



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

LUCAS DE ANDRADE CALDAS

**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**

FLORIANÓPOLIS

2022

LUCAS DE ANDRADE CALDAS

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

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof.^a Marcia Barbosa Henriques
Mantelli, Dr.^a Eng.

Coorientador: Prof. Fábio Antonio Xavier, Dr.
Eng.

FLORIANÓPOLIS

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Caldas, Lucas

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 / Lucas Caldas ; orientadora, Marcia Barbosa Henriques Mantelli, coorientador, Fábio Antonio Xavier, 2022.

126 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. soldagem por difusão. 3. superfície. 4. permutador de calor. 5. usinagem. I. Barbosa Henriques Mantelli, Marcia. II. Antonio Xavier, Fábio. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV. Título.

Lucas de Andrade Caldas

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

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por
banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Antonio Eduardo Martinelli, Dr.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. João Batista Rodrigues Neto, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Materiais.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof.(a) Marcia Barbosa Henriques Mantelli, Dr.(a)

Orientador(a)

Florianópolis, 1 de setembro de 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica, em especial aos professores do curso de graduação e pós-graduação em Engenharia de Materiais, por seu comprometimento com a formação de profissionais preparados e motivados a enfrentar os desafios da vida.

À orientadora, Prof. Marcia Barbosa Henriques Mantelli, pela oportunidade e confiança depositada, bem como por todas as conversas e sugestões, compartilhando experiências e ideias as quais foram essenciais no desenvolvimento deste trabalho.

Ao coorientador, Prof. Fábio Antonio Xavier, por sempre se fazer presente participando ativamente das discussões de cada etapa da construção deste trabalho, seus conselhos, tanto profissionais quanto pessoais, enriqueceram e auxiliaram enormemente durante esta jornada.

A Camilla, minha namorada, por todo apoio, carinho e compreensão durante esta jornada, bem como por ser um exemplo de pesquisadora e me motivar sempre a melhorar.

A todos meus colegas do Laboratório de Tubos de Calor, em especial para a Bianca, Iara, Maria Cristina, Gustavo, Jackson e Gian por todo o companheirismo e auxílio nas atividades e discussões de resultados, bem como pelos momentos de descontração e amizade.

Aos parceiros, Petrobras, Laboratório de Materiais (LABMAT), Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), Fundação CERTI e demais, que em virtude da sua colaboração permitem o desenvolvimento de tecnologia de ponta no Brasil.

Ao Leandro, técnico no Laboratório de Tubos de Calor, seu comprometimento, capacidade técnica e criatividade o tornam um profissional exemplar, mas seu carisma, alegria e carinho são o que o tornam uma pessoa exemplar.

À minha família, por tornar este sonho possível através de todo amor, apoio e confiança que sempre me deram.

“An experiment is a question which science poses to Nature, and a measurement is the recording of Nature’s answer.”

(Max Karl Ernst Ludwig Planck)

RESUMO

Em virtude dos desafios associados à exploração de petróleo em plataformas *offshore*, como espaço reduzido, elevada distância da costa e os altos custos de operação e manutenção, o uso de dispositivos de alta eficiência, confiabilidade e volume reduzido é essencial. Neste contexto, os trocadores de calor compactos (*compact heat exchangers – CHEs*) destacam-se por apresentarem uma elevada razão de área de superfície de troca térmica por volume. Dada a quantidade de elementos a serem unidos e a complexidade geométrica destes trocadores, em especial na região interna onde contam com uma gama diversificada de formas e tamanhos de canais, o processo de união por difusão em estado sólido é o processo de fabricação mais adequado, uma vez que garante a integridade da união do trocador sem a presença de zona termicamente afetada (ZTA). Desta forma, o estudo dos processos envolvidos na manufatura destes trocadores é essencial para garantir a efetiva fabricação de dispositivos robustos e isentos de defeitos. O presente trabalho analisa a influência do processo de corte via jato d'água abrasivo na integridade de superfície de chapas de aço inoxidável 316L com canais e seu impacto na qualidade final da união. Para tal, delineou-se um planejamento experimental do tipo 2^k fatorial em que foram variados os parâmetros de velocidade de avanço, pressão do jato e distância entre o bocal e a peça. As amostras fabricadas foram caracterizadas utilizando técnicas de interferometria ótica de luz branca, perfilometria, microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Posteriormente as condições de corte que apresentaram a pior e a melhor qualidade de acabamento foram selecionadas e dois blocos de $100 \times 100 \text{ mm}^2$, simulando o núcleo de um trocador de calor compacto, foram fabricados pelo processo de união por difusão, dos quais foram retirados corpos de prova para caracterização microestrutural e ensaios de tração. Ao final do trabalho verificou-se que os impactos causados pelo processo de corte via jato d'água abrasivo concentram-se nas regiões adjacentes ao corte, de modo que na face de entrada do jato há a deterioração da textura e integridade de superfície das regiões próximas a borda dos canais, onde foram identificadas partículas abrasivas de Garnet incrustadas, formação de rebarba com tamanho médio de $31 \mu\text{m}$ e aumento nos parâmetros de superfície S_a , S_q , S_z e P_t . Na face de saída do jato identificou-se apenas a formação de rebarbas, cujo a altura média de $74 \mu\text{m}$ foi cerca de duas vezes maior que a observada na face de entrada, não sendo verificadas alterações significativas no acabamento de superfície das amostras. Estes impactos puderam ser minimizados com a correta seleção dos parâmetros de corte, em especial a redução da distância entre o bocal e a peça, permitindo a redução do tamanho médio da região afetada de $326 \mu\text{m}$ na pior condição observada para

149 μm na condição otimizada. Os blocos unidos apresentaram linhas de união com continuidade de material e grãos comuns as duas superfícies, indicativos da consolidação da união com boa qualidade. Estes resultados foram confirmados a partir dos ensaios de tração, os quais ultrapassaram os requisitos mínimos especificados em norma para o material de base, sendo observados valores próximos a 520 MPa de tensão máxima, 230 MPa de tensão de escoamento e 45% de alongamento em ambos os blocos. Entretanto, nas regiões com canais verificou-se um aumento significativo no comprimento e quantidade de defeitos nas linhas de união, indicativo de redução na qualidade da união, oriundos da degradação da textura e integridade de superfície próximo aos canais. Dada a pequena área afetada pelo corte em relação a área total de união, a qualidade final dos blocos nas regiões maciças não apresentou variações significativas em função dos parâmetros de corte utilizados. Contudo, regiões de área reduzida e/ou cortes com pequenas distâncias entre si, a exemplo das aletas dos canais onde a zona afetada pelo corte atingiu valores próximos a 40% da área a ser unida, são regiões críticas para o processo de união, visto a intensa degradação da superfície, presença de partículas abrasivas incrustadas e rebarba.

Palavras chave: soldagem por difusão, topografia de superfície, permutador de calor, jato d'água, usinagem, engenharia de superfície.

ABSTRACT

Due to the challenges associated with oil exploration on offshore platforms, such as limited space, long distances to the shore, and high operation and maintenance costs, the use of devices with high efficiency, reliability and small volumes are essential. In this context, compact heat exchangers (CHEs) stand out for their high heat exchange area to volume ratio. Given the number of parts to be welded and the geometric complexity of these exchangers, especially in its internal structure which can be designed in a variety of channel shapes and sizes, the solid-state diffusion bonding process is the most suitable process for CHE's manufacturing, ensuring the integrity of the welded exchanger without the presence of a heat affected zone (HAZ). Thus, the study of the processes involved in the manufacturing of these exchangers is essential to guarantee the fabrication of robust and defect-free devices. The present work analyzes the influence of the abrasive waterjet cutting process on the surface integrity of stainless steel 316L sheets with channels and its impact on the final quality of the weld. For this purpose, a 2^k factorial experimental design was designed in which the parameters feed rate, jet pressure and stand-off distance were evaluated. The manufactured samples were characterized using white light optical interferometry, profilometry, optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) techniques. Subsequently, the cutting conditions that resulted in the best and worst surface quality were selected and two 100 x 100 mm² blocks, simulating the core of a compact heat exchanger, were fabricated by the diffusion bonding process, from which specimens were taken for microstructural characterization and tensile tests. At the end of the study, it was found that the impacts caused by the abrasive waterjet machining are concentrated in the regions adjacent to the cut. At the jet entrance face deterioration of the texture and integrity of the surface near the edge of the channels was observed, where embedded Garnet abrasive particles, burr formation with an average size of 31 μm and an increase in the surface parameters S_a , S_q , S_z and P_t were identified. On the jet exit face, only burr formation was identified, whose average height of 74 μm was about twice as large as that observed on the entry side, while no significant changes in the surface finish of the samples were observed. These impacts could be minimized with the correct selection of cutting parameters, especially the reduction of the stand-off distance, reducing the average size of the affected region from 326 μm in the worst observed condition to 149 μm in the optimized condition. The bonded blocks presented bond lines with continuity of material and grains common to both surfaces, indicating a good quality weld. These results were confirmed by the tensile tests, which exceeded the minimum requirements specified in the norm for the base material, with values

close to 520 MPa of maximum tension, 230 MPa of yielding tension and 45% of elongation in both blocks. However, in the regions with channels there was a significant increase in the length and quantity of defects in the bond lines, indicating a reduction in the bond quality, resulting from the surface texture and integrity degradation near the channels. Given the small area affected by the cut in comparison to the total bond area, the final quality of the blocks in the massive regions did not present significant variations as a function of the cutting parameters used. However, regions with reduced area and/or cuts with small distances between them, such as the channels flanges, where the zone affected by the cut reached values close to 40% of the area to be welded, are critical regions for the diffusion bonding process, due to the presence of intense surface degradation, embedded abrasive particles and burr.

Keywords: Diffusion welding, heat exchanger, surface topography, water jet, machining, surface engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de compacidade de trocadores de calor.	14
Figura 2 - Representação das etapas do processo de união por difusão. A) contato das asperezas, deformação plástica localizada e surgimento de vazios; B) eliminação inicial de vazios por meio da difusão em contorno de grão; C) eliminação dos vazios restantes por meio da difusão volumétrica.	20
Figura 3- Representação de uma superfície real e as camadas que a compõem.	21
Figura 4 - Quebra localizada das camadas de óxidos, formando contatos metálicos.....	22
Figura 5 - Rompimento da camada de óxido em regiões de contato das asperezas.....	22
Figura 6 - Representação dos três componentes extraídos de uma superfície real.....	24
Figura 7 - Esquema representando as regiões de contato real entre duas superfícies sobrepostas.	25
Figura 8 - Esquema representando a concentração de tensão nas regiões de contato real entre as superfícies.....	26
Figura 9 - Representação do aumento na área real de contato por meio do achatamento das asperidades e da formação de novos pontos de contato sob força de aplicação constante.. (a) Início da aplicação de força. (b) Após um determinado período de tempo.	27
Figura 10 – Representação da formação dos contatos e vazios na linha de união. (a) Deformação do topo das ondulações. (b) Vazios formados nas regiões onde as ondulações não se tocam. (c) Achatamento das ondulações e aumento no número de asperidades em contato.....	28
Figura 11 – Representação do contato baseado no perfil de rugosidade das superfícies.	29
Figura 12 - Avaliação da influência do acabamento de superfície na tensão de cisalhamento de amostra unidas por difusão.....	30
Figura 13 – Esquema representando o bocal utilizado em equipamentos para corte via jato d'água abrasivo.....	32
Figura 14 – Possíveis mecanismos de erosão. (a) Baixo ângulo de impacto. (b) Alto ângulo e baixa velocidade de impacto. (c) Alto ângulo e velocidade média de impacto. (d) Alto ângulo e alta velocidade de impacto para diferentes tamanhos de partícula.....	34

Figura 15 - Mecanismos de remoção de material no processo de erosão de materiais frágeis.	35
Figura 16 - Representação dos mecanismos de remoção de material por erosão e seu impacto na integridade da superfície do material alvo. (a) Em materiais dúcteis. (b) Em materiais frágeis.	36
Figura 17 - Parâmetros de entrada do corte via jato d'água abrasivo e seus grupos.	37
Figura 18 – Representação das variáveis de entrada e saída envolvidas no corte via jato d'água.	38
Figura 19 - Resultados obtidos a partir da variação da velocidade transversal em amostras de aço inoxidável.....	39
Figura 20 - Esquema representando a influência da distância entre o bocal e a peça no perfil de corte.	41
Figura 21 - Diminuição do diâmetro efetivo do jato em virtude do fenômeno de espalhamento.	42
Figura 22 - Fluxograma apresentando a sequência de atividades desenvolvidas.....	45
Figura 23 – Desenho técnico das amostras fabricadas via jato d'água. (a) Dimensões da amostra. (b) Amostra após o corte via jato d'água abrasivo.	49
Figura 24 - Regiões avaliadas em microscopia ótica.	50
Figura 25 - Representação das regiões da amostra avaliadas em MEV.	51
Figura 26 - Esquema representando os pontos avaliados por meio da interferometria ótica de luz branca.....	53
Figura 27 - Esquema das regiões onde foram realizadas as medidas em perfilômetro.	54
Figura 28 - Amostra posicionada para a medição da altura da rebarba em perfilômetro.....	54
Figura 29 – Geometria definida (a) e montagem do bloco para união por difusão (b), (c) e (d).	56
Figura 30 - Bloco unido nas condições de 1040°C - 9,5 MPa - 1 hora. Amostras cilíndricas removidas nas posições demarcadas.....	58

Figura 31 - Recorte da chapa com as amostras que permaneceram fixadas. Flechas em verde indicam a chapa conforme recebida ainda com película. Flechas em azul indicam regiões onde o corte foi incompleto.....	59
Figura 32 - Amostra 0 em 50x de aumento. Presença da uma zona afetada pelo corte (setas vermelhas) nas bordas do canal com coloração e textura diferentes do material de base (setas verdes).	61
Figura 33 - Comparativo entre os resultados obtidos em microscópio ótico na face de entrada e saída do jato. Aumento de 50x.	62
Figura 34 – Amostra 1 tratada através do software ImageJ-Fiji. (a) Imagem original conforme obtida em MO. (b) Imagem após o processo de ternarização.	63
Figura 35 - Pontos de realização das medidas as medidas e indicativo de como foram realizadas.	64
Figura 36 - Tamanho médio da zona afetada verificada em cada amostra.....	64
Figura 37 - Imagens em 50x de aumento em microscópio ótico das bordas superiores do canal. a) Condições com 1,5 mm de distância entre o bocal e a peça. b) Condições com 3 mm de distância.	66
Figura 38 - Comparativo isolando o parâmetro de distância entre o bocal e a peça, aumento de 50x.	67
Figura 39 - Análise do efeito da distância entre o bocal e a peça no tamanho da zona afetada na borda do canal.....	68
Figura 40 – Amostras 3 e 4 em 50x pós processo de ternarização. Linha laranja ressalta o formato do corte.	69
Figura 41 - Amostras 7 e 8 em 50x pós processo de ternarização. Linha laranja ressalta o formato do corte.....	69
Figura 42 – Comparativo entre as distâncias médias afetadas pelo corte quando variada a velocidade de avanço.....	70
Figura 43 – Influência da variação na pressão do jato nas amostras 1 e 3 em 50x	72
Figura 44 - Influência da variação na pressão do jato nas amostras 5 e 7 em 50x.....	72

Figura 45 - Comparativo entre as distâncias médias afetadas pelo corte quando variada a pressão do jato.	73
Figura 46 – Tamanho médio da região afetada disposto em ordem crescente.	75
Figura 47 -Comparativo geral em aumento de 50x entre as condições que apresentaram os melhores e piores resultados referente à integridade da superfície e precisão geométrica após o corte.	76
Figura 48 - Amostra 1 em SE, 60x de aumento. Impactos do corte via jato d'água abrasivo regiões próximas ao corte. Em verde o acabamento padrão, em vermelho as regiões de acúmulo de material com maior altura e em laranja regiões com textura formada após o corte (a) Região superior. (b) Região inferior.	78
Figura 49 - Amostra 1 em SE, setas azuis indicam a região afetada no topo dos canais, setas vermelhas indicam degradação de uma grande área da superfície na parte inferior dos canais. (a) Aumento de 100x. (b) Aumento de 200x.	79
Figura 50 -Amostra 1 em BSE, 200x de aumento. Setas indicam as partículas abrasivas incrustadas. (a) Região superior direita. (b) Região inferior esquerda.	80
Figura 51 – Amostra 0 em aumento de 500x. (a) Face de entrada do jato. (b) Face de saída do jato.	81
Figura 52 - Face de saída do jato da amostra 3 analisada em MEV com inclinação da amostra em 15° para destaque da rebarba. (a) Aumento de 1000x. (b) Aumento de 5000x da região destacada em laranja.	82
Figura 53 – Amostra 1 face de entrada em 1000x de aumento, revelando a presença de abrasivos incrustados. (a) Imagem em BSE. (b) Imagem em BSE. (c) Resultado da análise de EDS da região destacada em laranja. (d) Resultado da análise de EDS da região destacada em amarelo.	83
Figura 54 - Amostra 3 face de saída em 1000x de aumento. (a) Imagem em BSE. (b) Imagem em BSE. (c) Resultado da análise de EDS da região destacada em amarelo. (d) Resultado da análise de EDS da região destacada em verde.	84
Figura 55- Comparativo do impacto da distância entre o bocal e a peça. Aumento de 500x. .	85

Figura 56 - Comparativo geral do impacto da distância entre o bocal e a peça. Aumento de 200x.....	86
Figura 57 - Avaliação da influência da velocidade de avanço na topografia das superfícies das amostras.....	87
Figura 58 - Comparação da influência do parâmetro velocidade de avanço na tolerância geométrica do processo. Aumento de 100x.....	88
Figura 59 - Comparativo entre resultados variando a pressão do jato. Aumentos de 100x e 200x. Flechas alaranjadas indicam as regiões onde há um espalhamento da zona afetada.....	89
Figura 60 - Projeção axonométrica da superfície 2B conforme recebida.	90
Figura 61 – Representação 3D da superfície de entrada do jato para a amostra 8 após processo de corte, aumento de 50x. Sendo (a) e (b) regiões distantes dos canais, (c) e (d) regiões próximas aos canais.....	91
Figura 62 - Representação 3D da superfície de saída do jato para a amostra 8 após processo de corte, aumento de 50x. Onde (a) e (b) são pontos distantes do canal e (c) próximo ao canal...	92
Figura 63 - Rugosidade média das amostras avaliada na face de saída do jato e nas regiões laterais e centrais da face de entrada.	93
Figura 64 - Rugosidade quadrática média das amostras avaliada na face de saída do jato e nas regiões laterais e centrais da face de entrada.....	93
Figura 65 - Altura máxima medida avaliada na face de saída do jato e nas regiões laterais e centrais da face de entrada.....	94
Figura 66 – Média de altura total do perfil para as amostras avaliada na face de saída do jato e nas regiões laterais e centrais da face de entrada.....	94
Figura 67 - Amostra 5 em aumento de 500x. (a) Face de entrada do jato. (b) Face de saída do jato.	96
Figura 68 - Média dos resultados obtidos a partir da perfilometria das amostras. (a) Altura média da rebarba na face de entrada do jato. (b) Altura média da rebarba na face de saída do jato...	97
Figura 69 - Influência da pressão do jato na altura da rebarba medida na face de entrada das amostras.....	98

Figura 70 – Impacto da distância entre o bocal e a peça na altura da rebarba formada. Setas indicam rebarba de maior altura na condição de menor distância entre o bocal e a peça.	99
Figura 71 - Representação visual do método utilizado para aproximar o tamanho da rebarba formada na face de saída do jato.	101
Figura 72 - Rebarbas formadas a partir do corte. (a) Amostra 3. (b) Amostra 5.....	101
Figura 73 - Amostra 5 em aumento de 100x. Setas em diferentes cores indicam diferentes tamanhos e formas de rebarba e o respectivo comprimento (c_r) medido.	102
Figura 74 - Tamanho da rebarba calculado a partir da soma da altura e comprimento da rebarba.	103
Figura 75 - Tensão máxima medida nas amostras retiradas dos blocos unidos por difusão. Em laranja é apresentado o valor mínimo aceito para o material de base conforme ASTM A240.	104
Figura 76 - Tensão de escoamento medida nas amostras retiradas dos blocos unidos por difusão. Em laranja é apresentado o valor mínimo aceito para o material de base conforme ASTM A240.	104
Figura 77 - Alongamento medido nas amostras retiradas dos blocos unidos por difusão. Em laranja é apresentado o valor mínimo aceito para o material de base conforme ASTM A240.	105
Figura 78 – Parte superior do canal 1 da amostra 5 em 60x de aumento.	106
Figura 79 - Lateral do canal 1 da amostra 5 em 100x de aumento. Retângulos alaranjados destacam as regiões afetadas pelo corte na amostra.	106
Figura 80 - Formato característico resultante do processo de corte via jato d'água abrasivo, em que é observado o arredondamento da borda superior e formação de rebarba na borda inferior.	107
Figura 81 – Comparação em 100x entre as linhas de união formadas na região com canais. Setas verdes indicam vazios de grande tamanho formados. Setas azuis indicam grãos transpassando a linha de união. (a) Face de entrada do jato. (b) Face de saída do jato.	109

Figura 82 – Acima, vista lateral das linhas de união no topo e base dos canais em microscópio ótico (50x). Abaixo, vista de topo dos canais (MEV 60x – 1000x), indicando a condição das superfícies antes da união.	110
Figura 83 - Amostra 5 em 100x na região sem canais, linha de união destacada em laranja. Setas azuis indicam grãos que atravessam a linha de união e verdes indicam regiões com continuidade de matéria.	111
Figura 84 - Comparativo entre as linhas de união verificadas em cada bloco. Aumento de 100x.	112
Figura 85 – Comparativo entre região sem canais (a) e com canais (b) da condição 5. Aumento de 100x.	113
Figura 86 - Comparativo entre região sem canais (a) e com canais (b) da condição 5. Aumento de 200x.	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química padrão para o aço inoxidável 316L (% em peso).	46
Tabela 2 - Parâmetros e valores avaliados.....	47
Tabela 3 - Condições especificadas para a avaliação dos diversos conjuntos de parâmetros de corte.	48
Tabela 4 - Parâmetros do equipamento de corte via jato d'água abrasivo utilizados na fabricação das amostras.....	48
Tabela 5 - Composição padrão do garnet distribuído pela empresa Zirtec (% em peso).	49
Tabela 6 - Resultados obtidos ao avaliar a influência da pressão no tamanho da região afetada.	73
Tabela 7 – Impacto dos parâmtros estudados na qualidade final dos cortes.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AWJM	<i>Abrasive Waterjet Machining</i> (Corte via jato d'água abrasivo)
β	Compacidade
CHE	<i>Compact Heat Exchanger</i> (Trocador de Calor Compacto)
DoE	<i>Design of Experiment</i> (Planejamento de Experimentos)
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (Espectroscopia por Energia Dispersiva)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MO	Microscópio Óptico
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
Objetivo Geral.....	17
Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Soldagem por difusão	18
3.1.1. Acabamento da superfície	23
3.2. Corte via jato d'água abrasivo	31
3.2.1. Mecanismos de remoção de material.....	33
3.2.2. Parâmetros de corte	36
3.2.2.1. Velocidade transversal	38
3.2.2.2. Distância entre o bocal e a peça.....	40
3.2.2.3. Pressão do jato d'água	43
4. METODOLOGIA	45
4.1. Seleção do material	46
4.2. Fabricação de amostras para avaliação dos parâmetros de corte via jato d'água abrasivo.....	46
4.3. Microscopia Ótica (MO).....	49
4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	50
4.5. Interferometria ótica de luz branca	51
4.6. Perfilometria.....	53
4.7. Fabricação e união por difusão de blocos.....	55
4.8. Análise dos blocos	58

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1. Microscopia ótica	60
5.1.1. Distância entre o bocal e a peça	65
5.1.2. Velocidade de avanço	68
5.1.3. Pressão do jato	71
5.1.1. Comparação geral	74
5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura	77
5.2.1. Distância entre o bocal e a peça	85
5.2.2. Velocidade de avanço	87
5.2.3. Pressão do jato	89
5.3. Interferometria ótica de luz branca	90
5.4. Perfilometria.....	95
5.4.1. Face de entrada do jato	98
5.4.2. Face de saída do jato.....	100
5.5. Ensaio de tração	103
5.6. Análise microestrutural.....	107
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
6.1. Conclusões	115
Sugestões para trabalhos futuros	120

1. INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são dispositivos utilizados para transferir energia térmica entre dois ou mais fluidos, uma superfície sólida e um fluido ou entre sólidos particulados e um fluido, que estejam em temperaturas diferentes e em contato térmico. Aplicações típicas deste dispositivos incluem a evaporação/condensação e/ou o aquecimento/resfriamento de fluidos, tendo amplo uso em diversos setores como aeronáutica, computação, extração de petróleo, entre outros (SHAH, SEKULI, 2003).

