASM International, 1993. p. 156-159.

MARINESCU, Ioan D. *et al.* Tribology of abrasive machining processes. Elsevier, 2004.

MARINESCU, Ioan D.; UHLMANN, Eckart; DOI, Toshiro K. Handbook of Lapping and Polishing. New York: Taylor & Francis/CRC Press, 2006. 512 p. DOI: 10.1201/9781420017632.

MOHAN, S. *et al.* Electropolishing of stainless steel—a review. Transactions of the IMF, v. 79, n. 4, p. 140-142, 2001.

MOLEND, Justyna; BARYLSKI, Adam. Determining the conditions for temperature measurements during flat lapping. Journal of KONES, v. 18, p. 293-297, 2011.

MOLEND, Justyna; CHARCHALIS, Adam. Dependence between workpiece material hardness and face lapping results of steel C45. Solid State Phenomena, v. 220, p. 743-748, 2015.

MOLEND, Justyna; CHARCHALIS, Adam. Influence of lapping plate temperature on roughness parameters of specimens. Journal of KONES, v. 24, 2017.

MOLEND, Justyna; CHARCHALIS, Adam. Steel C45 elements lapping. Journal of KONES, v. 21, n. 1, p. 169-174, 2014.

MURATOV, K. R. *et al.* Influence of abrasive on the productivity and surface roughness in lapping. Russian Engineering Research, v. 42, n. 8, p. 832-834, 2022.

MURATOV, K. R. *et al.* Software for simulating the surface wear of tools. Russian Engineering Research, v. 39, p. 869-871, 2019.

MURATOV, K. R.; GASHEV, E. A. Lapping machine with a cycloid tool trajectory. Russian Engineering Research, v. 36, p. 681-683, 2016.

MURATOV, K. R.; GASHEV, E. A.; LAGUNOV, D. M. Influence of clamping force on the machined surface in abrasive finishing. Russian Engineering Research, v. 37, p. 258-261, 2017.

PARATE, Pravin R.; RAVINDRA, B. Yarasu. Conditioning parameters for maintaining plate flatness prior to lapping. Int. J. Mech. Eng. Rob. Res, v. 3, p. 12-19, 2014.

PIOTROWSKI, Norbert. Tool wear prediction in single-sided lapping process. Machines, v. 8, n. 4, p. 59, 2020.

SARANAM, Venkata Rajesh *et al.* Surface topographical effects in the diffusion bonding of 316 stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 296, p. 117173, 2021.

SEKULIC, Dusan P.; SHAH, Ramesh K. *Fundamentals of heat exchanger design*. John Wiley & Sons, 2023.

SHIBATA, Toshiharu *et al.* Profile analysis of surfaces lapped with diamond particles of several shapes. *Wear*, v. 254, n. 7-8, p. 742-748, 2003.

SHIRZADI, A. A.; ASSADI, H.; WALLACH, E. R. Interface evolution and bond strength when diffusion bonding materials with stable oxide films. *Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films*, v. 31, n. 7, p. 609-618, 2001.

SINGPOMMAT, Dusit; THERMSUK, Somkiat; INKAMPA, Unchalee. Influence parameters the surface roughness of JIS 440 stainless steel on lapping process. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, p. 747-754, 2020.

SORNSUPHAP, Danai; THERMSUK, Somkiat; KALCHUK, Chanathip. Influence of the Surface Quality of Stainless Steel JIS 420 on Lapping Process. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, v. 12, n. 10, p. 31–39, 2021.

SUWATTHIKUL, J. *et al.* Experimental Investigation into Vibration Characteristics for Damage Minimization in a Lapping Process. *Shock and Vibration*, v. 2016, n. 1, p. 4836516, 2016.

THAMMASANG, Suwit *et al.* Comparison of Alumina Powder Behavior on Surface Roughness using the Surface Lapping Technique for JIS 420 and JIS 440 Stainless Steel Materials. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 14, n. 5, p. 16229-16236, 2024.

WEI, Yanni *et al.* Study on the Influence of Surface Roughness and Temperature on the Interface Void Closure and Microstructure Evolution of Stainless Steel Diffusion Bonding Joints. *Metals*, v. 14, n. 7, p. 812, 2024.

YANG, G. *et al.* Electropolishing of surfaces: theory and applications. *Surface Engineering*, v. 33, n. 2, p. 149-166, 2017.

YANG, Yue *et al.* A curious observation of phenomena occurring during lapping/polishing processes. *Proceedings of the Royal Society A*, v. 475, n. 2230, p. 20190304, 2019.

YU, Ninghui; LI, Lihua; KEE, Chea-su. Modeling and Simulation of the Surface Generation Mechanism of a Novel Low-Pressure Lapping Technology. *Micromachines*, v. 12, n. 12, p. 1510, 2021.