Quando utilizados para exploração de petróleo, em especial em plataformas de extração *offshore*, diversos fatores devem ser levados em consideração em sua construção, como o espaço reduzido disponível nas plataformas, elevada distância da costa, difícil transporte de equipamentos e alto custo de operação. Assim, o uso de dispositivos de troca térmica de alta eficiência e volume reduzido é essencial, uma vez que diminui de maneira considerável custos de operação e manutenção destes equipamentos.

Neste âmbito, os trocadores de calor compactos, do inglês Compact Heat Exchangers (CHE's), surgem como uma excelente alternativa, visto que possuem elevada capacidade de troca térmica com um volume reduzido. A classificação de um trocador de calor como compacto é medido por meio de sua compacidade (β), calculada a partir de uma razão entre a superfície de troca térmica e o volume do componente. Um trocador é considerado compacto quando sua compacidade está acima de $700 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ para sistemas gás/líquido e acima de $400 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$ para sistemas líquido/líquido ou com troca de fase, como é mostrado na Figura 1 (SHAH, SEKULI, 2003).



Em conjunto com as restrições de forma e volume, os dispositivos utilizados em plataformas de extração *offshore* são submetidos a condições marítimas de corrosão e elevadas pressões, restringindo a gama possível de materiais a serem utilizados na fabricação destes dispositivos. Desta maneira, mesmo apresentando valores de condutividade térmica abaixo de outras ligas, os aços inoxidáveis austeníticos ganham destaque visto a formação de uma camada

passivadora que confere a esta classe, dentre os aços, uma excelente resistência à corrosão em ambiente marítimo, bem como suas propriedades mecânicas, que também os tornam adequados a esta aplicação (KIM, YOUNG, 2013).

Contudo, a presença desta camada passivadora nos aços inoxidáveis dificulta sua soldagem. Aliado a isto, à complexidade geométrica interna dos trocadores de calor compactos torna necessário o uso de métodos alternativos de soldagem. Neste contexto, o processo de união por difusão apresenta-se como uma das técnicas mais apropriada, uma vez que é um processo de soldagem em estado sólido em que o coalescimento das superfícies em contato é alcançado via aplicação de pressão e temperatura em um ambiente de vácuo por um determinado período de tempo. Este processo é utilizado para unir materiais como ligas de alumínio, titânio, níquel, aços austeníticos e pares dissimilares, a exemplo do titânio/alumínio, alumínio/magnésio e outros (JIANGWEI, YAJIANG, *et al.*, 2002, RUSNALDY, 2001, ZHANG, LUO, *et al.*, 2012).

A qualidade final do processo de união por difusão está atrelada fortemente tanto aos parâmetros de processamento como tempo, temperatura, pressão e atmosfera do ciclo, quanto às condições iniciais da matéria prima a ser unida, como sua microestrutura e acabamento de superfície. Desta forma, o estudo da influência das rotas de fabricação na integridade de superfície dos componentes a serem unidos faz-se extremamente relevante, uma vez que os processos envolvidos na fabricação destes componentes inevitavelmente imprimem modificações significativas em sua superfície.

Neste contexto, o processo de corte via jato d'água será utilizado no presente trabalho como uma alternativa a rota de fabricação convencional dos CHE's, o ataque fotoquímico, dado a sua capacidade de fabricação de cortes passantes e de maiores dimensões, além da possibilidade do corte de chapas empilhadas. Entretanto, a depender dos parâmetros de corte utilizados, diferentes níveis de modificações no acabamento de superfície são impostos nas chapas, como a formação de rebarba, alterações na topografia da superfície e a adesão de incrustações, as quais podem apresentar efeito deletério durante o processo de união.

Com o objetivo de compreender os impactos do processo de corte na qualidade final de dispositivos unidos por difusão e minimiza-los, realizou-se neste trabalho o corte via jato d'água abrasivo de chapas de aço inoxidável AISI 316L com canais em geometria semelhante a utilizada na manufatura de núcleos de trocadores de calor compactos unidos por difusão, sendo avaliadas a influência dos parâmetros, a pressão do jato, a velocidade de avanço e a distância entre o bocal e a peça na integridade de superfície das chapas durante a fabricação. Para tal, foram definidos por meio de um *Desing of Experiment* (DOE) do tipo 2^k fatorial, quinze

conjuntos de parâmetros a serem avaliados, a partir dos quais foram fabricadas amostras de 40 x 30 mm² contendo três canais de 3 mm de largura.

O controle do acabamento da superfície das chapas usinadas foi realizado via técnicas de microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura, interferometria e perfilometria, com o intuito de caracterizar a topografia de superfície após o processo de corte e compreender a influência dos parâmetros de corte estudados na integridade de superfície das amostras, para em seguida correlaciona-las com a qualidade final de dispositivos unidos por difusão.

Após os pré-ensaios, fez-se a seleção de dois conjuntos de parâmetros para a fabricação de blocos com canais unido por difusão nas dimensões 100x100x110 mm³, onde optou-se por utilizar as condições que apresentaram melhor e pior acabamento de superfície, de modo a evidenciar o impacto dos diferentes acabamentos durante o processo de união. Destes blocos foram retirados corpos de prova para a realização de ensaios de tração e análise microestrutural para caracterizar e avaliar possíveis alterações na região de união e suas causas.

Desta forma, por meio da análise microestrutural das linhas de união e das propriedades mecânicas finais do dispositivo fabricado, avaliou-se a influência do acabamento de superfície (topografia da superfície e rebarba formada) na qualidade final do processo de união por difusão, bem como a viabilidade desta rota de fabricação para a manufatura de trocadores de calor compactos.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Avaliar a influência do processo de corte via jato d'água abrasivo na integridade de superfície de chapas de aço inoxidável austenítico 316L e seu impacto nas propriedades mecânicas, macro e microestruturais de dispositivos unidos por difusão.

Objetivos Específicos

- Avaliar a influência dos parâmetros pressão do jato, velocidade de avanço e distância entre o bocal e a peça na integridade de superfície de chapas com canais usinadas por meio do processo de corte via jato d'água abrasivo;
- Caracterizar o acabamento de superfície de chapas com canais usinadas por meio do processo de corte via jato d'água abrasivo;
- Investigar o impacto dos diferentes acabamentos de superfície nas propriedades mecânicas e macro e microestruturais de dispositivos unidos por difusão;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Soldagem por difusão

A soldagem por difusão é uma técnica de união em estado sólido em que o coalescimento das superfícies em contato é alcançado em vácuo, via aplicação de pressão mecânica e temperatura por um determinado período de tempo (GIETZELT, TOTH, *et al.*, 2016, W. A. OWCZARSKI, W. H. KING, 1970). Esta técnica é uma opção atrativa para a união de materiais similares e dissimilares, bem como para a confecção de componentes com elevado controle de continuidade nas regiões de união, visto que o processo preserva a microestrutura do material de base na interface de junção (RUSNALDY, 2001).

A crescente utilização da soldagem por difusão na indústria está atrelada diretamente as vantagens que este processo traz quando comparado a técnicas convencionais de soldagem, dentre estas vantagens Kazakov (1985) e Gietzelt, Toth, *et al.* (2016) apontam:

- A alta reprodutibilidade dos resultados, visto que uma vez definidos e programados os parâmetros de união no forno o processo é realizado de forma automática;
- A possibilidade de alcançar nos dispositivos unidos propriedades mecânicas e microestruturais similares as do material de base;
- A ausência de uma Zona Termicamente Afetada (ZTA), visto que toda a peça é aquecida igualmente durante a união;
- Capacidade de união de materiais dissimilares, a exemplo de materiais cerâmicos, metálicos e compósitos;
- As tolerâncias dimensionais estreitas alcançadas com este processo, em vista da união ocorrer com baixos níveis de deformação plástica, não sendo necessário, desta forma, processos de acabamento pós-união;
- A possibilidade de união de geometrias complexas como tubos, esferas, curvas, elementos vazados e de grandes áreas transversais, característica a qual permite a fabricação de trocadores de calor do tipo compacto.

Entretanto, algumas desvantagens do uso desta técnica podem ser destacadas, a exemplo da necessidade de fornos específicos para a união, tendo estes equipamentos um alto custo associado à sua operação e manutenção, a impossibilidade da realização da solda em situ, a necessidade do aquecimento da peça como um todo por um período de tempo prolongado, o qual pode ocasionar modificações deletérias na microestrutura dos componentes e acarretar em

perda das propriedades mecânicas do material, e a necessidade da definição de parâmetros específicos de tempo, temperatura e pressão para cada liga a ser unida.

Neste processo, com o intuito de acelerar a cinética dos fenômenos difusivos, as temperaturas de união empregadas variam entre 50 e 80% da temperatura absoluta de fusão do material, de forma que esta faixa de temperatura permita a união em tempos economicamente viáveis enquanto previne a formação de fase líquida e o amolecimento excessivo do material.

Aliada a temperatura, a seleção da pressão a ser aplicada durante a união é extremamente relevante visto que, conforme Gietzelt, et al. (2016), de modo a se obter bons resultados de união, um certo nível de deformação plástica deve sempre ser aceito. Neste contexto, Bampton (1987) descreve em sua patente que, níveis de deformação plástica entre 1 e 4% são em geral desejáveis durante a soldagem por difusão e auxiliam na formação de regiões de contato metal-metal. Contudo, níveis excessivos de deformação plástica devem ser evitados, uma vez que promovem perda de geometria nos componentes e danos à estrutura dos dispositivos unidos. Assim, a seleção da pressão deve ser realizada de modo a garantir um determinado nível de deformação plástica que permita uma boa união e não afete a funcionalidade do dispositivo, sendo utilizado tipicamente níveis de pressão bem abaixo do limite de escoamento do material na temperatura de união (GIETZELT, TOTH, et al., 2017).

Desta maneira, Gietzelt, et al. (2016) cita em seu trabalho que a qualidade de uma junta unida por difusão é determinada predominantemente pelo conjunto de parâmetros de temperatura, tempo e pressão e que estes são interconectados de maneira fortemente não linear. Portanto, a seleção de parâmetros para união, bem como quaisquer alterações destes em processos em desenvolvimento, deve ser realizada com cautela, buscando preservar as propriedades e a microestrutura dos materiais de base após a união e evitar a ocorrência de elevados níveis de deformação macroscópica (HILL, WALLACH, 1989).

Contudo, uma gama de outros fatores estão também associados à qualidade final da união, como a qualidade de superfície dos corpos a serem unidos, a presença de camada passivadora, a densidade de defeitos na rede cristalina, a ocorrência de transformações de fase, formação de precipitados, tensões residuais, entre outros, os quais devem ser levados em consideração quando realizada a seleção dos parâmetros para união (GIETZELT, TOTH, et al., 2016).

Segundo Brien (1993), a formação da união por meio deste processo pode ser descrita didaticamente em três estágios metalúrgicos:

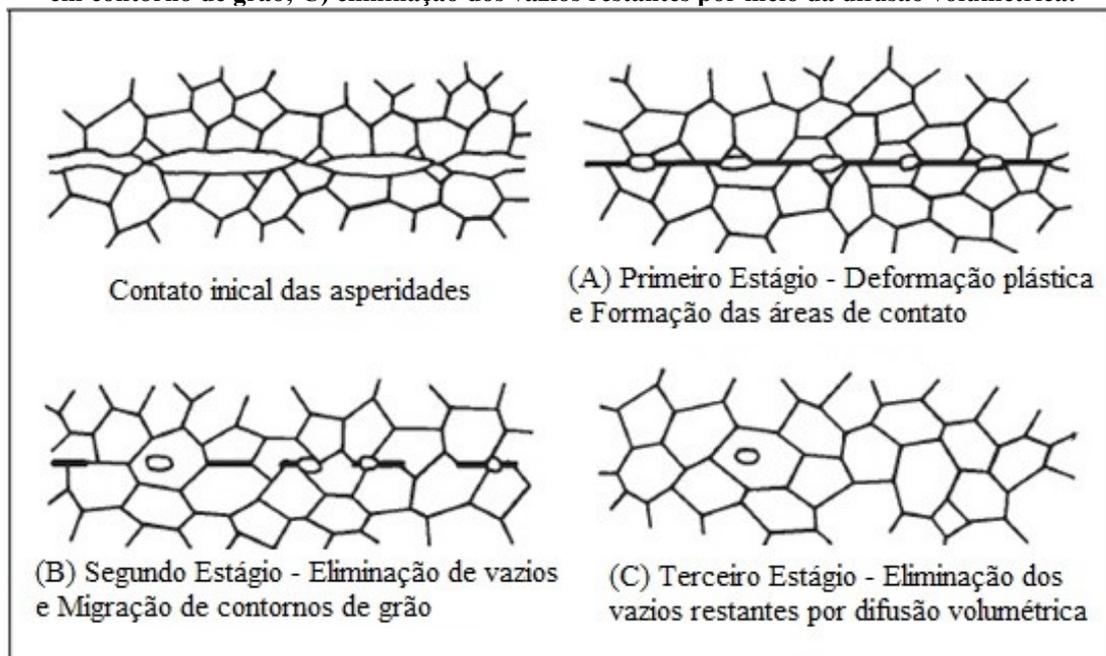
1. No primeiro estágio ocorre a deformação plástica das asperidades em contato, majoritariamente por mecanismos de escoamento e fluência, formando regiões

de contato íntimo em uma ampla fração da interface. Ao final desta fase a região de união é formada essencialmente de contornos de grão em contato e áreas de vazio.

2. No segundo estágio os fenômenos difusivos ganham força e tornam-se o mecanismo predominante. Muitos dos vazios começam a ser eliminados neste estágio por meio da difusão por contornos de grão. Simultaneamente, nesta etapa ocorre a migração dos contornos de grão para configurações de equilíbrio fora da região inicial da linha de união.
3. Durante o terceiro estágio, vazios que ainda não foram eliminados são preenchidos predominantemente por meio da difusão volumétrica. Nesta etapa, os vazios restantes se localizam no centro dos grãos e sua eliminação ocorre por meio da migração de átomos até superfície destes vazios.

Vale ressaltar que, na prática, estas etapas se sobrepõem e podem ocorrer simultaneamente, de forma que os mecanismos que predominam em uma etapa podem ocorrer, até certo nível, também em outras etapas. Uma representação da região de união durante as etapas do processo de união por difusão pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Representação das etapas do processo de união por difusão. A) contato das asperezas, deformação plástica localizada e surgimento de vazios; B) eliminação inicial de vazios por meio da difusão em contorno de grão; C) eliminação dos vazios restantes por meio da difusão volumétrica.

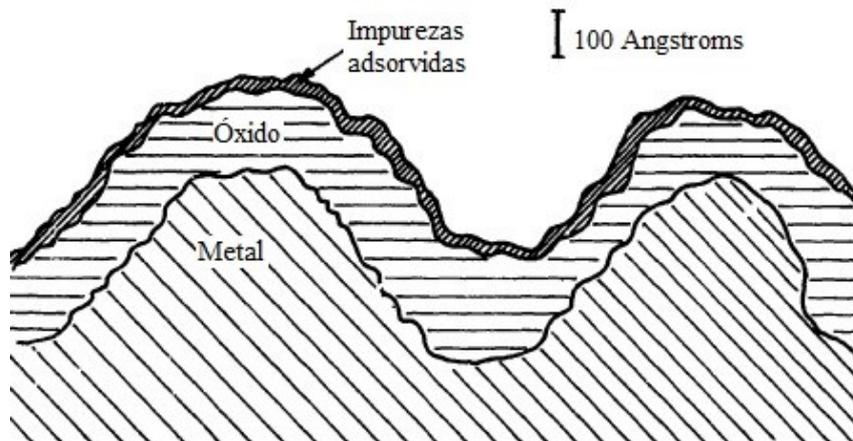


Fonte: Adaptado de BRIEN (1993).

Devido ao fato deste método de união ser um processo regido por fenômenos difusivos, o estabelecimento de contato metálico entre os componentes é condição primordial

para a união. Contudo, em condições reais, o estabelecimento deste contato encontra dois grandes obstáculos que precisam ser superados: a baixa área de contato íntimo entre as superfícies, visto que, em nível microscópico, apenas algumas asperezas estão em contato, e a presença de uma camada de óxido e impurezas adsorvidas na superfície dos materiais, conforme representado na Figura 3.

Figura 3- Representação de uma superfície real e as camadas que a compõem.



Fonte: Adaptado de HAUSER, KAMMER, *et al.* (1965).

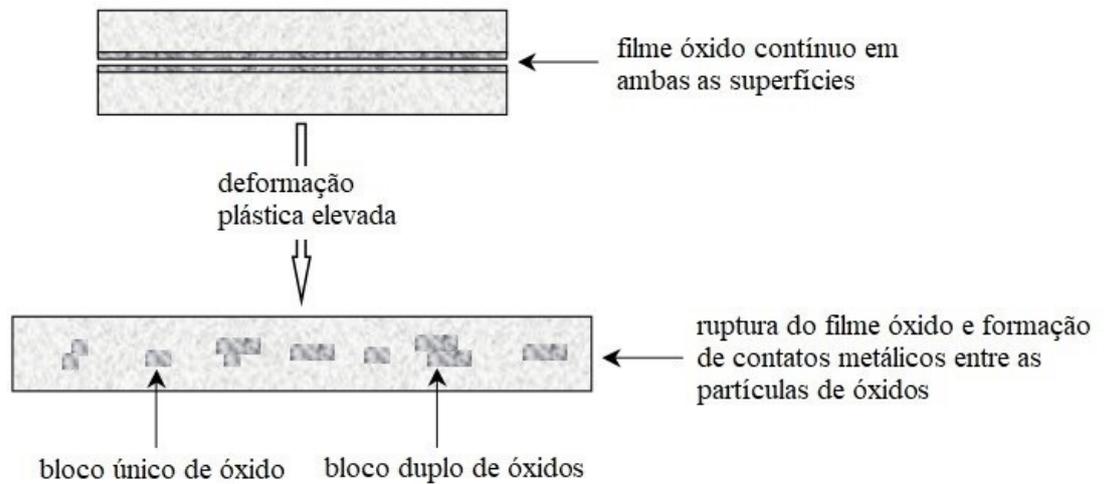
Dentre estes obstáculos a presença de uma camada de óxido entre as superfícies é a principal barreira na formação de uma união bem sucedida. Desta forma, o desenvolvimento de técnicas eficientes de quebra ou dissolução desta camada torna-se essencial para melhorias significativas da qualidade das uniões (BAGNATO, ZAVAGLIA, *et al.*, 2002, SHIRZADI, ASSADI, *et al.*, 2001).

Neste contexto, Shirzadi *et al.* (2001) cita, em seu trabalho, três técnicas utilizadas na tentativa de contornar a presença de camadas de óxido de alta aderência e insolúveis na matriz metálica:

- A imposição de deformações plásticas substanciais no material;
- O aumento do nível de deformação plástica das asperezas;
- A adição de uma intercamada quimicamente reativa com a camada de óxido.

A primeira técnica baseia-se na diferença de ductilidade entre a camada de óxido, em geral menos dúctil, e o material de base, induzindo nas superfícies níveis de deformação plástica suficientes para que a camada de óxido sofra rompimentos localizados conforme esquema apresentado na Figura 4.

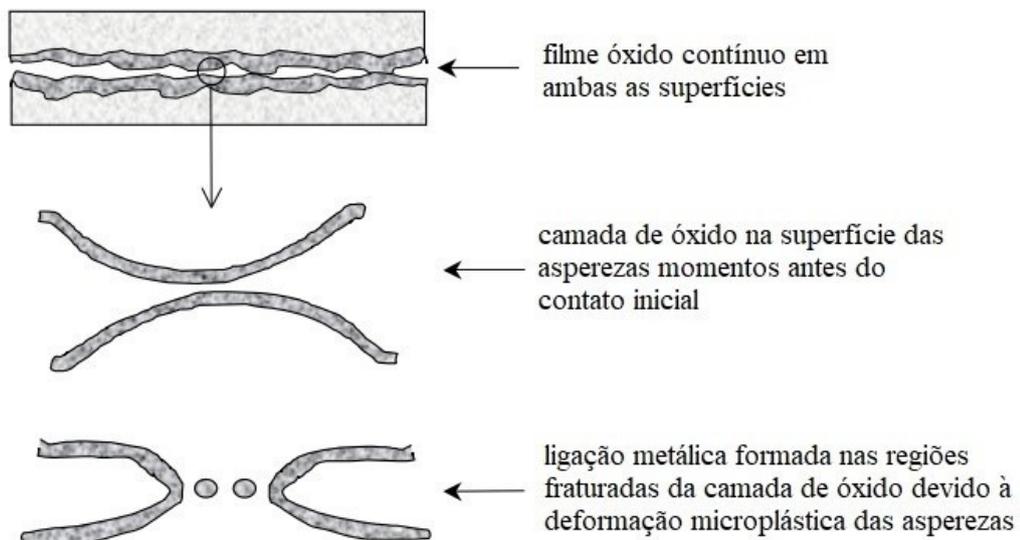
Figura 4 - Quebra localizada das camadas de óxidos, formando contatos metálicos.



Fonte: Adaptado de SHIRZADI (2001).

A segunda técnica citada, ocorre devido à alteração do acabamento da superfície dos corpos a serem unidos. Neste caso, visa-se promover um aumento na rugosidade da superfície a fim de possibilitar maior deformação plástica nas asperezas e mais pontos de quebra da camada de óxido (SHIRZADI, ASSADI, *et al.*, 2001). Este processo é exemplificado na Figura 5, em que apenas algumas asperezas entram em contato no momento do contato inicial, concentrando a força aplicada em uma área reduzida, o que induz elevadas deformações plásticas nestes pontos de contato, resultando na fratura da camada de óxido e na promoção do contato íntimo entre os metais.

Figura 5 - Rompimento da camada de óxido em regiões de contato das asperezas.



Fonte: Adaptado de SHIRZADI (2001).

Contrário às técnicas anteriores, a terceira técnica faz uso de reações químicas para desestabilizar a continuidade da camada de óxido. Neste caso é realizada a adição de elementos reativos com a camada de óxido via aplicação de uma intercamada, que reagem quimicamente com a camada de óxido no substrato e promovem a sua redução, formando um arranjo de partículas discretas, permitindo assim um aumento de contato intermetálico.

3.1.1. Acabamento da superfície

Dada a influência do acabamento da superfície na formação de regiões de contato íntimo inicial dos componentes e nos níveis de deformação plástica impostos nas asperidades, fenômenos estes associados tanto ao rompimento da camada de óxido quanto ao aumento das regiões de contato íntimo entre as superfícies durante a união, o controle deste parâmetro faz-se extremamente relevante e apresenta impacto direto na qualidade final das uniões (SHIRZADI, ASSADI, *et al.*, 2001, TAKADOUM, 2010).

Em situações práticas de união por difusão, o cálculo da pressão aplicada durante o ciclo é realizado a partir da razão entre a força programada e a área nominal de contato entre as partes a serem unidas. Entretanto, sabe-se que componentes reais são sujeitos a diversos processos de fabricação e usinagem e, desta forma, suas superfícies não são perfeitamente lisas mas apresentam uma textura, a qual pode ser descrita como a sobreposição de três componentes topográficos: forma, ondulação e rugosidade (GARMONG, PATON, *et al.*, 1975).

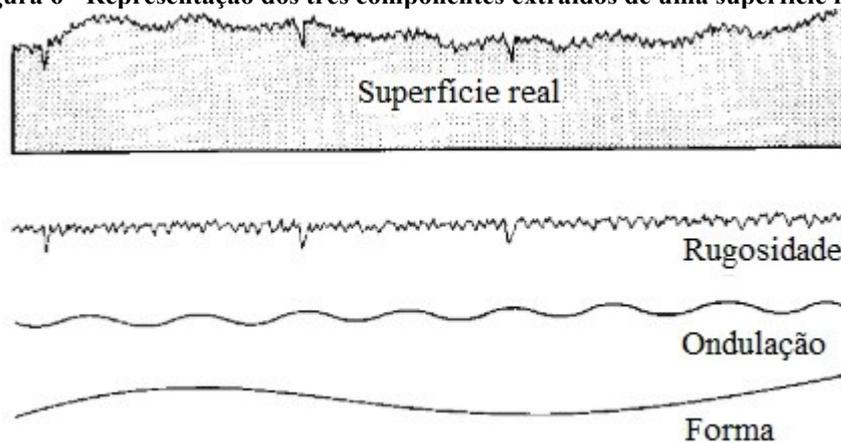
A divisão destes componentes é realizada com base no tamanho e na frequência com as quais estas imperfeições são observadas, sendo comumente utilizado o comportamento ondulatório como modo de descreve-los, em que comprimentos de onda menores representam defeitos de menor tamanho e menos espaçados (ASME B41.6, 2009). Um esquema desta divisão pode ser visto na Figura 6.

A definição de cada um destes componentes topográficos, conforme norma ASME B41.6, é apresentada abaixo:

1. Rugosidade: as menores irregularidades presentes na textura de superfície, apresentando desta forma o menor comprimento de onda. Este componente é inerente de qualquer processo de fabricação ou usinagem.
2. Ondulação: componente de maior comprimento de onda presente na textura de superfície, sendo mais espaçado e com maior altura que as rugosidades. Comumente associado a fatores como a vibração da máquina/peça durante a usinagem.

3. Forma: desvios com comprimento de onda ainda maiores que a ondulação, ocasionando divergências geométricas entre a superfície real e a superfície nominal, desta forma não sendo considerada parte da textura da superfície. Este componente está comumente associado a erros na usinagem como má fixação da peça, desgaste desigual, falta de alinhamento e outros.

Figura 6 - Representação dos três componentes extraídos de uma superfície real.

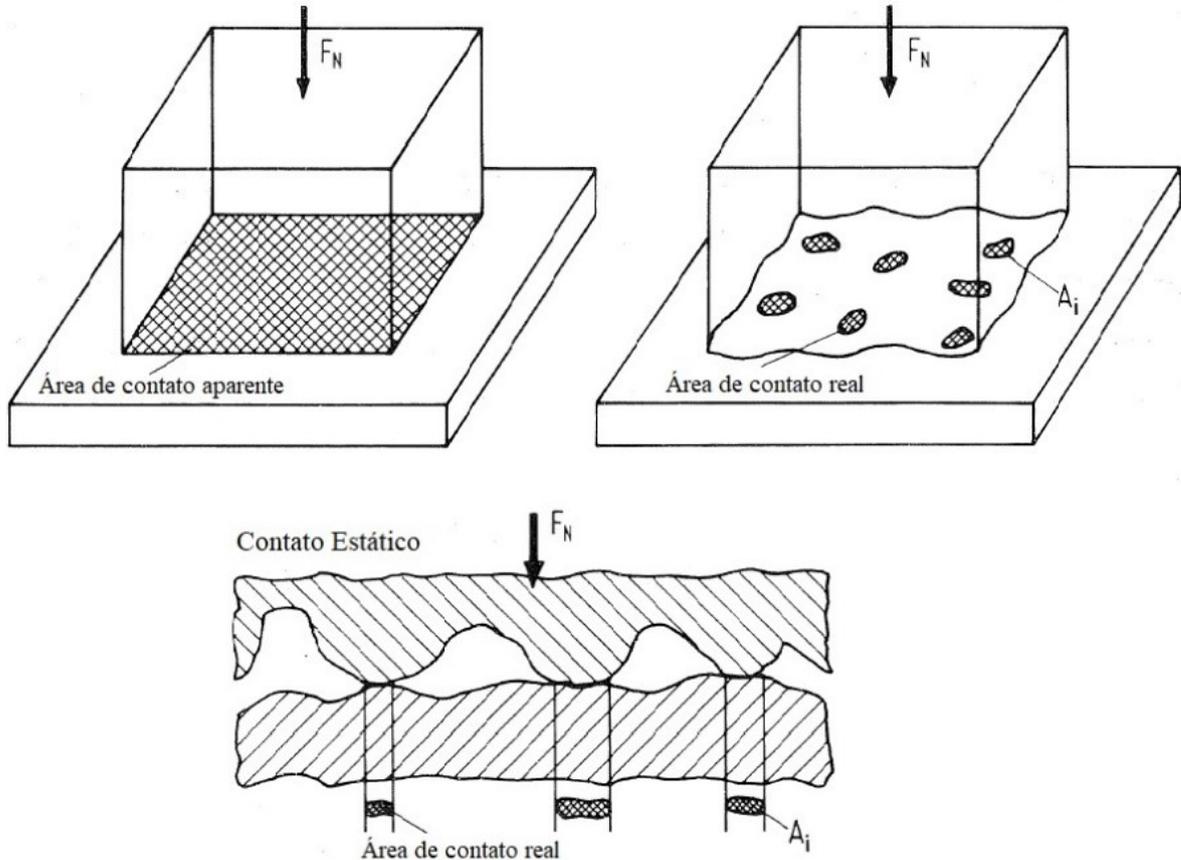


Fonte: Adaptado de E TTL, *et al.* (1998).

Em vista da presença desta textura na superfície dos materiais, quando dois corpos reais são aproximados o contato não ocorre na superfície como um todo, mas em um número finito de pontos, onde apenas o topo de algumas asperidades efetivamente se tocam, resultando em uma área de contato real muito abaixo da área aparente. Uma representação deste contato pode ser observada no esquema apresentado na Figura 7 (DAVIM, 2010, KOVACEVIC, 1991, POPOV, 2010, REZVANIAN, ZIKRY, *et al.*, 2007).

Outrossim, sabe-se também que alterações no acabamento de superfície afetam a forma como cargas são transmitidas na região de contato entre interfaces sólidas, de modo que superfícies mais rugosas promovem altas pressões localizadas e diminuem significativamente a área real de contato inicial quando comparadas a superfícies menos rugosas (BERGSETH, SJÖBERG, *et al.*, 2012).

Figura 7 - Esquema representando as regiões de contato real entre duas superfícies sobrepostas.

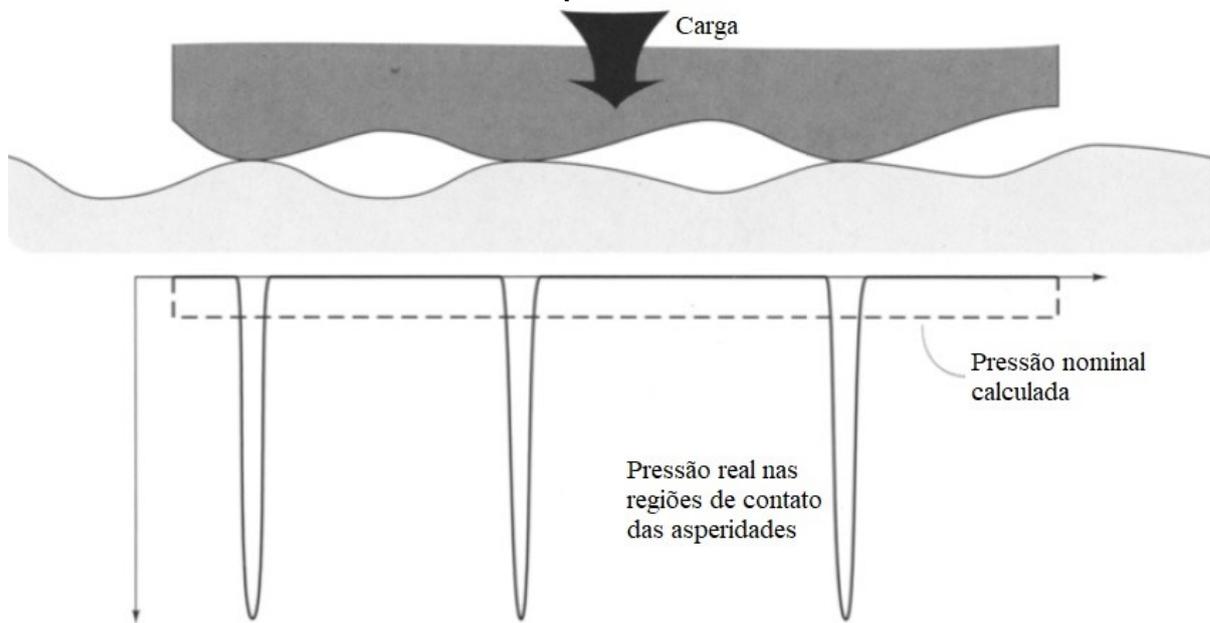


Fonte: Adaptado de GAHR (1987).

Desta forma, ao aplicar-se a força programada para a união por difusão, há a ocorrência do fenômeno de amplificação da pressão por efeito geométrico, em que, dada a reduzida área de contato real no topo das asperezidades, estas atuam como concentradores tensões, de modo que quanto mais próximo do topo da asperezidades menor é a área de contato e consequentemente maior a tensão real. Um esquema representando este fenômeno é apresentado na Figura 8.

Por conseguinte, quando avaliada em escala microscópica, a tensão resultante no topo destas asperezidades pode ultrapassar a tensão de escoamento do material, mesmo que a pressão calculada para a área aparente do material esteja muito abaixo deste valor (GARMONG, PATON, *et al.*, 1975).

Figura 8 - Esquema representando a concentração de tensão nas regiões de contato real entre as superfícies.



Fonte : Adaptado de STACHOWIAK, BATCHELOR (2005).

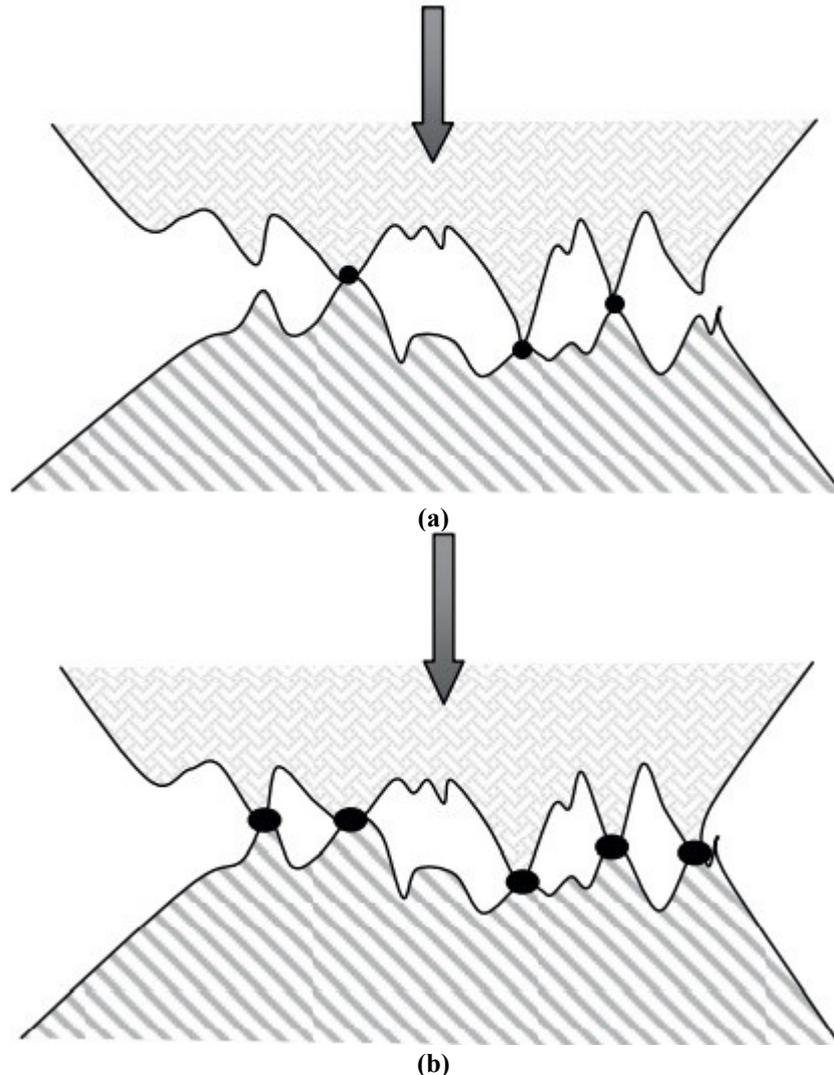
Quando ultrapassada a tensão de escoamento do material no topo das asperidades, tem-se início a deformação plástica localizada destas regiões, denominada de microdeformação plástica. Este processo resulta na ocorrência de dois fenômenos que competem entre si, o aumento na área real de contato por meio do achatamento das asperidades, que por sua vez tende a reduzir a pressão efetiva nestes pontos até valores abaixo da tensão de escoamento do material e o endurecimento do material por encruamento, que faz com que sejam necessárias pressões cada vez mais elevadas para que ocorra a deformação do material.

Deste modo, em casos em que há interesse no aumento da área destas regiões de contato, é desejável elevar a temperatura de trabalho, uma vez que o aumento da temperatura promove o alívio de tensões internas responsáveis pelo endurecimento do material por encruamento e favorecem também a ocorrência de processos como a deformação por fluência (REZVANIAN, ZIKRY, *et al.*, 2007).

Rezvanian, *et al.*, (2007) observa em seu estudo que a aplicação de uma elevada pressão inicial entre duas superfícies resulta na ampla deformação das asperidades em contato e que, com o passar do tempo, a pressão real nos pontos de contato vai sendo reduzida em virtude do aumento da área real de contato devido ao achatamento das asperidades. Aliado a redução da pressão real no topo das asperidades tem-se o endurecimento do material nestas regiões, por meio do fenômeno de encruamento. Desta forma, o autor observa que, mantida constante a força aplicada, há uma redução na taxa na qual a área real de contato aumenta ao longo do tempo. O autor ressalta ainda que o achatamento das asperidades de maior altura promove o

aumento da área real de contato não apenas por conta deste alargamento da seção transversal das asperidades, mas também pela formação de novas regiões de contato entre asperidades de menor tamanho, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Representação do aumento na área real de contato por meio do achatamento das asperidades e da formação de novos pontos de contato sob força de aplicação constante.. (a) Início da aplicação de força. (b) Após um determinado período de tempo.



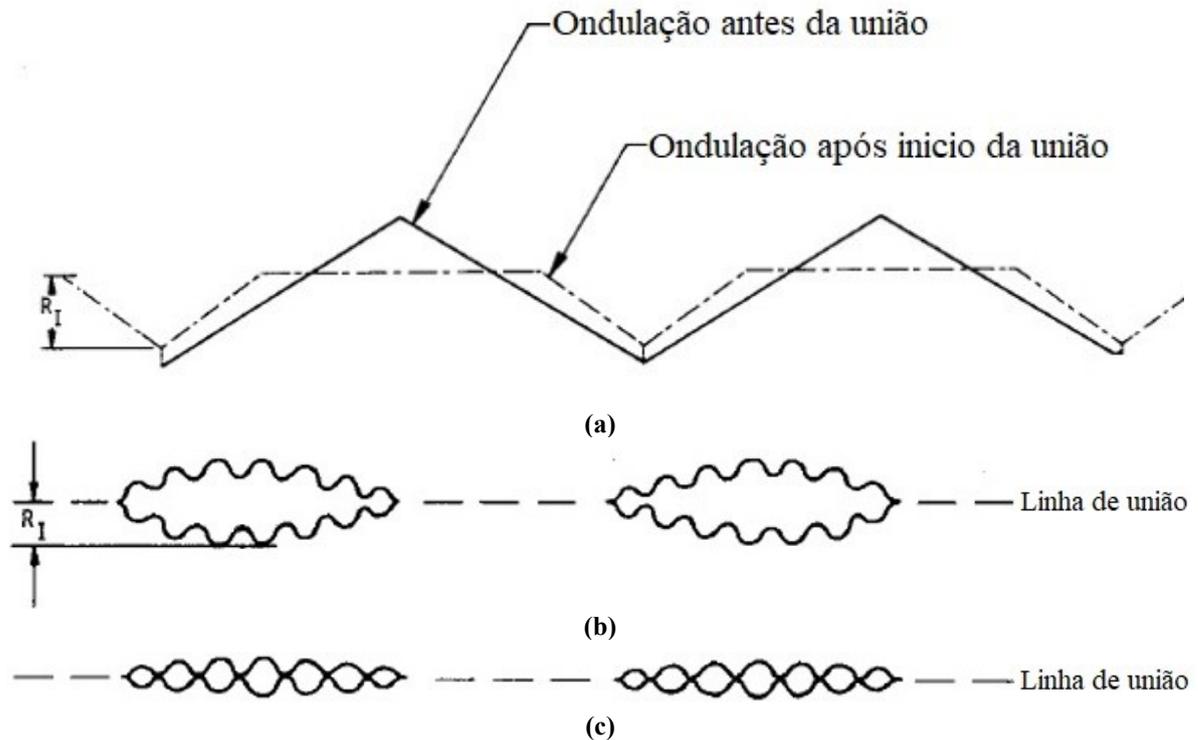
Fonte : Adaptado de TAKADOUM (2010).

Entretanto, não apenas a rugosidade tem impacto direto na qualidade final da união por difusão, a ondulação apresenta também forte influência. Garmong, *et al.* (1975) em seu trabalho estuda a obtenção do contato completo das interfaces durante a união por difusão e conclui que a presença da ondulação, componente de longo comprimento de onda da textura de superfície, tende a aumentar significativamente o tempo necessário para a união por difusão.

Em seu modelo, o autor supõe que nos instantes iniciais da união por difusão nem todas as asperidades estão em contato, mas sim apenas as asperidades presentes no topo das ondulações e também que a formação das regiões iniciais de contato metal-metal e

consequentemente dos vazios na interface ocorre primeiramente nas asperidades presentes no topo destas ondulações. A partir do momento em que estas ondulações são reduzidas, os vazios na interface diminuem e um número maior de asperidades entra em contato. Um esquema representando estes mecanismos é apresentado na Figura 10.

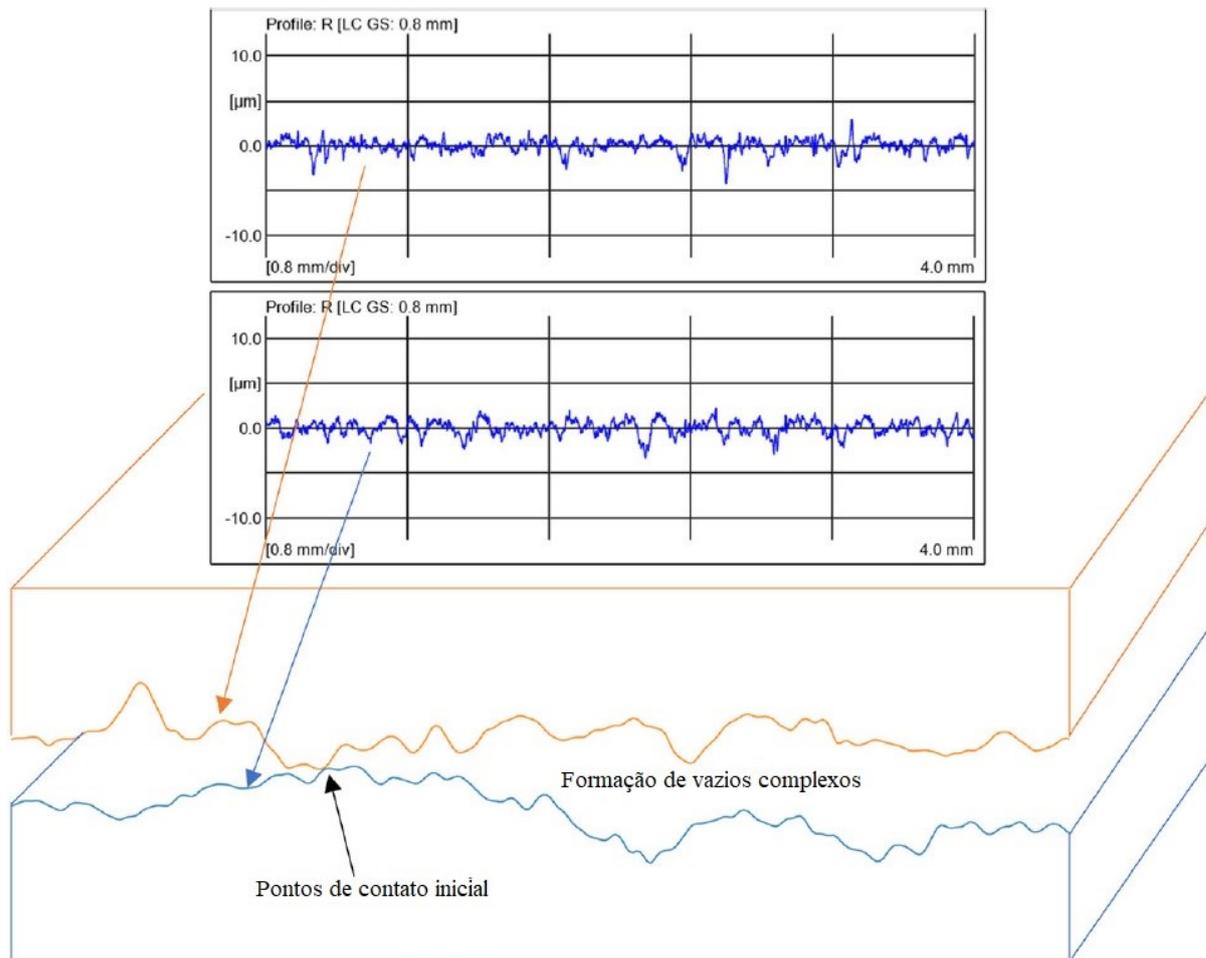
Figura 10 – Representação da formação dos contatos e vazios na linha de união. (a) Deformação do topo das ondulações. (b) Vazios formados nas regiões onde as ondulações não se tocam. (c) Achatamento das ondulações e aumento no número de asperidades em contato.



Fonte: Adaptado de GARMONG, PATON, et al (1975).

Ferguson & Ramulu (2019) discutem a geometria dos vazios formados na região de união e visam compreender como seu fechamento ocorre durante o processo. Os autores indicam que, duas superfícies ao serem colocadas em contato formam vazios cujas geometrias são complexas demais para serem descritas por meio de formas geométricas básicas, uma vez que as superfícies apresentam picos e vales distribuídos em intervalos randômicos. Uma representação desta região de contato baseada nos perfis de rugosidade de superfícies pode ser vista na Figura 11.

Figura 11 – Representação do contato baseado no perfil de rugosidade das superfícies.

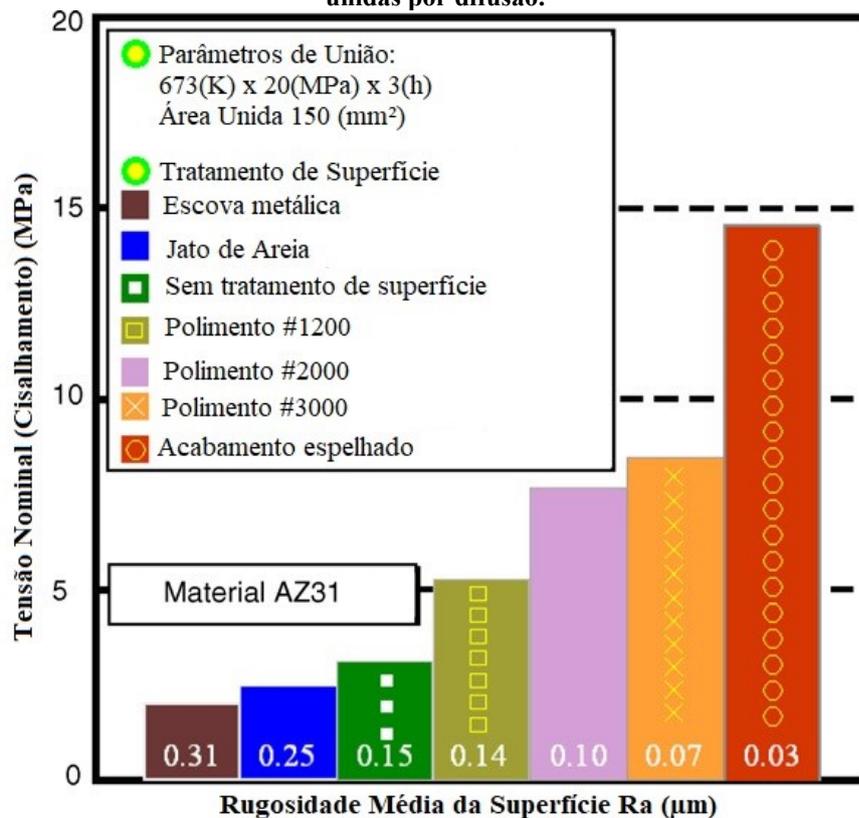


Fonte: Adaptado de FERGUSON, RAMULU (2019).

Contudo, apesar da evidente influência do acabamento de superfície na qualidade final do processo de união por difusão, não há um consenso entre os autores a respeito de como ocorre esta influência. Autores como, Peck (1969) Garmon, Paton, et al. (1975), Gietzel, Toth, et al. (2016), Ferguson, Ramulu (2019), dentre outros, indicam que superfícies com baixa rugosidade e livres de impurezas e sujidades são desejáveis na fabricação de uniões de elevada qualidade e em menor tempo para a grande maioria dos pares de união.

Neste contexto, Ziegelheim, Hiraki, *et al.* (2007) ao avaliarem a viabilidade da união por difusão em chapas da liga de magnésio AZ31 produziram amostras utilizando diversos métodos de acabamento de superfície e as uniram, mantendo os demais parâmetros de processo fixos. Desta forma, os autores observaram, conforme Figura 12, que acabamentos de superfície com valores menores de rugosidade média resultaram em um aumento na tensão de cisalhamento das amostras unidas.

Figura 12 - Avaliação da influência do acabamento de superfície na tensão de cisalhamento de amostra unidas por difusão.



Fonte: Adaptado de ZIEGELHEIM, HIRAKI, *et al.* (2007).

Para metais em que a camada de óxido é muito estável e insolúvel, a exemplo das ligas de alumínio, autores como Bottomley, Ginty (1991) e Zuruzy, Li, *et al.* (1999) observam que um aumento na rugosidade é capaz de promover um aumento na resistência mecânica dos dispositivos unidos por difusão e sugerem que este fenômeno pode ser causado por um aumento na deformação da ponta das asperidades e conseqüentemente a promoção da quebra localizada desta camada de óxido, aumentando a área de contato metal-metal.

Desta forma, Harvey, Partridge, *et al.* (1985) ressaltam que, dada a complexibilidade das interações resultantes da aproximação de duas superfícies reais e as diferentes propriedades de cada material e de suas camadas de óxido, a exemplo da dureza, espessura da camada, sua solubilidade na matriz metálica e estabilidade química, a otimização do acabamento de superfície deve ser realizada para cada conjunto estudado, levando em consideração tanto as características do material a ser unido, quanto a combinação dos parâmetros termomecânicos utilizados na união.

3.2. Corte via jato d'água abrasivo

O emprego do jato de água como ferramenta surge, na indústria americana, por volta da década de 70, entretanto, dadas as limitações do processo na época, suas principais aplicações eram limitadas ao corte de materiais de menor dureza como tecidos, madeira e alimentos congelados. Por volta dos anos 80, a técnica ganha espaço no setor industrial ao ser desenvolvido o uso do jato de água em altas pressões como meio de acelerar partículas abrasivas, combinando as técnicas de usinagem via jato abrasivo e usinagem via jato d'água, de forma a criar um processo único, capaz de sobressair-se em todas as limitações individuais do corte por jato d'água, aumentando drasticamente sua capacidade de corte e de remoção de material para materiais ainda mais duros e/ou de maior resistência. A técnica passa a ser chamada de corte via jato d'água abrasivo (*abrasive water jet machining - AWJM*). Atualmente, esta tecnologia compete em igualdade com a usinagem a feixe de laser, eletroerosão, fresamento, e outras tecnologias de usinagem (GUPTA, JAIN, *et al.*, 2017).

O corte via jato d'água abrasivo é um processo de usinagem não convencional onde partículas abrasivas de elevada dureza, a exemplo da alumina, carbeto de silício, *Garnet* e outros, são aceleradas por meio de um jato d'água em alta velocidade. Estas partículas com elevada energia cinética colidem contra a superfície alvo e promovem a remoção de material por meio do processo de erosão (MOMBER, KOVACEVIC, 1998, NATARAJAN, MURUGESAN, *et al.*, 2020, SUPRIYA, SRINIVAS, 2018).

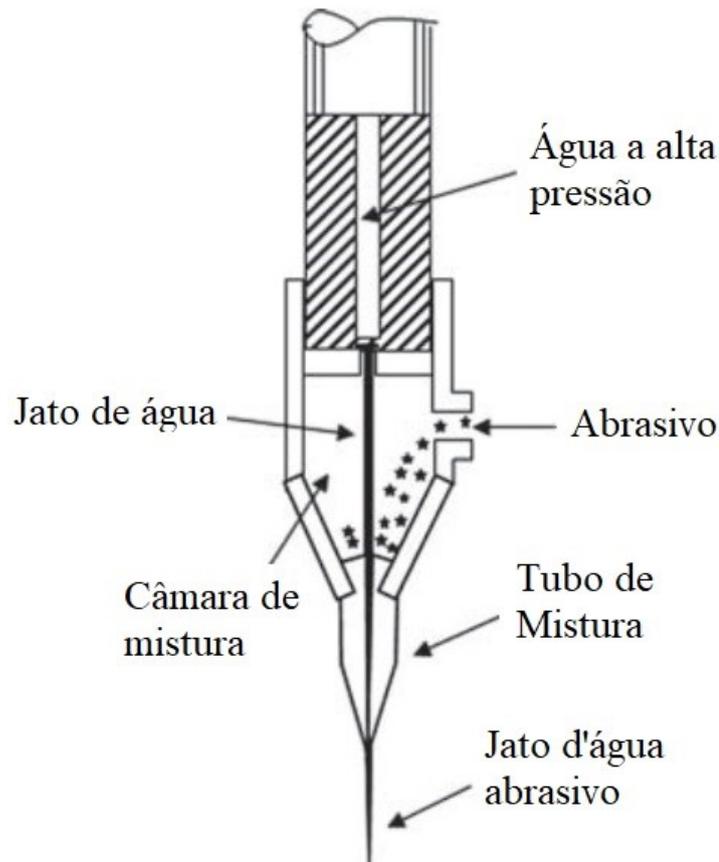
Conforme Johnston (2018), o equipamento utilizado no corte via jato d'água abrasivo consiste comumente de nove sistemas, que atuam de forma a pressurizar a água, misturar as partículas abrasivas ao jato pressurizado e direcioná-lo à superfície alvo. Estes sistemas são citados individualmente abaixo:

- Unidade hidráulica;
- Intensificador;
- Linhas de transmissão de água;
- Válvula liga/desliga;
- Bocal de saída do jato d'água abrasivo;
- Tanque de amortecimento;
- Sistema de filtros;

Este conjunto de sistemas é comum para os processos de corte via jato d'água com ou sem o uso de abrasivos, diferenciando-se pela presença de um mecanismo de alimentação e

mistura de abrasivo na região do bocal de saída quando se trata do corte via jato d'água com abrasivo. Estes mecanismos podem ser vistos no esquema apresentando na Figura 13, em que o abrasivo é puxado para dentro da câmara de mistura por meio da diferença de pressão criada com a passagem do jato d'água em altas velocidades.

Figura 13 – Esquema representando o bocal utilizado em equipamentos para corte via jato d'água abrasivo.



Fonte: Adaptado de GUPTA, JAIN, *et al* (2017).

Dentre as inúmeras vantagens que tornam esta tecnologia competitiva, destaca-se a capacidade de cortar uma gama diversificada de materiais sem a necessidade de grandes mudanças no equipamento utilizado, sendo possível utilizar um mesmo equipamento no corte de materiais metálicos, cerâmicos e compósitos. Outras vantagens podem ser destacadas como o corte de multicamadas em um único passe, corte de geometrias complexas, a ausência de grandes distorções térmicas e mecânicas nas regiões próximas ao corte, a precisão dimensional obtida, a facilidade de automação deste processo, dentre outras. (JOHNSTON, 2018, NATARAJAN, MURUGESAN, *et al.*, 2020).

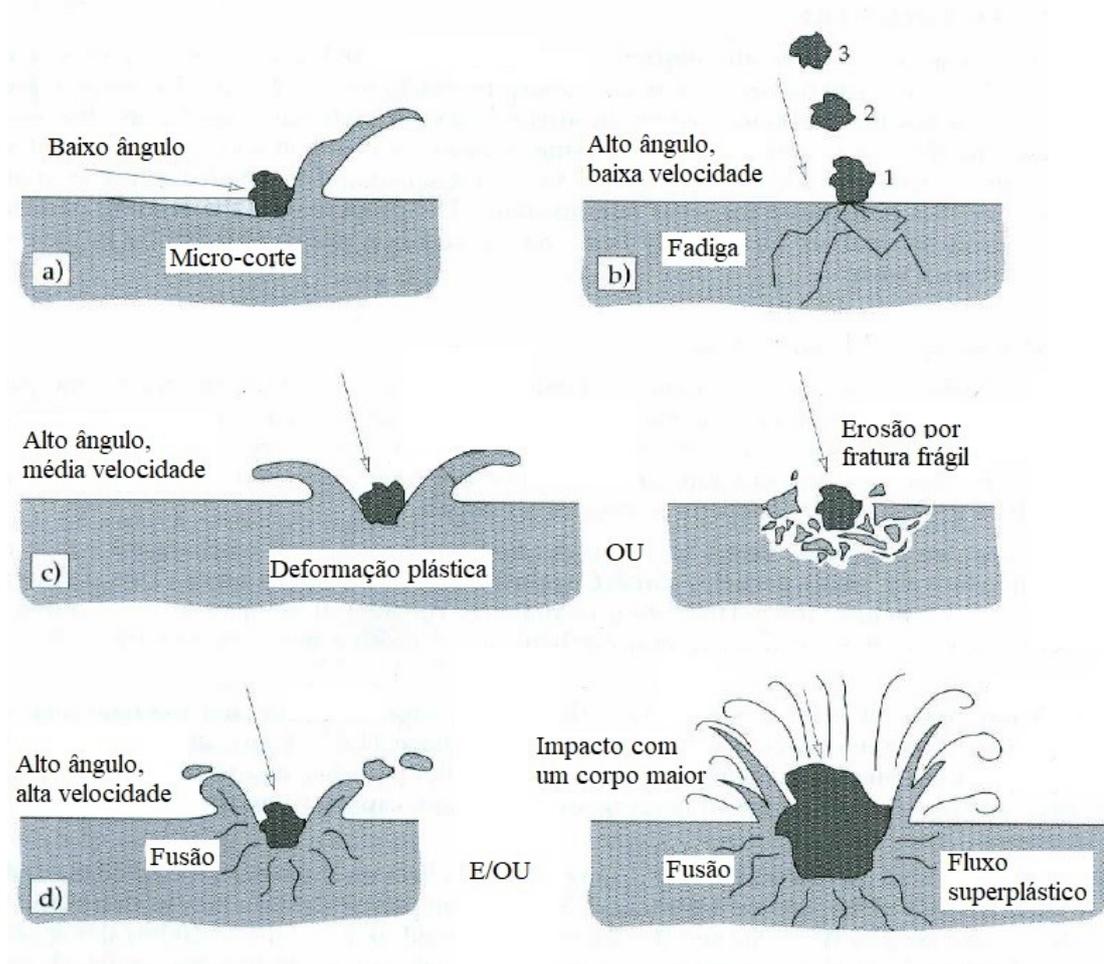
Entretanto, apesar da ampla utilização do AWJ, esta tecnologia ainda apresenta alguns desafios para aplicação, como a seleção correta de parâmetros de corte, a geometria/composição do material alvo e/ou a limitações do processo. Dentre os desafios associados a esta tecnologia, Natarajan *et al.*, (2020) cita em seu trabalho a contaminação do material alvo por incrustação de partículas abrasivas, a formação de estrias e perda de geometria a depender da profundidade do corte, a qualidade final alcançada nas superfícies usinadas, a baixa taxa de remoção de material, entre outros. Desta forma, de modo a controlar e amenizar diversos destes desafios, torna-se essencial o estudo e a seleção correta dos parâmetros de corte a serem utilizados em cada aplicação.

3.2.1. Mecanismos de remoção de material

Ao tratar-se do corte via jato d'água abrasivo, o principal mecanismos de remoção de material atuante é a erosão, a qual pode ser definida como a remoção de material de uma superfície por meio da colisão sucessiva de partículas contra um sólido. Neste processo, a remoção de material pode ocorrer de inúmeras formas, as quais são comumente divididas em dois grupos: erosão em materiais dúcteis e frágeis (BITTER, 1963, HUTCHINGS, 1993, MORIDI FARIMANI, 2010, STACHOWIAK, BATCHELOR, 2005).

Na erosão em materiais dúcteis, os principais mecanismos envolvidos são o micro sulcamento, o micro corte, e a deformação plástica. Entretanto, dependendo de fatores como a velocidade das partículas e o ângulo de incidência, pode-se induzir o endurecimento do material na região de impacto do abrasivo, favorecendo a ocorrência de mecanismos frágeis de remoção, como fadiga, fratura frágil e fusão localizada. Na Figura 14 observam-se alguns destes mecanismos em conjunto com as condições de velocidade de partícula e ângulo de incidência que os favorecem (HUTCHINGS, 1993, WANG, Yu Fei, YANG, 2008).

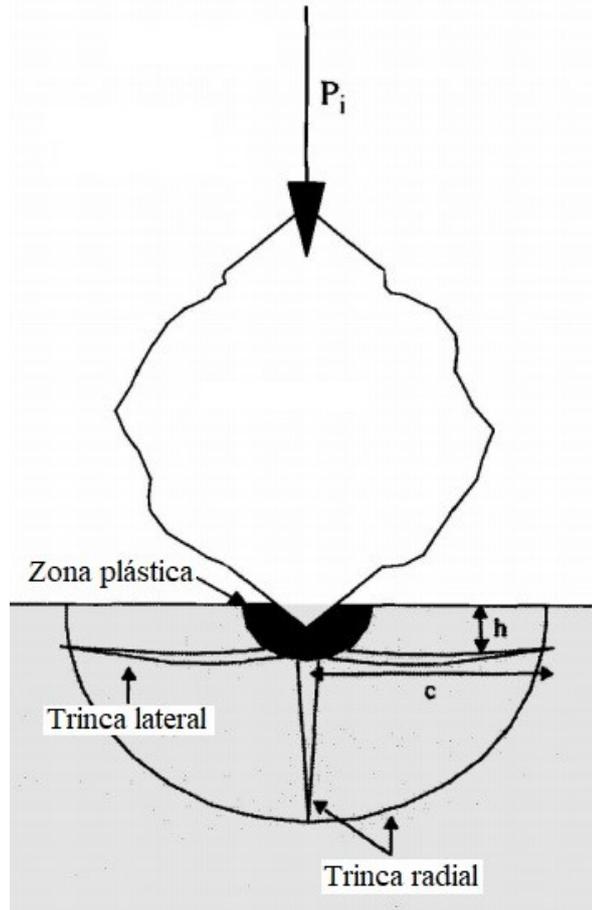
Figura 14 – Possíveis mecanismos de erosão. (a) Baixo ângulo de impacto. (b) Alto ângulo e baixa velocidade de impacto. (c) Alto ângulo e velocidade média de impacto. (d) Alto ângulo e alta velocidade de impacto para diferentes tamanhos de partícula.



Fonte: Adaptado de STACHOWIAK, BATCHELOR (2005).

Quando observada a erosão em materiais frágeis, predominam os fenômenos de iniciação e propagação de trincas e de micro-fissuras, conforme observado na Figura 15. Entretanto, apesar desta divisão, os mecanismos envolvidos no processo de erosão podem ocorrer de forma simultânea, de modo que a predominância de um ou outro está associada a fatores como o ângulo de incidência e velocidade das partículas, dureza e ductilidade do material alvo, dentre outros.

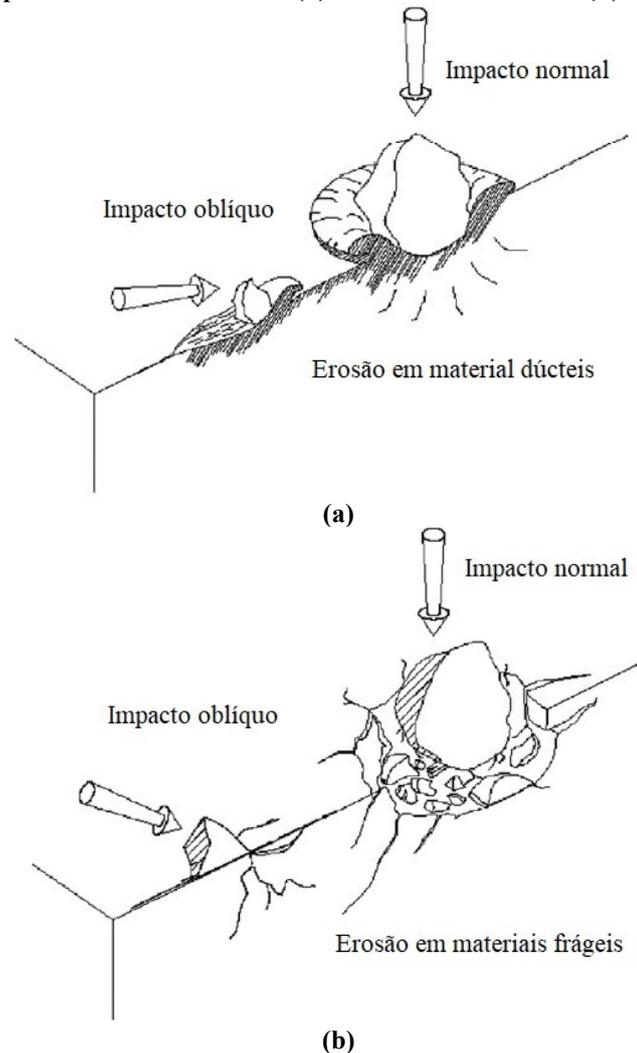
Figura 15 - Mecanismos de remoção de material no processo de erosão de materiais frágeis.



Fonte: Adaptado de BUIJS (1994).

Deste modo, a integridade da superfície do material alvo após o corte via jato d'água abrasivo está diretamente ligada aos mecanismos envolvidos na erosão do material alvo e a forma como estes interagem durante o processo. Um exemplo desta diferença pode ser observado na Figura 16, em que a remoção de material por erosão em materiais dúcteis favorece a formação de rebarbas próximas a região de impacto, enquanto em materiais frágeis há a presença de fratura e trincas no material.

Figura 16 - Representação dos mecanismos de remoção de material por erosão e seu impacto na integridade da superfície do material alvo. (a) Em materiais dúcteis. (b) Em materiais frágeis.

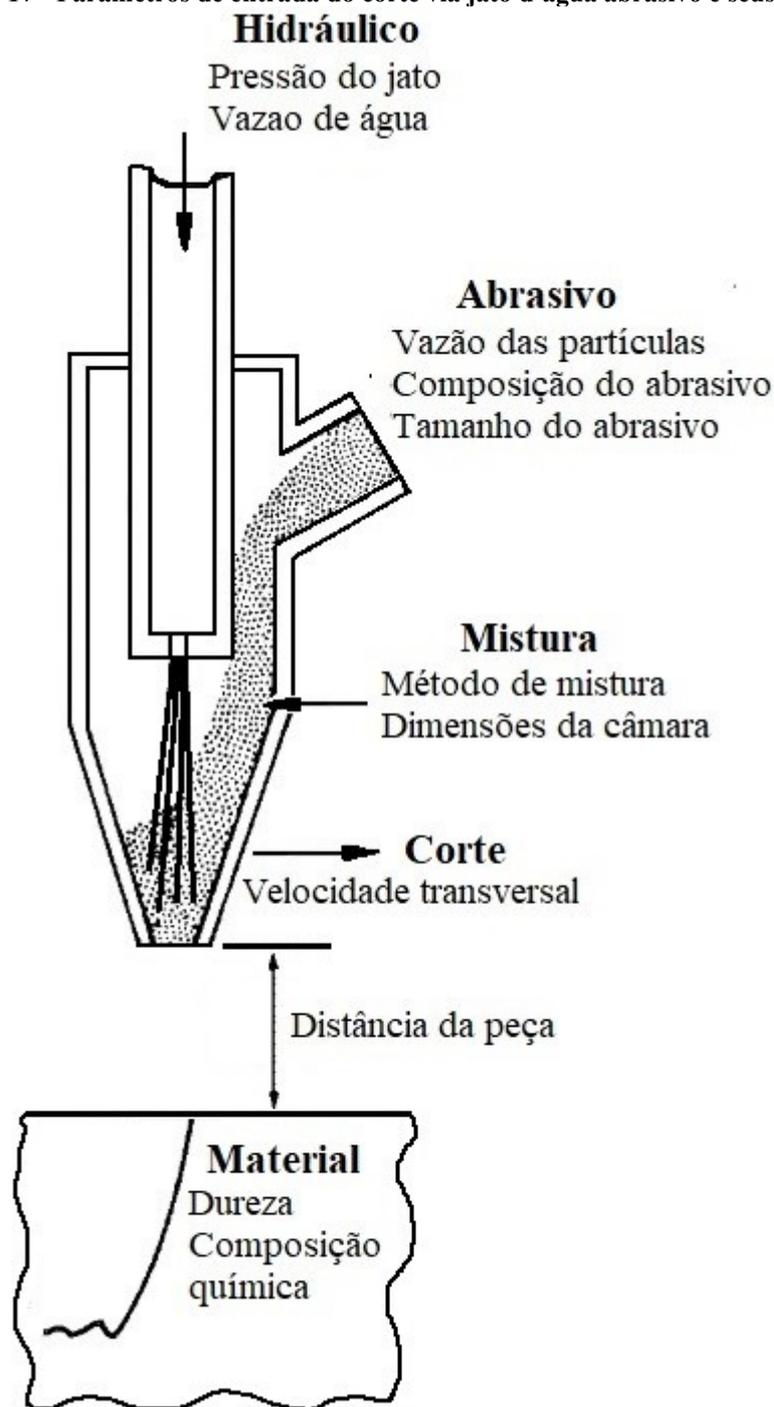


Fonte: Adaptado de WANG, YANG (2008).

3.2.2. Parâmetros de corte

O processo de corte via jato d'água abrasivo apresenta um amplo número de parâmetros de corte, os quais determinam a eficiência, custo e qualidade de todo o processo. Estes parâmetros são conhecidos como parâmetros de entrada e são comumente divididos em quatro grandes grupos, Hidráulico, Abrasivo, Mistura e Corte (MOMBER, KOVACEVIC, 1998). Diversos autores, como Hashish (1984) e Rozario Jegaraj & Ramesh Babu (2007) apresentam ainda um quinto grupo, nomeado como material, visto a relevância das propriedades do material alvo na qualidade final do processo. Uma representação destes cinco grandes grupos e de alguns dos parâmetros que os constituem pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Parâmetros de entrada do corte via jato d'água abrasivo e seus grupos.

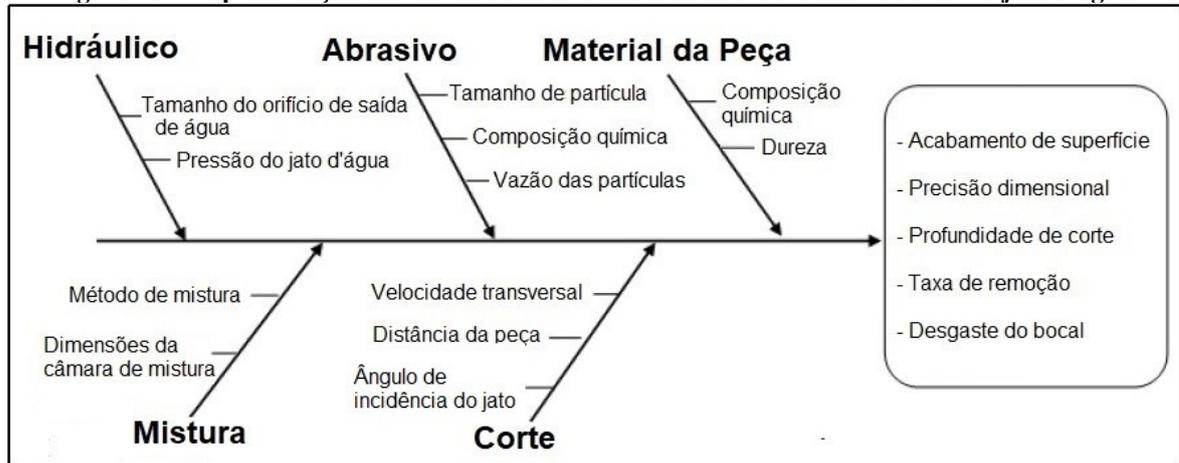


Fonte: Adaptado de HASHISH (1984).

A partir da seleção destes parâmetros pode-se alcançar, com um mesmo equipamento, resultados de corte amplamente distintos. Desta forma, de modo a avaliar a influência de cada um destes e permitir a seleção do conjunto otimizado de parâmetros para cada aplicação, torna-se essencial a definição de variáveis de saída do processo, as quais são utilizadas como critério para classificar a eficiência e qualidade do corte. Assim, para classificar a eficiência do processo

são comumente avaliados o acabamento de superfície, a profundidade de corte, a taxa de remoção de material e a precisão geométrica (RAJYALAKSHMI, SURESH BABU, 2016). Na Figura 18 são apresentados em conjunto alguns parâmetros de entrada e saída envolvidos no processo de corte via jato d'água abrasivo.

Figura 18 – Representação das variáveis de entrada e saída envolvidas no corte via jato d'água.



Fonte: Adaptado de RAJYALAKSHMI, SURESH BABU (2016).

3.2.2.1. Velocidade transversal

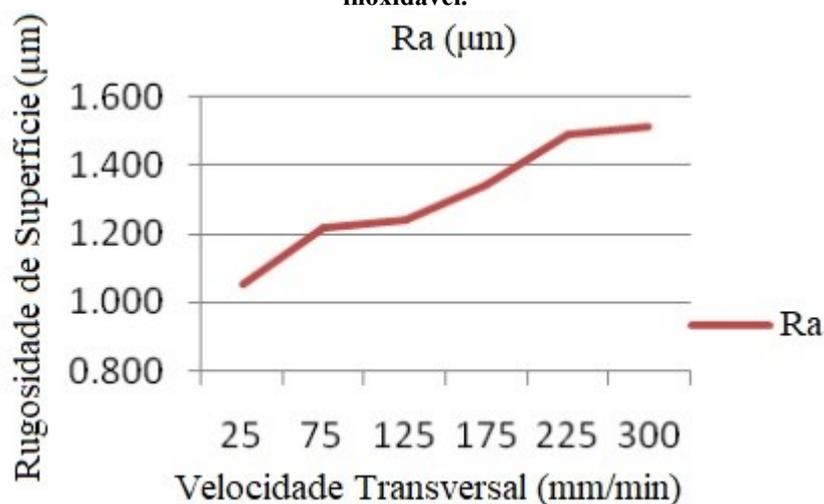
Denomina-se velocidade transversal a velocidade na qual o bico de corte desloca-se em relação ao material a ser cortado, sendo comumente apresentada em mm/min. Desta forma, este parâmetro determina o tempo no qual cada ponto da superfície será exposto ao jato d'água abrasivo e, por conseguinte, apresenta grande influência, tanto na qualidade do acabamento de superfície, quanto na profundidade do corte (NATARAJAN, MURUGESAN, *et al.*, 2020). Neste contexto, Duspara, *et al.* (2018) ao analisarem as regiões criadas pelo corte via jato d'água abrasivo em aço inoxidável austenítico 316L concluíram, por meio da análise de variância (ANOVA), que o parâmetro velocidade transversal apresentou a maior influência na qualidade da superfície final das regiões de corte.

Visto a relevância do parâmetro velocidade transversal e o uso crescente da tecnologia de corte via jato d'água abrasivo pela indústria, diversos trabalhos foram realizados na busca de compreender as relações entre a velocidade transversal e os parâmetros de saída, como acabamento de superfície, profundidade de corte, entre outros. Kovacevic *et al.* (1991) observaram em seus estudos que o aumento na velocidade transversal de corte proporciona um aumento da rugosidade de superfície nas faces usinadas., Mutavgjic *et al.* (2011) avaliam a influência de diversos fatores como a pressão do jato, distância entre o bocal e a peça e velocidade transversal em amostras de alumínio e aço inoxidável e reforça a conclusão de que

um aumento da velocidade transversal está associado a um aumento na rugosidade da superfície das amostra.

Badgujar & Rathi (2014) e Löschner, *et al.* (2016) encontraram resultados semelhantes quando avaliada a rugosidade da superfície gerada pelo corte via do jato d'água abrasivo em aços inoxidáveis austeníticos, 304 e 316L respectivamente, e dão suporte à conclusão que, conforme a velocidade transversal é aumentada, aumenta-se também a rugosidade na região do corte, aumentando consideravelmente os parâmetros de rugosidade Ra, Rz, Rt e Rq e diminuindo significativamente a qualidade final do corte. Os resultados de rugosidade observados por Badgujar & Rathi. (2014), quando variada a velocidade transversal, são expostos na Figura 19.

Figura 19 - Resultados obtidos a partir da variação da velocidade transversal em amostras de aço inoxidável.



Fonte: Adaptado de BADGUJAR, RATHI (2014).

Este comportamento descrito anteriormente é verificado também para diversos outros materiais, conforme observaram Chithirai Pon Selvan, *et al.* (2012) e Begic-Hajdarevic, Cekic, *et al.* (2015) no corte via jato d'água de alumínio e Kashyap (2019) no corte de amostras em cobre.

Estes resultados são esperados, uma vez que, conforme indicado por Wang, J., Wong (1999), ao aumentar a velocidade transversal, reduz-se o tempo em que o jato d'água age sobre cada ponto da peça, de modo que um número menor de partículas abrasivas atinge cada ponto do corte, resultando no aumento de rugosidade observado.

Entretanto, a redução da velocidade transversal de corte vem associada à redução de produtividade e ao aumento no custo do processo, por fatores como a necessidade de tempos de corte maiores, aumento no uso de consumíveis, energia, desgaste do equipamento e outros,

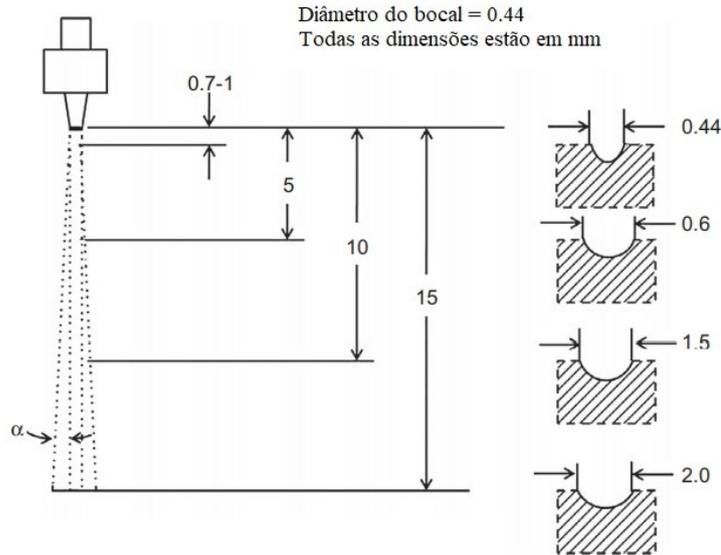
o que torna necessário a otimização deste parâmetro de forma a atender as especificações de corte mantendo a produtividade e o custo em um patamar competitivo.

Desta forma, baixas velocidades de corte permitem que um maior número de partículas colida com a superfície alvo, resultando em um melhor acabamento de superfície e possibilitando maiores profundidades de corte. Assim, velocidades baixas de corte são indicadas na usinagem de peças que não passarão por processos de acabamento posteriores, ou seja, na fabricação de componentes acabados por meio do corte via jato d'água abrasivo. Na fabricação de peças em que são necessário processos de usinagem posteriores, indica-se o uso de velocidades de corte maiores, uma vez que o acabamento de superfície logo após o corte não terá grande influência no produto final. Desta maneira, velocidades maiores de corte permitem a redução do tempo de corte, aumentando assim a produtividade e reduzindo os custos do processo (LÖSCHNER, JAROSZ, *et al.*, 2016, NATARAJAN, MURUGESAN, *et al.*, 2020).

3.2.2.2. Distância entre o bocal e a peça

É definida como a distância entre o bocal de saída do jato e o material alvo, sendo comumente mantida constante em aplicações industriais, visto sua forte influência não apenas sobre o perfil de corte, como pode ser visto na Figura 20, mas também na qualidade final do corte. Desta forma, o estudo deste parâmetro torna-se extremamente relevante na fabricação de dispositivos que exijam cortes de maior precisão dimensional e acabamentos de superfície de maior qualidade. (NATARAJAN, MURUGESAN, *et al.*, 2020).

Figura 20 - Esquema representando a influência da distância entre o bocal e a peça no perfil de corte.

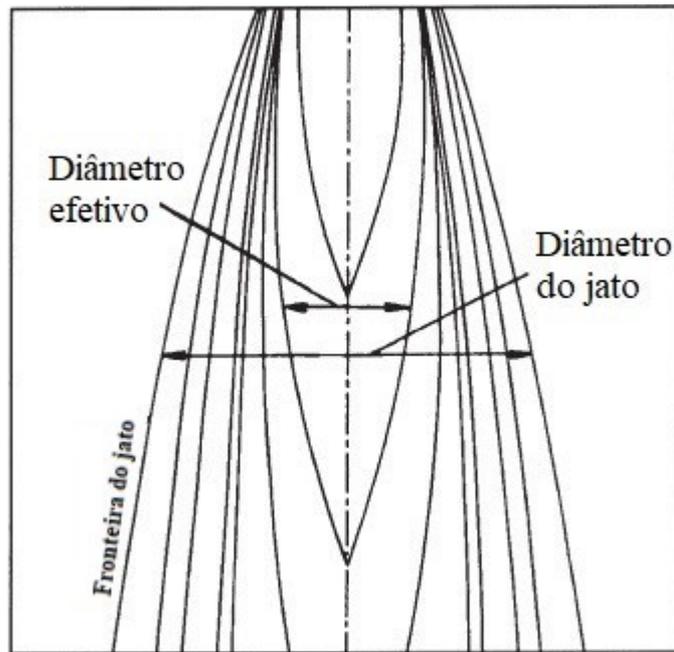


Fonte: Adaptado de BHATTACHARYYA, DOLOI (2020).

Selvan & Raju (2012) investigaram a usinabilidade do aço inoxidável austenítico 304 por meio do corte via jato d'água e concluem que, a redução da distância entre o bocal e a peça promove um acabamento de superfície de maior qualidade na região de corte e, por isso, os autores indicam o uso de baixas distâncias quando se fazem necessários acabamentos de superfície de maior qualidade. Os autores avaliam ainda a influência deste parâmetro na profundidade de corte e concluem que conforme a distância aumenta, a profundidade de corte diminui.

Por sua vez, Badgujar & Rathi (2014) obtiveram resultados semelhantes em seus estudos, ao avaliarem a rugosidade resultante do corte via jato d'água abrasivo de aço inoxidável austenítico 304 e inferem que distâncias maiores estão associadas a um menor diâmetro efetivo do jato, uma vez que ao sair do bico de corte o jato diverge, gerando o seu espalhamento, e reduzindo seu diâmetro efetivo. Uma representação deste comportamento pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 - Diminuição do diâmetro efetivo do jato em virtude do fenômeno de espalhamento.



Fonte: Adaptado de HASHISH, M., DU PLESSIS (1979).

Hu, *et al.* (2016) avaliaram o corte via jato d'água abrasivo com adição de polímeros e observaram o mesmo comportamento, em que o aumento na distância entre o bocal e a peça resultou em um aumento na rugosidade, ou seja, na redução da qualidade do corte. Em acordo com os trabalhos citados anteriormente, os autores associaram esta tendência a maior convergência do jato quanto menor a distância até a peça.

3.2.2.3. Pressão do jato d'água

Frequentemente descrito em MPa ou PSI, a pressão do jato d'água utilizada no processo de corte é um parâmetro de grande relevância, uma vez que este parâmetro define a energia cinética do processo e conseqüentemente a velocidade na qual as partículas abrasivas serão aceleradas. Desta forma, define-se o limite mínimo de pressão do jato como sendo o menor valor para que haja remoção de material, buscando-se trabalhar com valores a partir dos quais a remoção de material ocorra de forma efetiva e eficiente (NATARAJAN, MURUGESAN, *et al.*, 2020).

Dentre os diversos parâmetros envolvidos no processo de corte via jato d'água abrasivo e que apresentam efeito na usinabilidade dos aços inoxidáveis, Supriya & Srinivas (2018) observaram que a pressão hidráulica é considerada por diversos autores como um dos parâmetros de maior influência no processo, impactando não apenas a qualidade final das superfícies, mas também a profundidade de corte.

Hashish (1989) ao avaliar a influência da pressão no processo de corte via jato d'água abrasivo, observou fatores como desgaste do bico de corte e do tubo de mistura, coerência do jato d'água, taxa de quebra das partículas abrasivas, profundidade de corte, acabamento de superfície e outros. Em seu trabalho, o autor concluiu que a seleção de pressões elevadas tem efeito positivo na profundidade de corte, bem como na redução da ondulação da superfície. Entretanto, fatores como a coerência do jato e o desgaste do tubo de mistura e do orifício de saída são negativamente afetados. Desta forma, a otimização da pressão deve ser realizada de acordo com as exigências de cada aplicação, levando em consideração os parâmetros de saída que devem ser atingidos.

Kovacevic (1991) avaliou em seu trabalho o efeito da variação de diversos parâmetros do processo de corte via jato d'água abrasivo como, pressão do jato, taxa de alimentação do abrasivo, tamanho do abrasivo, velocidade transversal, entre outros, na textura da superfície gerada através, e concluiu que o aumento da pressão do jato resulta em uma superfície com menor rugosidade. Wang, J., Wong (1999) obtiveram resultados semelhantes ao avaliar o uso do jato d'água abrasivo no corte de chapas de aço com recobrimento metálico, e inferiram que com o aumento da pressão do jato aumenta-se o diâmetro efetivo de corte, o que por consequência aumenta o tempo em que um ponto está sujeito ao impacto das partículas abrasivas, reduzindo assim a rugosidade da superfície.

Neste contexto, Chithirai Pon Selvan *et al.* (2012) ao avaliarem a influência dos parâmetros de processo na qualidade de superfície após o corte via jato d'água de amostras de

alumínio, verificaram a diminuição considerável na rugosidade média (R_a) quando aumentada a pressão do jato d'água. Os autores ressaltam que, com o aumento da pressão do jato, as partículas abrasivas são fraturadas, por apresentarem elevada dureza e baixa ductilidade, diminuindo seu tamanho, o que por sua vez resulta em um melhor acabamento de superfície.

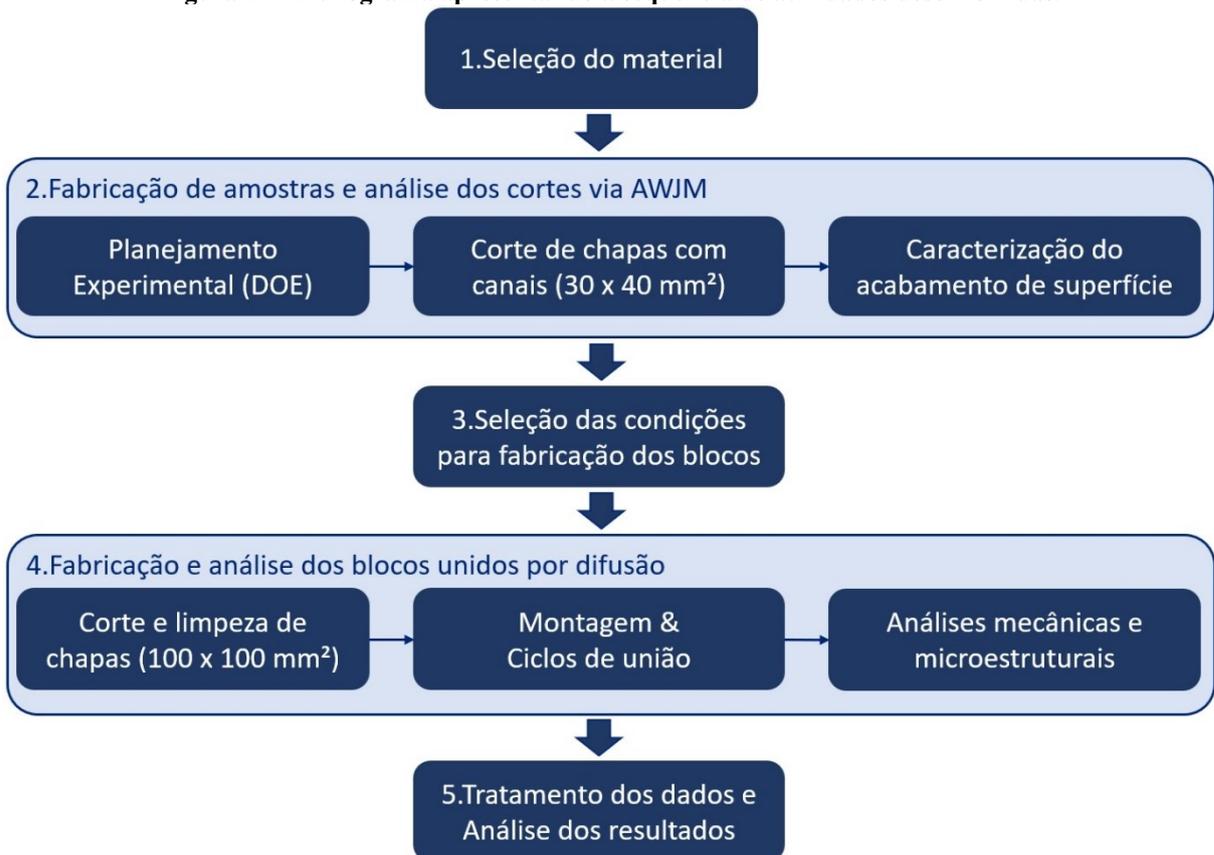
Perec, Pude, *et al.* (2017) buscaram obter em seu trabalho uma determinada rugosidade de superfície por meio da otimização dos parâmetros de corte baseado em modelos matemáticos e concluíram que a pressão do jato é o parâmetro de controle que mais impacta nos valores de rugosidade máxima ($R_{máx}$) e a altura máxima (R_z) da superfície gerada no corte. Os autores ressaltam ainda que ao aumentar a energia cinética das partículas abrasivas, é possível melhorar o nível de acabamento da superfície das regiões inferiores do corte, onde comumente obtém-se os piores acabamentos.

Deste modo, a partir dos conhecimentos adquiridos ao longo da revisão bibliográfica, propôs-se no presente trabalho a avaliação do impacto dos parâmetros, velocidade de avanço, distância entre o bocal e a peça e pressão do jato no acabamento de superfície de chapas de aço inoxidável austenítico 316L cortadas via jato d'água abrasivo. Visto a aplicação deste processo no corte de chapas com canais para a manufatura de trocadores de calor compactos, deu-se enfoque a análise da superfície nas faces de entrada e saída do jato, de modo a identificar posteriormente a influência do corte via jato d'água abrasivo na qualidade de dispositivos unidos por difusão. Neste contexto, são expostas a seguir as atividades desenvolvidas para produção deste trabalho.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho faz parte do escopo de um projeto de parceria entre o Laboratório de Tubos de Calor (LABTUCAL) do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina e a PETROBRAS. Um esquema sequencial das atividades práticas propostas está descrito nesta seção, bem como pode ser observado um resumo destas atividades no fluxograma apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Fluxograma apresentando a sequência de atividades desenvolvidas.



Fonte: Autor.

4.1. Seleção do material

No desenvolvimento deste trabalho foram adquiridas chapas de aço inoxidável AISI 316L, cuja composição química padrão é apresentada na Tabela 1. O termo L indica que o teor de carbono presente na liga é mantido abaixo de 0,03 em peso, visando desta forma evitar a ocorrência de fenômenos como a sensitização do material durante as etapas de fabricação. As chapas foram compradas nas espessuras de 1 e 3 mm e dimensões de 1240 x 2000 mm², com acabamento de superfície tipo 2B.

Tabela 1 - Composição química padrão para o aço inoxidável 316L (% em peso).

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu
316L	0.030	2.00	0,05	0.030	0.75	16.0 - 18.0	10.0 - 14.0	2.0 - 3.0	0.10	...

Fonte: ASTM A240 (2004).

Conforme norma NBR 6361 DEZ/1984 para chapas e tiras de aço inoxidável, o acabamento tipo 2B consiste na realização do processo de laminação a frio seguido de tratamento térmico de recozimento e decapagem, sendo o processo finalizado em um último passe a frio em cilindros polidos de modo a deixar a superfície com aspecto brilhante. De modo a melhor controlar a matéria prima utilizada, foram definidas também especificações como a aplicação de película protetiva do tipo PVC em ambas as faces das chapas para proteção durante o transporte e manuseio das chapas, a necessidade do atendimento das normas ASTM A240/240M e A480/480M e o envio do certificado de análise da usina por lote de produção contendo as informações descritas abaixo:

- Análise de composição química;
- Propriedades mecânicas (dureza, limite de resistência máxima, limite de escoamento e alongamento);
- Tamanho de grão;
- Resistência à corrosão intergranular;
- Caracterização do acabamento da superfície entregue.

4.2. Fabricação de amostras para avaliação dos parâmetros de corte via jato d'água abrasivo

No intuito de avaliar a integridade de superfície das chapas após o processo de corte via jato d'água abrasivo e de minimizar os impactos desta etapa na qualidade final das uniões, buscou-se inicialmente a otimização dos parâmetros de corte, sendo estudados no presente

trabalho três parâmetros, a velocidade transversal, a distância entre o bocal e a peça e a pressão do jato.

A combinação dos parâmetros definidos foi realizada a partir da montagem de um DoE (*Design of Experiments*) fatorial do tipo 2^k com ponto central, permitindo que, ao final do experimento seja realizada a seleção de um conjunto de parâmetros adequados para a fabricação de chapas para a união por difusão de acordo com os critérios estabelecidos de qualificação dos cortes, sendo estes o acabamento de superfície, o tamanho da rebarba formada e a tolerância geométrica dos cortes.

Para a construção do DoE 2^k fatorial com ponto central foram definidos dois níveis de intensidade para cada um dos três parâmetros a serem estudados, sendo os valores definidos com base em estudos prévios encontrados na literatura e nos limites de operação do equipamento. O modelo prevê ainda o cálculo de pontos centrais, sendo estes a média dos níveis selecionados anteriormente. Um resumo dos parâmetros utilizados neste trabalho é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros e valores avaliados.

Parâmetros	-a	a	Ponto Central
Velocidade de Avanço (mm/min)	125	350	234
Pressão do Jato (MPa)	150	340	245
Distância entre o bocal e a peça (mm)	1,5	3	2,25

Fonte: Autor.

Desta maneira, conforme apresentado na Tabela 3, foram definidas quinze condições de corte, sendo que para cada uma delas fabricou-se uma amostra nas dimensões 40 x 30 mm² com três canais internos de 3 x 30 mm² nas chapas de 3 mm de espessura, simulando a geometria utilizada na manufatura de um trocador de calor real.

Tabela 3 - Condições especificadas para a avaliação dos diversos conjuntos de parâmetros de corte.

Combinação	Velocidade de avanço (mm/min)	Pressão do jato (MPa)	Distância entre o bocal e a peça (mm)
1	125	150	1,5
2	350	150	1,5
3	125	340	1,5
4	350	340	1,5
5	125	150	3
6	350	150	3
7	125	340	3
8	350	340	3
Ponto Central			
0	234	245	2,25
Pontos Axiais			
9 (-a,0,0)	125	245	2,25
10 (a,0,0)	350	245	2,25
11 (0,-a,0)	234	150	2,25
12 (0,a,0)	234	340	2,25
13 (0,0,-a)	234	245	1,5
14 (0,0,a)	234	245	3

Fonte: Autor.

O corte das amostras foi realizado em equipamento de corte via jato d'água abrasivo modelo Flow Waterjet, M2c 2030, disponível no LABTUCAL, sendo utilizado abrasivo do tipo Garnet #80 Mesh da marca Zirtec. Algumas características referentes as configurações do equipamento e ao abrasivo utilizados podem ser vistas respectivamente nas Tabela 4 e Tabela 5. As configurações foram mantidas fixas durante o corte de todas as amostras.

Tabela 4 - Parâmetros do equipamento de corte via jato d'água abrasivo utilizados na fabricação das amostras.

Parâmetro	Dimensão
Diâmetro do orifício	0,3 mm
Material do orifício	Rubi
Diâmetro de saída do bico de mistura	1,0 mm
Diâmetro do jato na saída	1,3 mm
Ângulo de incidência do jato	90°
Tipo de abrasivo	Garnet #80 Mesh
Taxa de alimentação de abrasivo	360 g/min

Fonte: Autor.

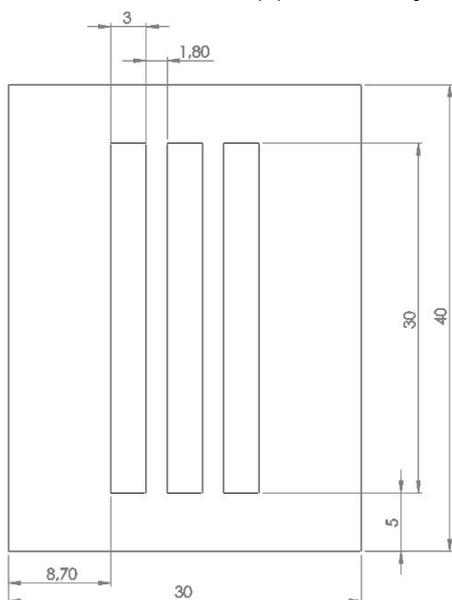
Tabela 5 - Composição padrão do garnet distribuído pela empresa Zirtec (% em peso).

Garnet	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cloretos	Sais Solúveis
% Peso	21.0	31.0	35.0	8.0	1.5	1.0	0.05	0.5	<50 ppm	<100 ppm

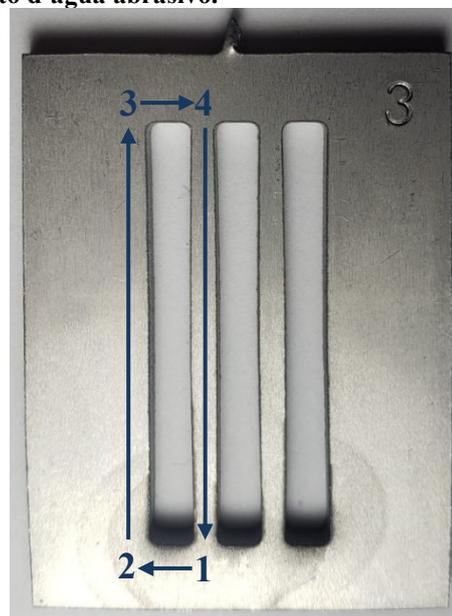
Fonte: Zirtec (2022).

A representação das dimensões utilizadas na fabricação das amostras pode ser vista na Figura 23 (a), enquanto na Figura 23 (b) é apresentada uma amostra real após o processo de corte, onde as setas indicam o caminho percorrido pelo jato d'água. Deste modo, o corte tem início no ponto 1, onde ocorre a perfuração do material, e em seguida o jato é deslocado sobre demais pontos.

Figura 23 – Desenho técnico das amostras fabricadas via jato d'água. (a) Dimensões da amostra. (b) Amostra após o corte via jato d'água abrasivo.



(a)



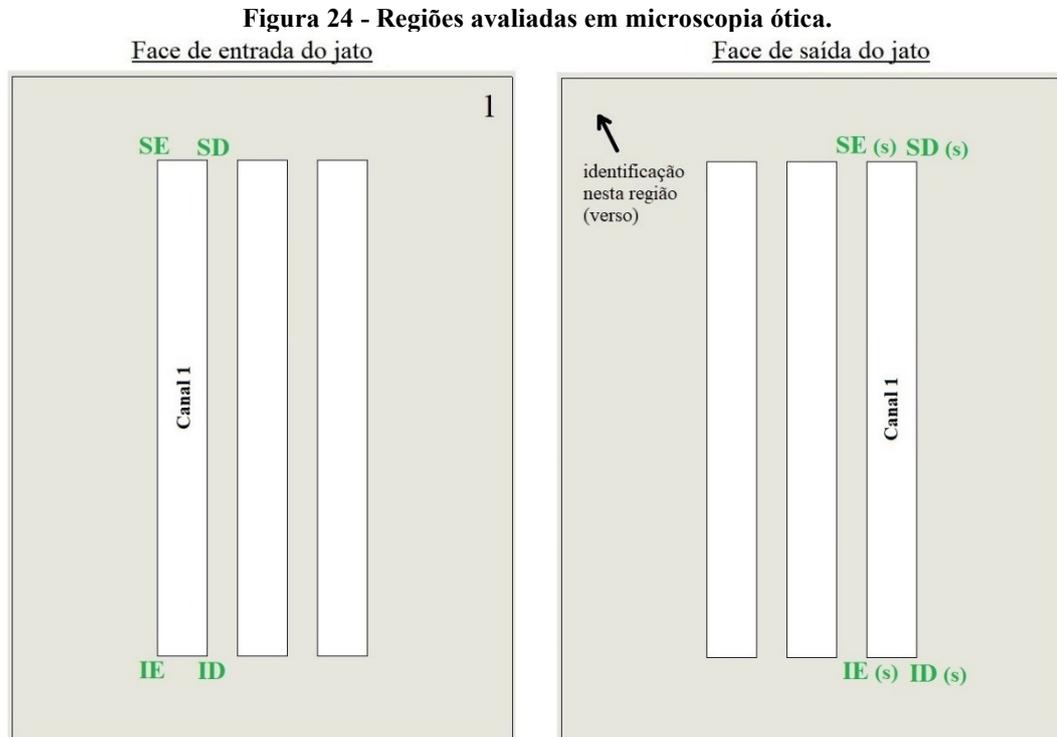
(b)

Fonte: Autor.

4.3. Microscopia Ótica (MO)

Após o corte no jato d'água, realizou-se a limpeza das amostras em banho ultrassônico contendo álcool etílico 96°GL durante 10 minutos. Terminada a limpeza, as chapas foram analisadas em microscópio ótico modelo Leica, DM4 P localizado no Laboratório de Materiais (LABMAT) em aumento de 50x, com o objetivo de identificar as modificações impostas na superfície pelo processo de corte.

Conforme Figura 24, nesta etapa foram avaliados quatro pontos na face de entrada e quatro pontos na face saída do jato, sendo todos na região de borda do canal 1. Estes pontos foram identificados como Superior Esquerdo (SE), Superior Direito (SD), Inferior Esquerdo (IE) e Inferior Direito (ID), sendo os da face de saída do jato identificados com a letra (s).



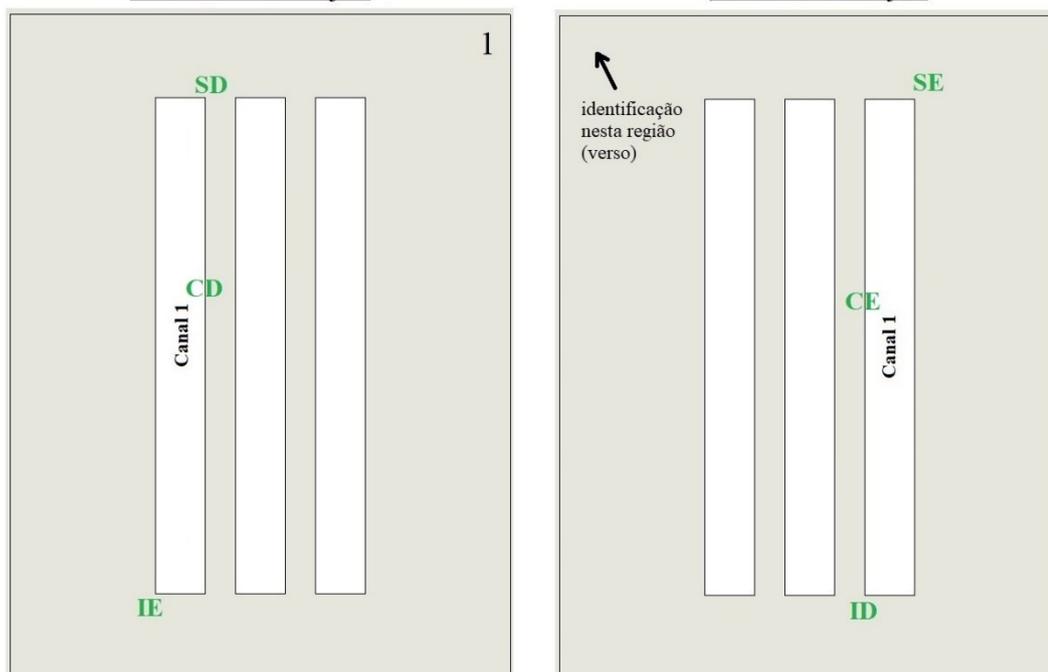
Fonte: Autor.

4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Por meio da utilização do microscópio eletrônico de varredura foi possível superar a limitação associada a microscopia ótica quanto a profundidade de foco, permitindo melhor visualização da superfície nas regiões próximas ao corte, bem como a identificação de componentes de menor tamanho, a exemplo das partículas abrasivas incrustadas na superfície.

Neste trabalho foram avaliados por meio do MEV três pontos na face de entrada do jato, sendo um na borda inferior esquerda do canal (IE), região de início do corte, um na borda superior direita do canal (SD) e um no centro do canal a direita (CD). Na face de saída do jato a análise foi realizada em pontos homólogos aos pontos IE, SD e CD, sendo denominados de superior esquerdo (SE), inferior direito (ID) e centro esquerda (CE). Um esquema contendo as regiões avaliadas pode ser visualizado na Figura 25.

Figura 25 - Representação das regiões da amostra avaliadas em MEV.
Face de entrada do jato Face de saída do jato



Fonte: Autor.

Os ensaios foram realizados em microscópio localizado no LABMAT modelo Tescan, Vega 3 - Oxford X act nos aumentos de 60x, 200x, 500x, 1000x e 2000x, onde foram obtidas imagens formadas tanto a partir de elétrons secundários (*scattered electrons* – SE), que permitem melhor visualização do relevo das regiões estudadas, quanto a partir de elétrons retroespalhados (*Backscattered electrons* – BSE), onde são realçadas regiões com contrastes de profundidade e peso atômico.

Um Detector de Energia Dispersiva (EDS) acoplado ao MEV permitiu a avaliação da composição química elementar qualitativa de regiões observadas, sendo utilizado como ferramenta na caracterização de partículas abrasivas incrustadas e demais contaminações que pudessem estar presentes nas regiões afetadas pelo corte.

4.5. Interferometria ótica de luz branca

A utilização da interferometria ótica de luz branca permite, por meio de fenômenos de reflexão de luz, a representação 3D da superfície dos materiais. Desta forma, foi possível por meio desta análise a reconstrução e visualização em três dimensões da topografia de superfície das amostras, bem como a quantificação de diversos parâmetros topográficos.

Dada a complexidade das superfícies reais e a vasta gama de parâmetros desenvolvidos para descrevê-las, faz-se necessário a definição dos parâmetros topográficos a serem estudados, buscando selecionar os que melhor representem a superfície e o impacto desta no processo de

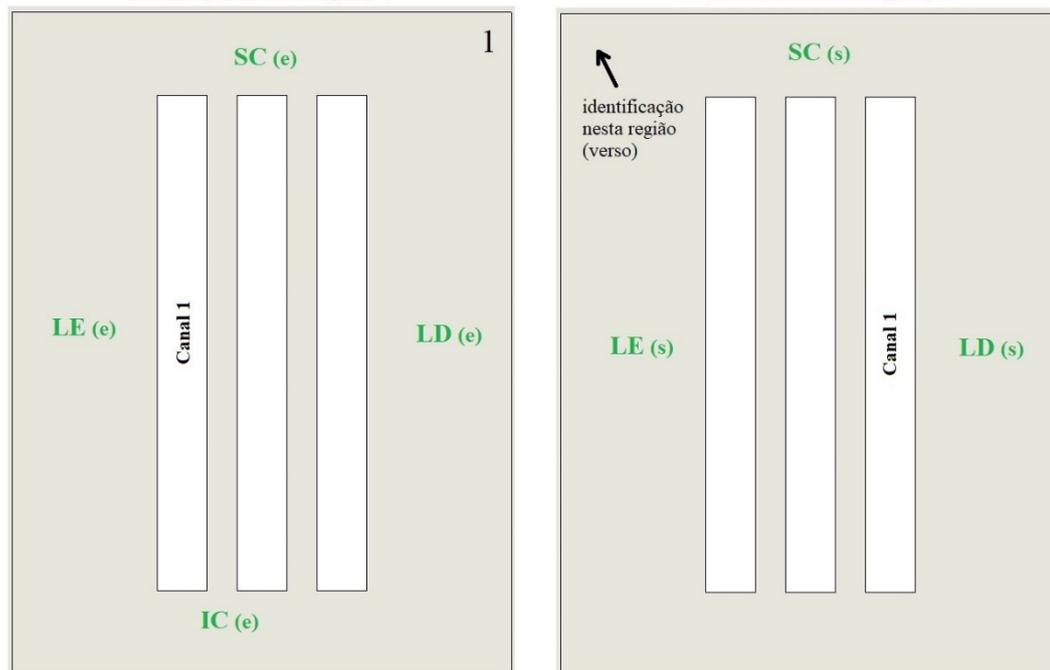
união. No presente trabalho foram avaliados os parâmetros topográficos, rugosidade média (S_a), rugosidade quadrática média (S_q), altura máxima (S_z) e amplitude entre o maior pico e o vale mais profundo do perfil (P_t), com o objetivo de caracterizar a topografia das superfícies e avaliar como estas podem impactar a qualidade final de dispositivos unidos por difusão.

As análises foram realizadas em interferômetro ótico modelo Zygo Newview 7300 localizado no LABMAT, em aumento de 50x, de modo a avaliar uma maior região de interesse e aumentar assim a representatividade dos resultados. Para a realização da análise foram definidos sete pontos em cada amostra, sendo quatro na face de entrada do jato d'água abrasivo e três na face de saída do jato.

Os pontos avaliados na face de entrada foram, Lateral Esquerda (LE (e)), Lateral Direita (LD (e)), Superior Centro (SC (e)) e inferior centro (IC (e)), a partir dos quais foi avaliado o acabamento de superfície em diferentes regiões, buscando detectar possíveis impactos do corte via jato d'água na integridade de superfície das amostras. Na face de saída foram observados os pontos, Lateral Esquerda (LE (s)), Superior Centro (SC (s)) e Lateral Direita (LD (s)), definidos de modo a permitir a comparação com os resultados obtidos na face de entrada. A representação deste conjunto de pontos avaliados pode ser vista na Figura 26.

Ademais, foram avaliadas as regiões de borda dos canais, por meio da medição da forma e altura da rebarba formada e do aspecto da superfície nestes locais. Entretanto, devido às limitações técnicas da interferometria de luz ótica, nestas regiões o equipamento não foi capaz de captar pontos suficientes para a realização de uma análise significativa e de qualidade.

Figura 26 - Esquema representando os pontos avaliados por meio da interferometria ótica de luz branca.
Face de entrada do jato Face de saída do jato



Fonte: Autor.

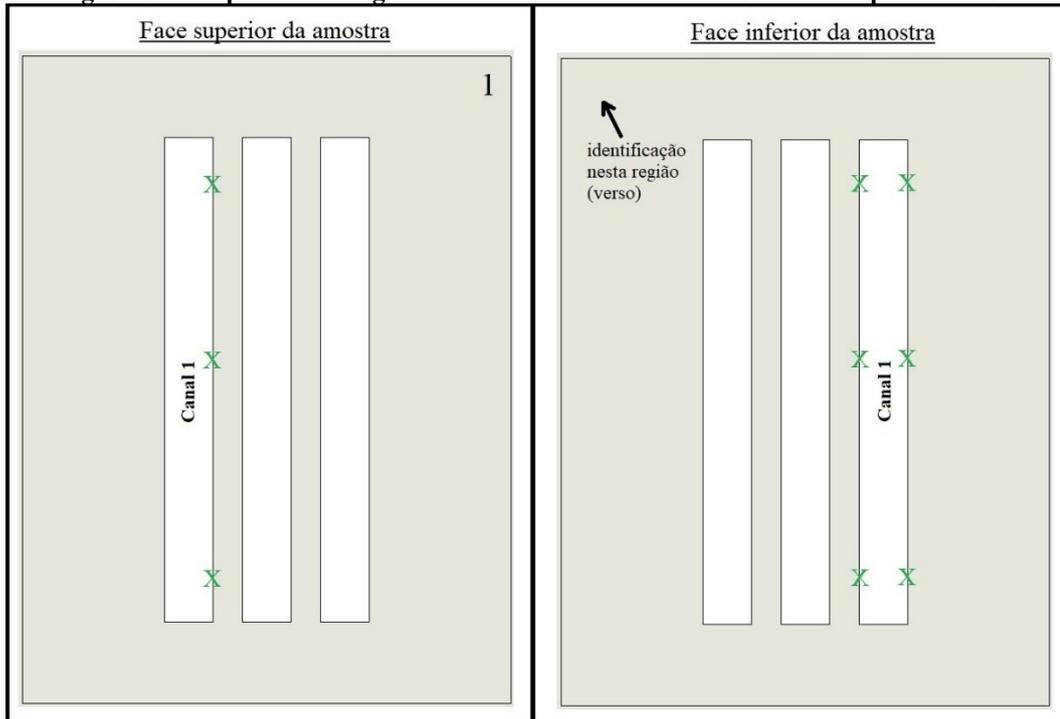
O tratamento dos dados obtidos foi realizado por meio do *software* Mountains Map Universal 7.1, quantificando os parâmetros topográficos selecionados e reconstruindo em 3D a superfície das amostras a partir da matriz de pontos gerada pelo interferômetro.

4.6. Perfilometria

De modo a contornar a dificuldade de caracterização das regiões de rebarba por meio da interferometria ótica, visto as diferenças de altura e textura de superfície nestas regiões que dificultam a formação de um plano para a reflexão da luz, fez-se o uso da técnica de perfilometria. Assim, a aquisição dos dados é feita a partir do movimento de um apalpador em contato com a peça, o qual identifica rebaixos e ressaltos em relação a linha média e permite quantificar a altura destes desvios, sendo utilizado na tentativa de caracterizar o tamanho da rebarba resultante dos cortes em cada uma das condições estudadas.

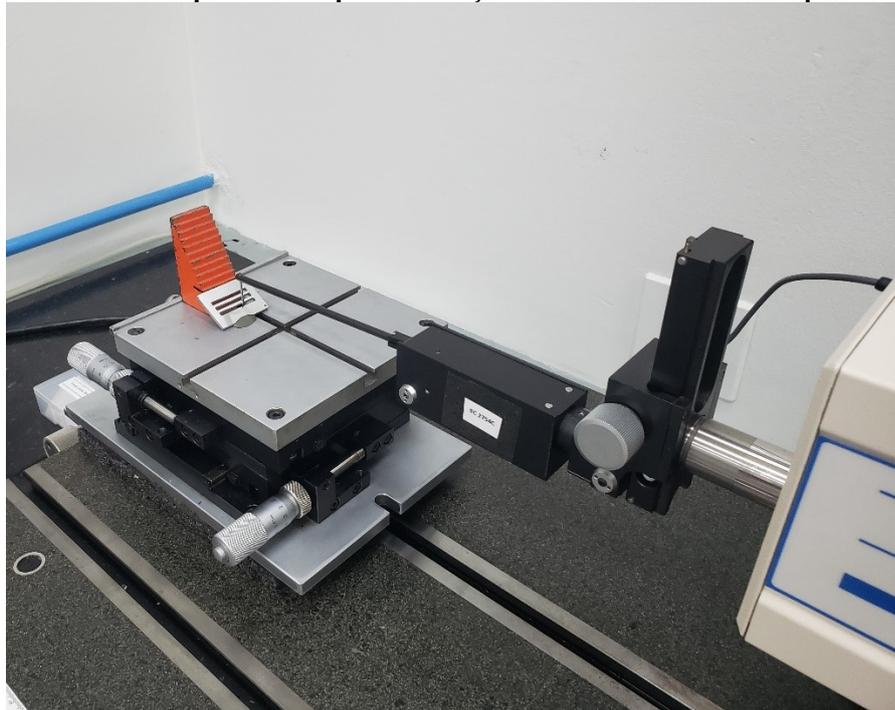
Os ensaios foram realizados em um perfilômetro modelo Form Talysurf Series 2 de propriedade da Fundação CERTI, sendo avaliados três pontos na face superior e seis pontos na face inferior de cada amostra, conforme indicado na Figura 27. O posicionamento das amostras para realização do ensaio foi feito de forma inclinada, como pode ser visto na Figura 28, de modo que a medição dos dados teve início na parede interna do canal, passando em seguida pela região de rebarba.

Figura 27 - Esquema das regiões onde foram realizadas as medidas em perfilômetro.



Fonte: Autor.

Figura 28 - Amostra posicionada para a medição da altura da rebarba em perfilômetro.



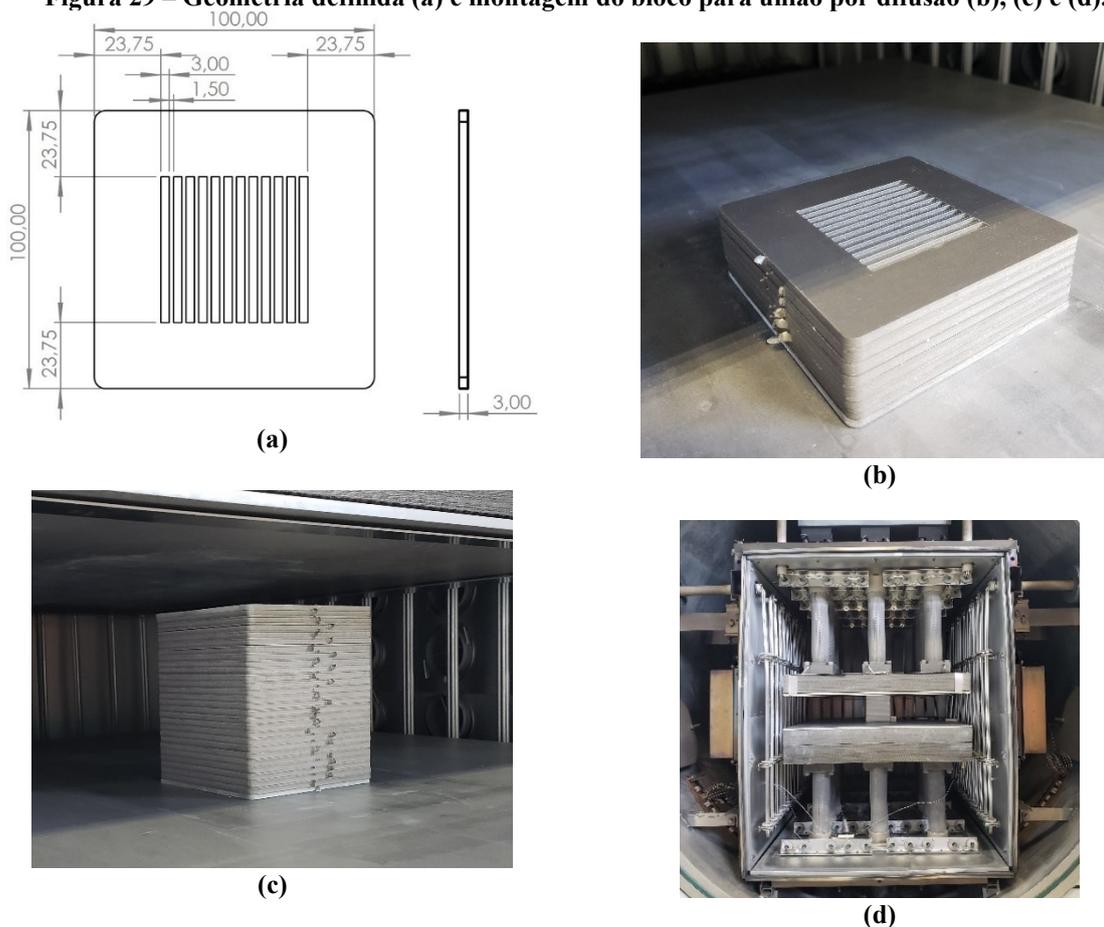
Fonte: Autor.

4.7. Fabricação e união por difusão de blocos

Nesta etapa, dois dos quinze conjuntos de parâmetros avaliados no corte via jato d'água abrasivo das chapas foram definidos para a fabricação de blocos com canais unidos por difusão, de modo que a seleção destes conjuntos foi realizada buscando evidenciar o impacto dos diferentes acabamentos de superfície na qualidade final do processo de união. Desta forma, foram selecionadas as condições 3 e 5 para fabricação dos blocos, as quais apresentaram respectivamente o menor e maior impacto na integridade de superfície das amostras.

Chapas de aço inoxidável austenítico 316L com 3 mm de espessura e acabamento do tipo 2B foram cortadas via jato d'água abrasivo para a confecção de canais quadrados, conforme apresentado na Figura 29. Chapas de 1 mm de espessura com o mesmo acabamento de superfície, porém sem canais, foram também cortadas, sendo ambas usinadas no tamanho de 100 x 100 mm². Os canais foram fabricados na região central do bloco, conforme configuração real de um núcleo de trocador de calor, com 3 mm de largura, 52,50 mm de comprimento e aletas entre os canais com 1,5 mm de espessura. Nas bordas do bloco foram mantidas regiões com sobremetal de 23,75 mm, de modo a permitir a remoção de cilindros para ensaios de tração e a simetria geométrica do conjunto, evitando eventuais problemas de distribuição de pressão durante o ciclo de união.

Figura 29 – Geometria definida (a) e montagem do bloco para união por difusão (b), (c) e (d).



Fonte: Autor.

Finalizado o corte, realizou-se a remoção da película protetiva e a limpeza em banho ultrassônico com água e desengraxante industrial Ultrasonics HS 274 para a remoção de óleos, graxas e particulados soltos, seguido de lavagem em água corrente e secagem com ar quente. De modo a auxiliar na remoção de partículas e sujidades ainda presentes e resquícios do desengraxante utilizado na etapa anterior, seguiu-se com a limpeza em banho ultrassônico em álcool etílico 96°GL durante 15 minutos e secagem com ar quente. Deve-se ressaltar que, de modo a preservar as características da superfície conforme originado durante o corte, nenhum tipo de pós-processos para acabamento, como rebarbação, foi realizado.

Ao final do processo de limpeza, fez-se o empilhamento das chapas na matriz do forno para montagem do núcleo a ser unido. Esta etapa foi realizada conforme procedimento padrão para a fabricação de núcleos de trocadores de calor compactos desenvolvido no LABTUCAL, que consiste na utilização de chapas de fechamento (primeira e última do bloco) de 3 mm de espessura e sem canais, sendo dispostos entre elas 26 conjuntos de chapas de 3 + 1 mm, totalizando uma altura de 110 mm.

Deve-se ressaltar que placas refratárias de TZM (Titânio – Zircônio – Molibdênio) foram posicionadas entre as superfícies inferior e superior do bloco e a matriz de grafite do forno com o objetivo de evitar contato direto das matrizes de grafite do forno com as chapas e impedir a difusão de átomos de carbono para o material, o que poderia favorecer a ocorrência do fenômeno de sensitização. Realizou-se também isolamento da superfície inferior e superior do bloco com a placa de TZM por meio da aplicação de uma suspensão aerossol de nitreto de boro hexagonal (hBN), um material lubrificante e quimicamente inerte dentro da faixa de temperatura trabalhada.

Encerrada a etapa de montagem foi dado início ao ciclo de união dos blocos em forno de alto vácuo PVA Tepla, MOV 653HP, disponível no LABTUCAL. Os parâmetros de união utilizados foram selecionados com base nos estudos conduzidos por Rosinski (2018) e Gonçalves (2019) na união por difusão de núcleos de trocadores de calor compactos em aço inoxidável austenítico 316L, estando estes descritos abaixo:

- Temperatura de união de 1040°C durante 60 minutos;
- Pressão de 9,5 MPa aplicada apenas durante patamar de união (60 minutos);
- Atmosfera de vácuo na ordem de 10^{-6} mbar.

4.8. Análise dos blocos

Por meio do corte via jato d'água abrasivo foram retirados dos blocos três cilindros de 20 mm de diâmetro e comprimento de 110 mm, conforme Figura 30, para posterior usinagem e ensaio de tração. Os ensaios de tração foram realizados externamente à UFSC, em empresa certificada, seguindo os procedimentos e especificações descritos na norma ASTM A370. Os corpos de prova fraturados foram enviados de volta ao LABTUCAL para a avaliação visual do comportamento do material até a fratura.

Figura 30 - Bloco unido nas condições de 1040°C - 9,5 MPa - 1 hora. Amostras cilíndricas removidas nas posições demarcadas.



Fonte: Autor.

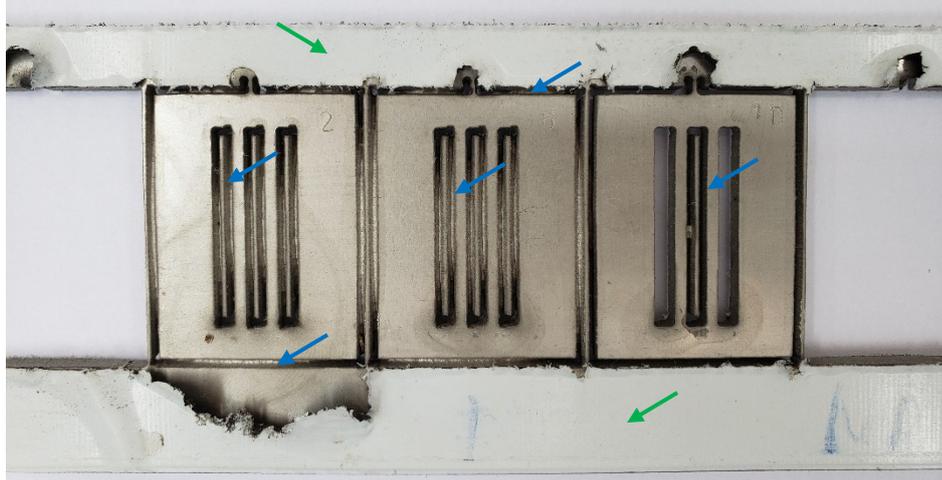
Foi realizada também a retirada de amostras retangulares da região com e sem canais para preparação metalográfica padrão, seguido do ataque eletrolítico e análise microestrutural em microscópio óptico (MO) para a avaliação das características da linha de união e seus microconstituintes.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa serão discutidos os resultados obtidos a partir da fabricação e análise de 15 amostras em jato d'água abrasivo, conforme proposto no DoE apresentado na subseção 4.2. Dentre os conjuntos de parâmetros propostos 4 condições não foram suficientes para a remoção completa das amostras, sendo estas as condições 2, 6, 10 e 11.

Este resultado pode ser associado à combinação dos baixos valores de pressão e altas velocidades de corte propostos nestas condições, reduzindo desta forma tanto a taxa de remoção de material, quanto o tempo no qual cada ponto da peça fica exposto ao jato. Na Figura 31 é mostrada a chapa onde foram realizados os cortes, bem como três das amostras que permaneceram fixadas.

Figura 31 - Recorte da chapa com as amostras que permaneceram fixadas. Flechas em verde indicam a chapa conforme recebida ainda com película. Flechas em azul indicam regiões onde o corte foi incompleto.



Fonte: Autor.

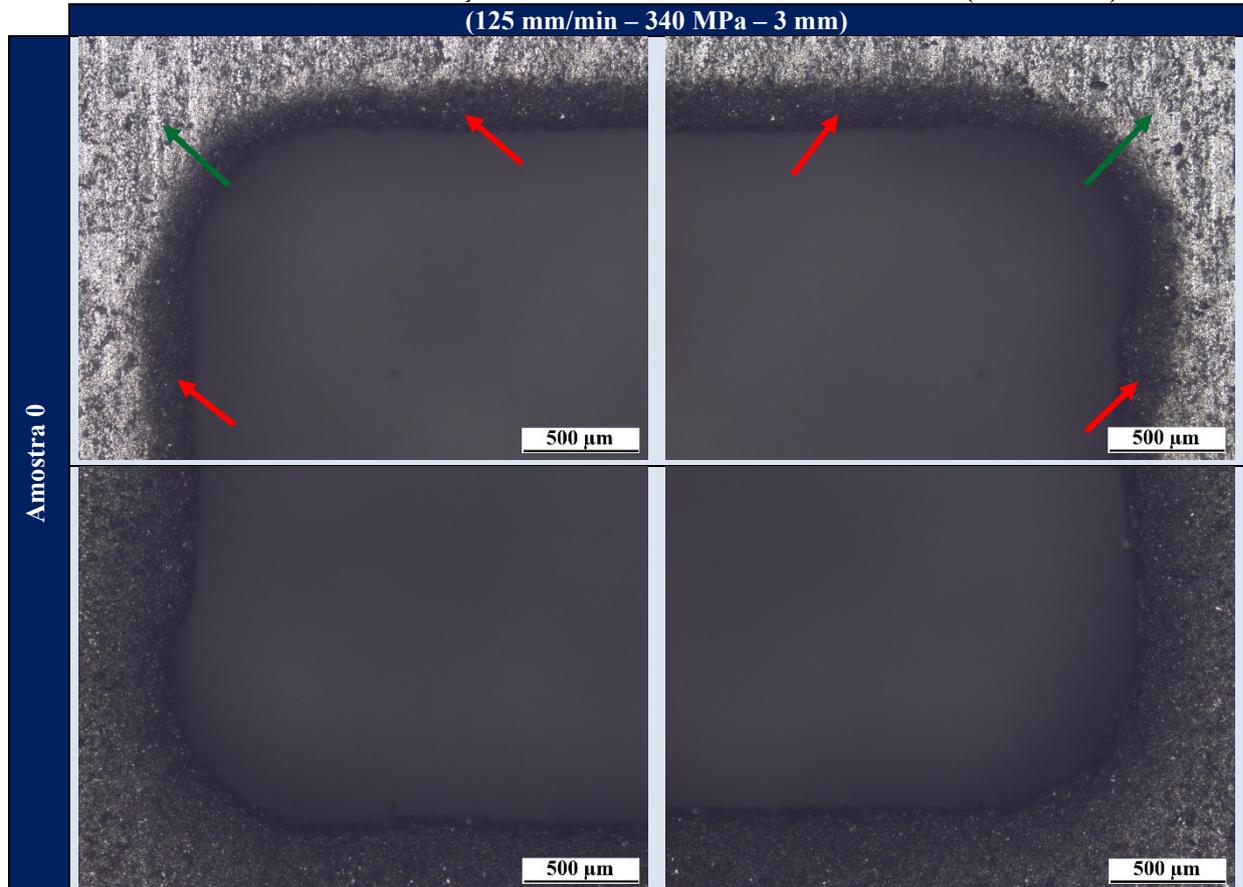
Também foram realizados ensaios de tração e análise microestrutural de dois blocos com canais unidos por difusão, simulando a fabricação de um núcleo de trocador de calor compacto real, os quais foram feitos a partir de duas condições de usinagem via jato d'água abrasivo.

5.1. Microscopia ótica

As análises em microscópio ótico revelam a presença de uma zona afetada pelo corte nas regiões próximas à borda dos canais em todas as onze amostras. Estas regiões são apresentadas nas imagens na forma de uma coloração escura, conforme apontado por setas vermelhas, e indicam a deterioração da superfície da amostra quando comparada com o material de base.

A ocorrência desta deterioração da superfície nestas regiões é prevista, uma vez que, devido ao fenômeno de espalhamento do jato apresentado neste trabalho no capítulo 3.2.2.2, partículas abrasivas são aceleradas fora do diâmetro efetivo do jato e colidem com a superfície da peça sem a energia necessária para a remoção completa do material, resultando em modificações na topografia da superfície das amostras e no surgimento de partículas abrasivas incrustadas. A deformação plástica do material nas regiões adjacentes ao corte é também esperada, visto que o choque das partículas abrasivas com a amostra induz tensões localizadas nas regiões adjacentes ao impacto, acarretando na deformação plástica do material.

Figura 32 - Amostra 0 em 50x de aumento. Presença da uma zona afetada pelo corte (setas vermelhas) nas bordas do canal com coloração e textura diferentes do material de base (setas verdes).

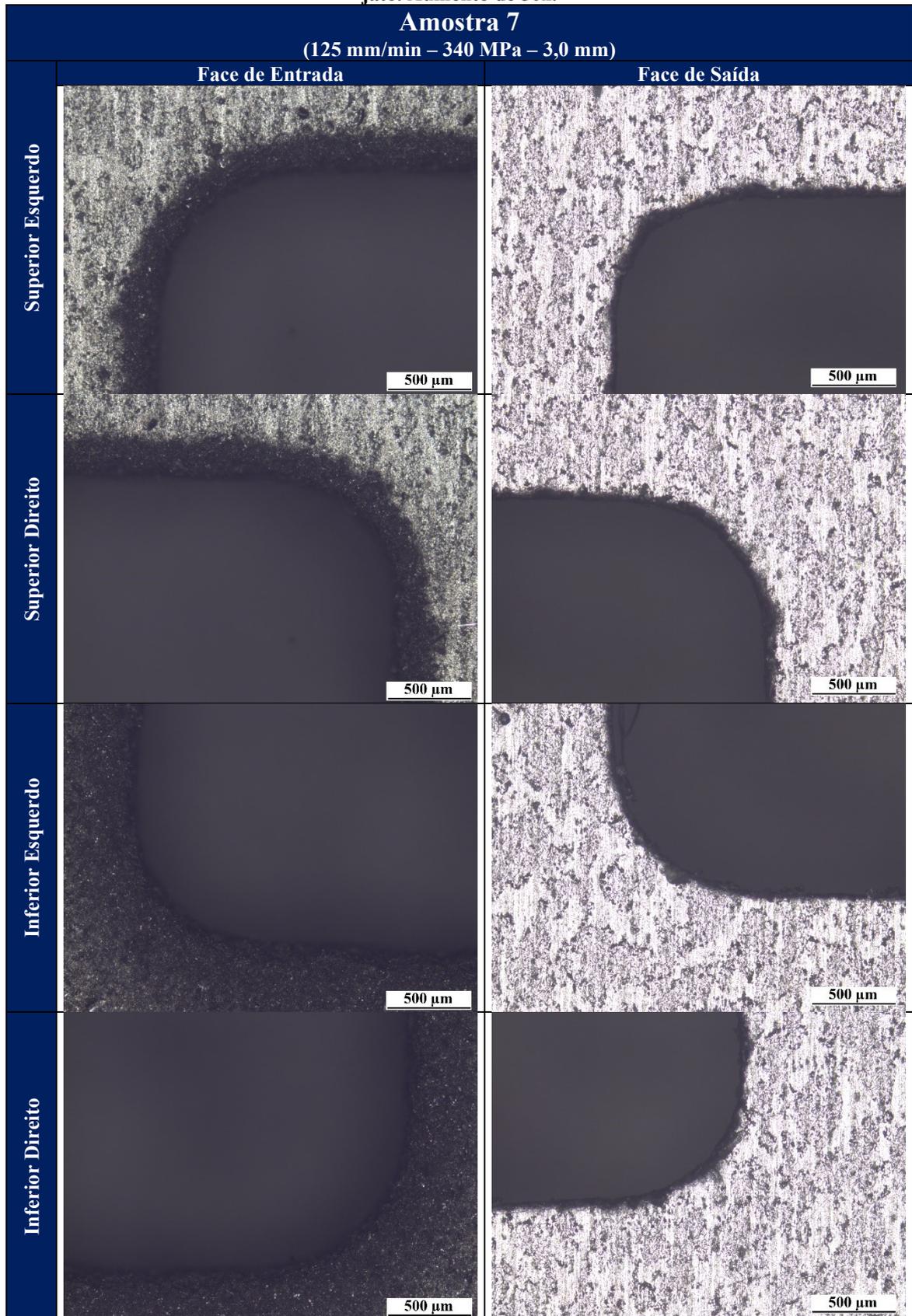


Fonte: Autor.

Na Figura 33 são comparados os resultados obtidos para a face de entrada e de saída do jato, onde verifica-se que a presença da zona afetada é observada apenas na face de entrada do jato, enquanto na face de saída são identificadas pequenas regiões escuras, indicando a formação de rebarba na borda dos cortes.

Observa-se ainda que na região inferior dos canais da face de entrada do jato, onde dá-se o início do corte, a zona afetada abrange uma maior área e atinge quase toda a região analisada. Uma possível explicação para este fenômeno é a dispersão do jato d'água abrasivo durante o contato inicial com o material, nos instantes que antecedem a perfuração. Desta forma, de modo a isolar a influência desta região de entrada do jato, será dado enfoque nesta etapa apenas as micrografias das regiões superiores dos canais, onde o corte já está estabilizado.

Figura 33 - Comparativo entre os resultados obtidos em microscópio ótico na face de entrada e saída do jato. Aumento de 50x.



Fonte: Autor.

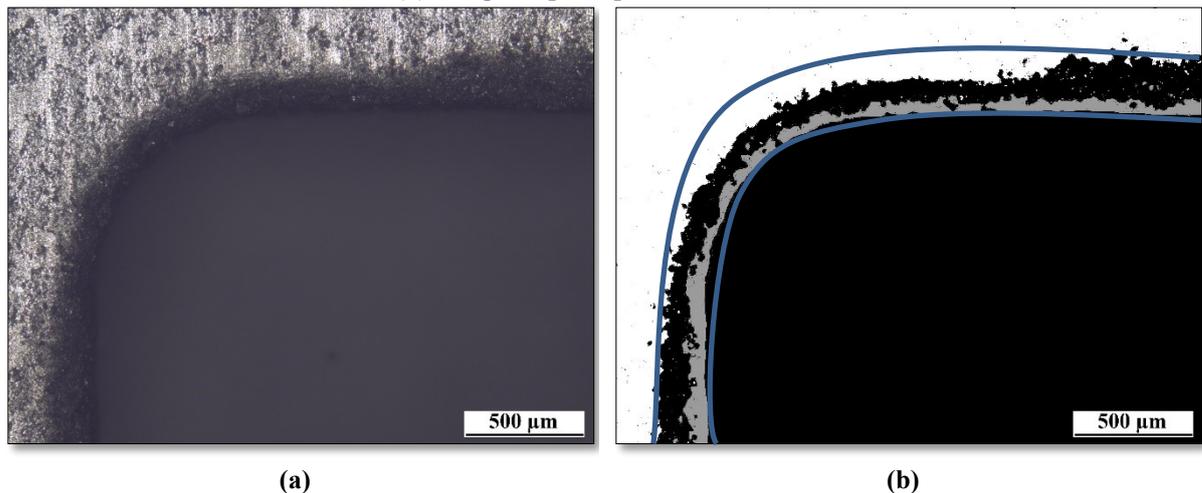
De modo a evidenciar os resultados e facilitar a quantificação da distância entre a borda do corte e o limite da região afetada, técnicas de análise de imagens foram empregadas, sendo realizadas por meio do software *Fiji-ImageJ*. Em virtude da diferença de coloração observada entre o material de base, a região afetada pelo corte e o fundo do canal, optou-se no presente trabalho pelo processo de ternarização das imagens, o qual consiste na divisão da imagem avaliada em três tons de cinza, permitindo desta forma destacar a zona afetada pelo corte.

Contudo, a seleção completa da região afetada pelo corte durante a ternarização das imagens não foi possível, uma vez que os tons de cinza encontrados em pontos desta região assemelham-se aos tons de cinza do fundo da imagem, fazendo com que, ao aplicar um *threshold* capaz de selecionar todos os pontos da região afetada de uma única vez, inúmeros pontos do fundo da imagem eram também selecionados, resultando na deformação dos resultados.

Buscando evitar este fenômeno, optou-se por garantir maior precisão na seleção dos pontos localizados nas extremidades entre o material de base e a zona afetada e entre a borda do canal e a região sem material, assegurando assim uma maior assertividade na caracterização da forma destas regiões e no cálculo do tamanho da zona afetada .

O resultado deste processo pode ser observado na Figura 34, onde em (a) é apresentada uma imagem da amostra 1 em MO sem tratamento e em (b) esta mesma imagem ternarizada, sendo a zona afetada pelo corte a região destacada entre as linhas azuis na imagem.

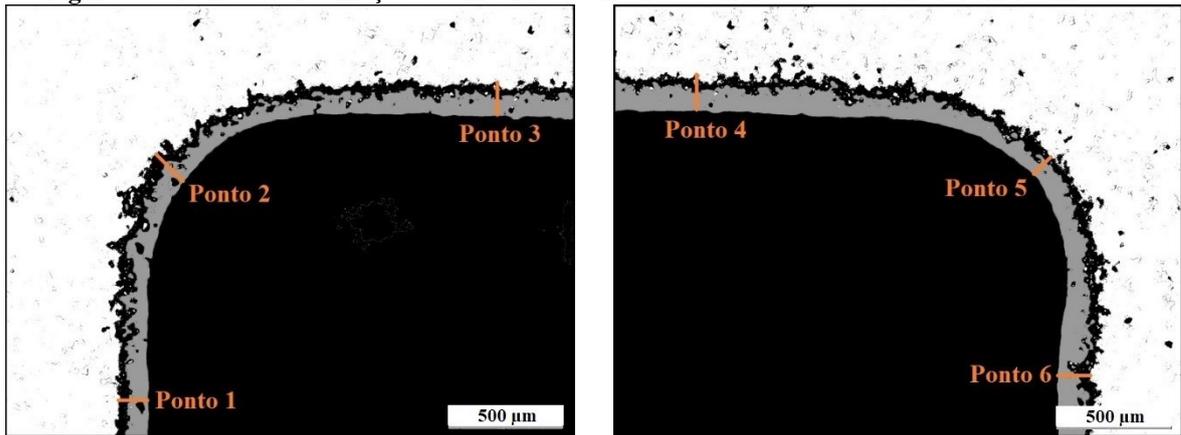
Figura 34 – Amostra 1 tratada através do software ImageJ-Fiji. (a) Imagem original conforme obtida em MO. (b) Imagem após o processo de ternarização.



Fonte: Autor.

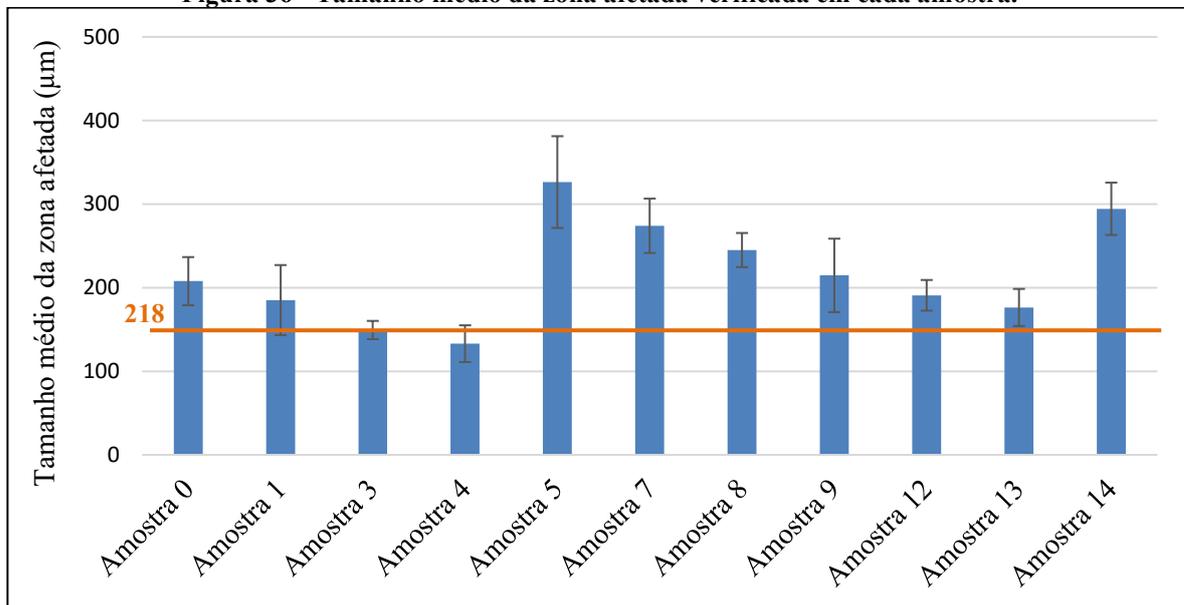
A partir da ternarização das imagens, realizou-se a medição do tamanho médio da zona afetada pelo corte. Esta medida foi realizada com auxílio do software *Fiji-ImageJ* traçando-se uma linha reta entre o primeiro ponto em cinza observado na borda do corte até o primeiro ponto da região não afetada, em branco na imagem. Foram realizadas três medidas por imagem, conforme Figura 35, totalizando seis medições por amostra, a partir das quais a média e o desvio padrão foram calculadas e são apresentadas na Figura 36.

Figura 35 - Pontos de realização das medidas as medidas e indicativo de como foram realizadas.



Fonte: Autor.

Figura 36 - Tamanho médio da zona afetada verificada em cada amostra.



Material Alvo	Orifício	Abrasivo	Ângulo de incidência do jato
Aço inoxidável AISI 316L Espessura = 3 mm	Rubi Ø orifício = 0,3 mm Ø do jato na saída = 1,3 mm	Garnet #80 Mesh Taxa de alimentação = 360 g/min	90°

Fonte: Autor.

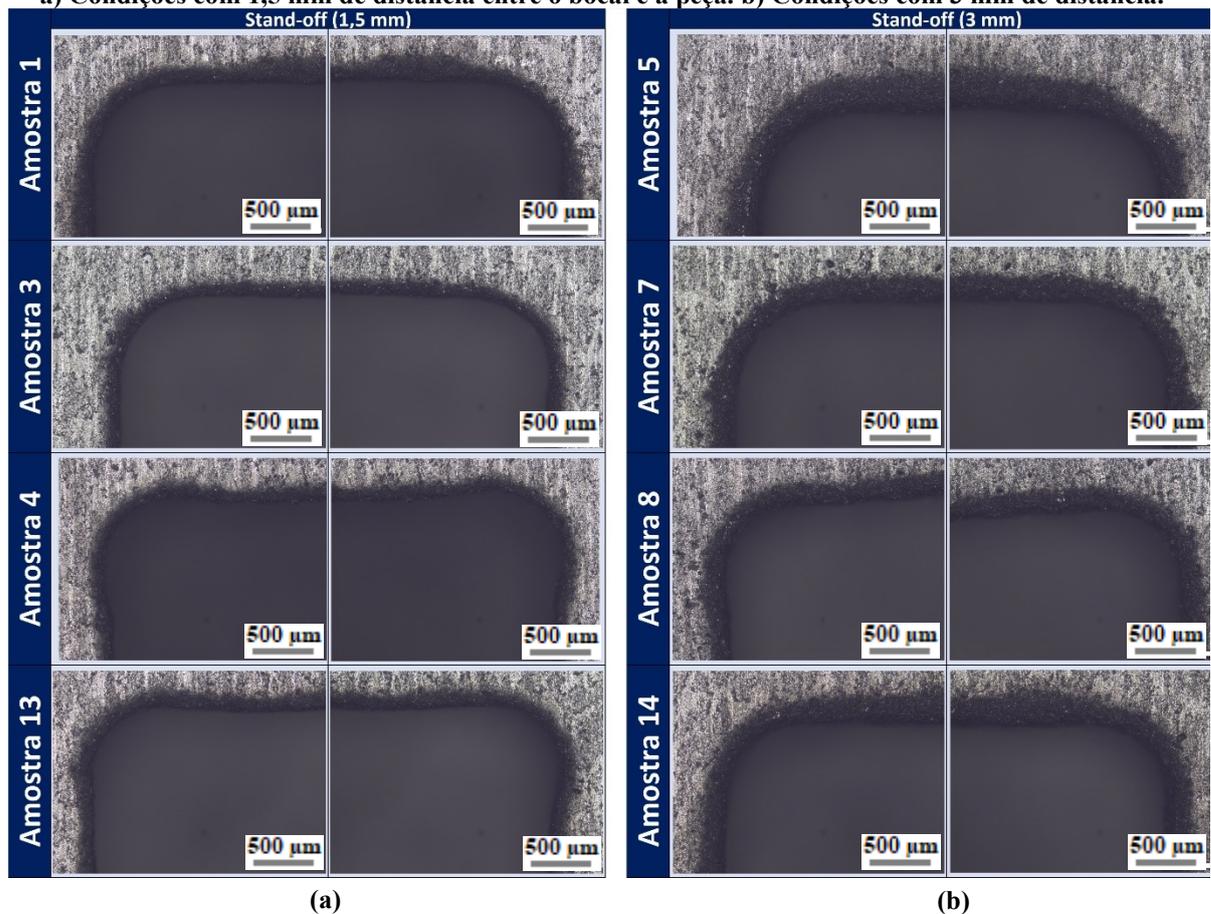
De acordo com a Figura 36, os resultados médios obtidos tornam nítida a influência dos parâmetros de corte no tamanho da zona afetada formada. A análise inicial dos resultados indica as amostras 3 e 4 como as melhores condições para serem utilizadas no processo de união por difusão, em virtude de apresentarem uma zona afetada de menor tamanho médio. Já a amostra 5 apresentou a maior região afetada dentre as condições avaliadas, surgindo como a condição menos indicada para o posterior processo de união.

Uma análise mais detalhada da influência isolada de cada parâmetro no tamanho da zona afetada originada é apresentada a seguir neste trabalho.

5.1.1. Distância entre o bocal e a peça

A fim de avaliar a influência da distância entre o bocal e a peça foram inicialmente comparadas, conforme Figura 37, as amostras 1, 3, 4 e 13, nas quais a distância de corte utilizada foi de 1,5 mm, com as amostras 5, 7, 8 e 14, sendo utilizada a distância de 3 mm. Desta forma, verificou-se um aumento visível no tamanho da zona afetada nas amostras em que a distância de corte de 3mm foi utilizada, indicando que, embora a formação da região afetada ocorra em todas as amostras, a redução da distância entre o bocal e a peça apresenta impacto positivo na qualidade do acabamento de superfície das amostras, promovendo a redução no tamanho da área afetada.

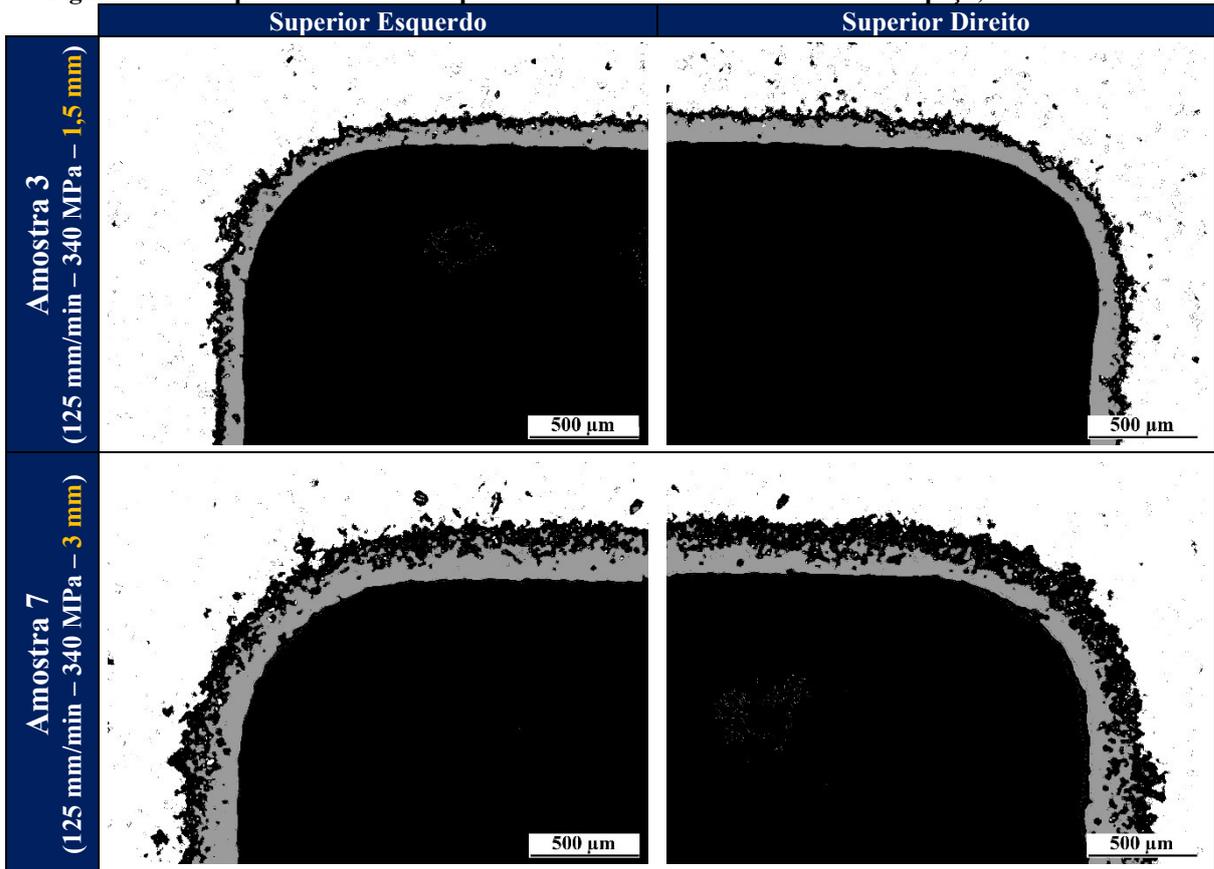
Figura 37 - Imagens em 50x de aumento em microscópio ótico das bordas superiores do canal.
a) Condições com 1,5 mm de distância entre o bocal e a peça. b) Condições com 3 mm de distância.



Fonte: Autor.

Na Figura 38 são comparadas as micrografias termarizadas das amostras 3 e 7, fabricadas sob as mesmas condições de velocidade e pressão ($V = 125 \text{ mm/min}$ e $P = 340 \text{ MPa}$), permitindo a melhor visualização da redução verificada no tamanho da zona afetada conforme o bocal é aproximado da peça. A amostra 3 apresentou um tamanho médio de zona afetada de $149,3 \text{ }\mu\text{m}$, enquanto a amostra 7 apresentou uma média de $274,0 \text{ }\mu\text{m}$, sendo feita a validação estatística dos resultados com auxílio do teste t de Student, o qual indicou um p-valor menor que 0,05, rejeitando a hipótese h_0 , e indicando que há diferença significativa entre os grupos de dados analisados.

Figura 38 - Comparativo isolando o parâmetro de distância entre o bocal e a peça, aumento de 50x.

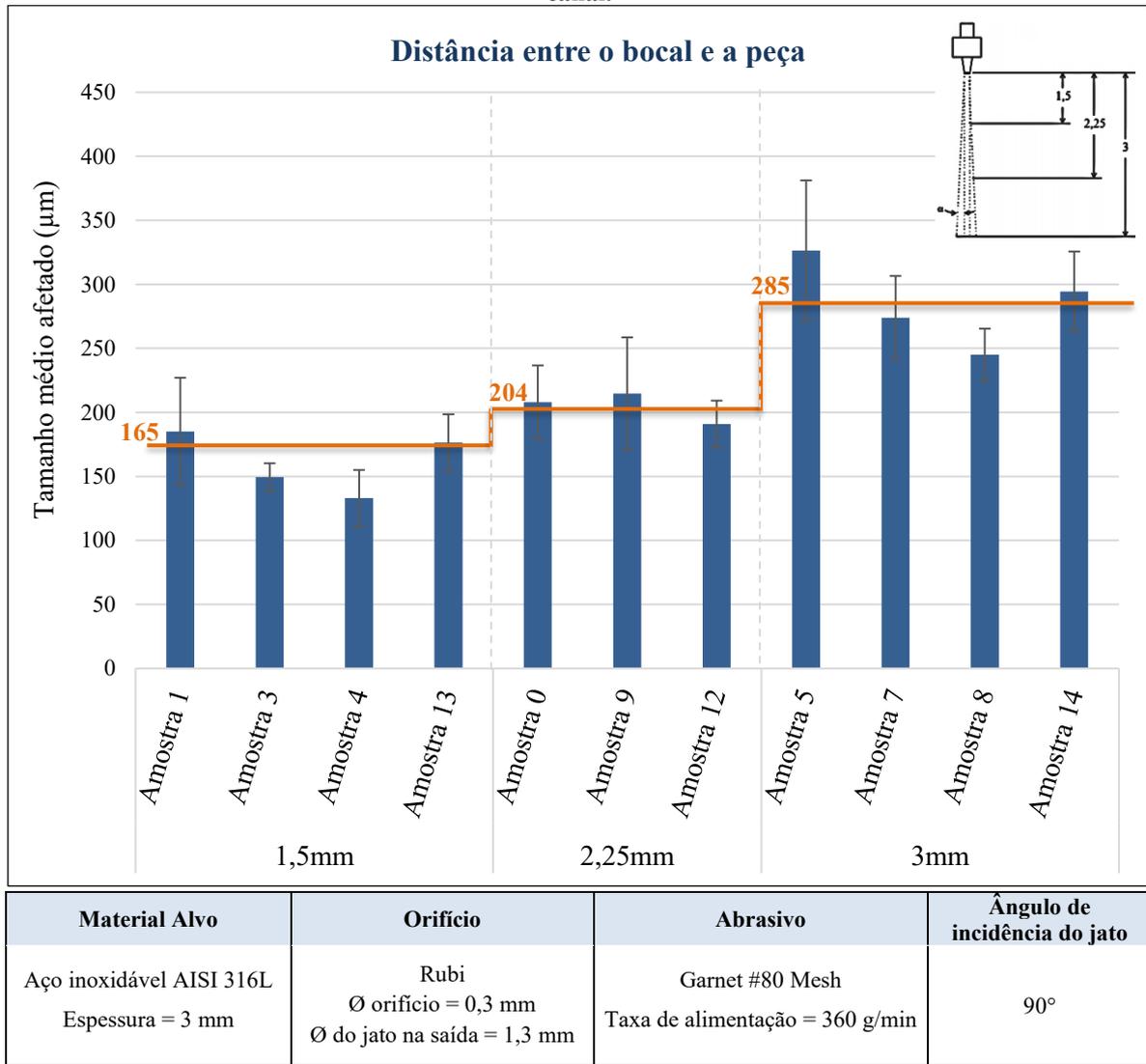


Fonte: Autor.

O comportamento observado na Figura 38 se repete quando são comparados os tamanhos médios das zonas afetadas calculados para cada uma das condições, que conforme Figura 39, demonstra um aumento do tamanho da região afetada conforme é aumentada a distância entre o bocal e a peça, sendo observado um tamanho médio de zona afetada de 165 µm nas amostras em que a distância utilizada foi de 1,5 mm, 204 µm nas amostras fabricadas com distância de 2,25 mm e 285 µm para as fabricadas com 3 mm.

Este aumento é associado ao espalhamento do jato, de modo que ao aumentar a distância até a peça intensifica-se a divergência do jato, ampliando seu diâmetro e, por conseguinte, a região da amostra sujeita à colisão de partículas abrasivas.

Figura 39 - Análise do efeito da distância entre o bocal e a peça no tamanho da zona afetada na borda do canal.

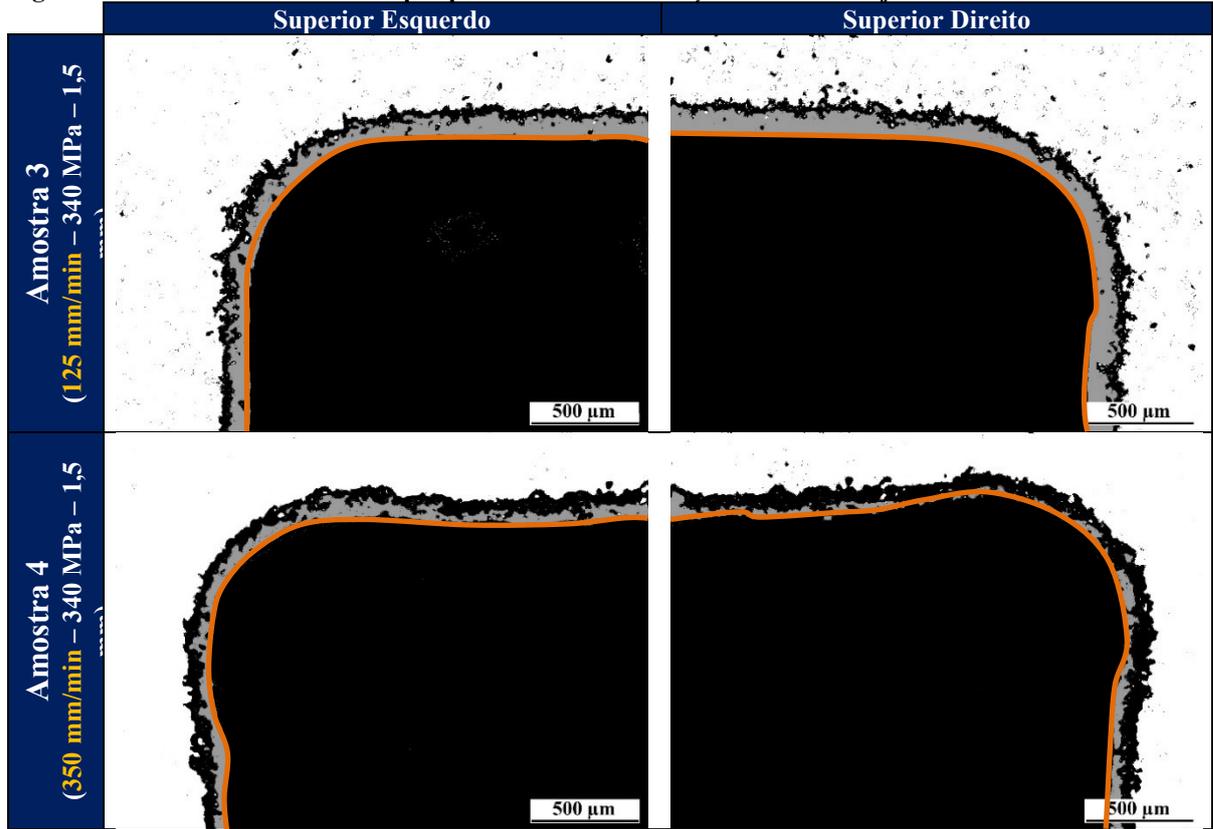


Fonte: Autor.

5.1.2. Velocidade de avanço

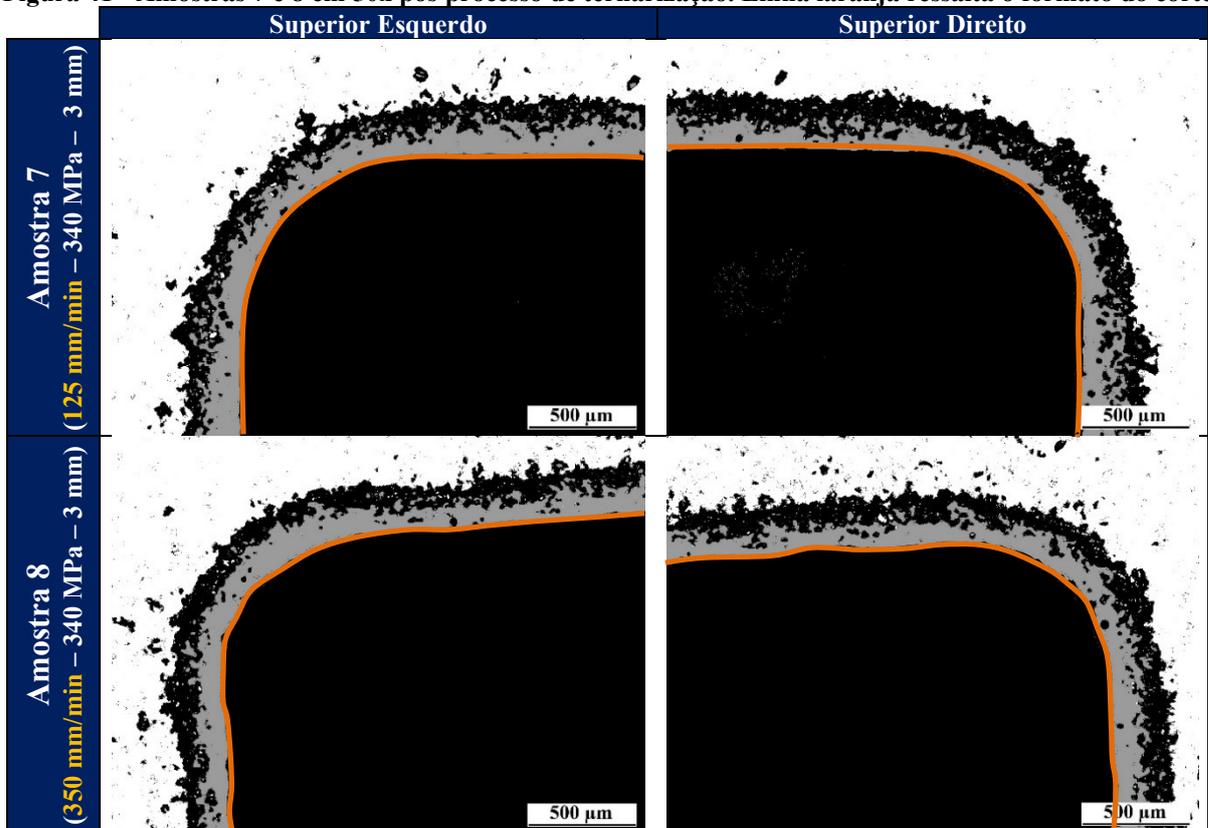
Quando avaliada a influência da velocidade de avanço na integridade de superfície das amostras, as micrografias apresentam regiões afetadas de tamanhos similares, como pode ser visto nas Figuras 40 e 41, não sendo observadas diferenças visíveis entre as condições. Entretanto, observa-se que as amostras usinadas com menor velocidade de avanço apresentam menor número de desvios e irregularidades geométricas nas bordas do corte, destacados por meio de linhas laranjas nas Figuras 40 e 41, que demonstram que a redução da velocidade de avanço resulta na melhora da geometria dos cortes, permitindo o atendimento de tolerâncias geométricas mais estreitas.

Figura 40 – Amostras 3 e 4 em 50x pós processo de ternarização. Linha laranja ressalta o formato do corte.



Fonte: Autor.

Figura 41 - Amostras 7 e 8 em 50x pós processo de ternarização. Linha laranja ressalta o formato do corte



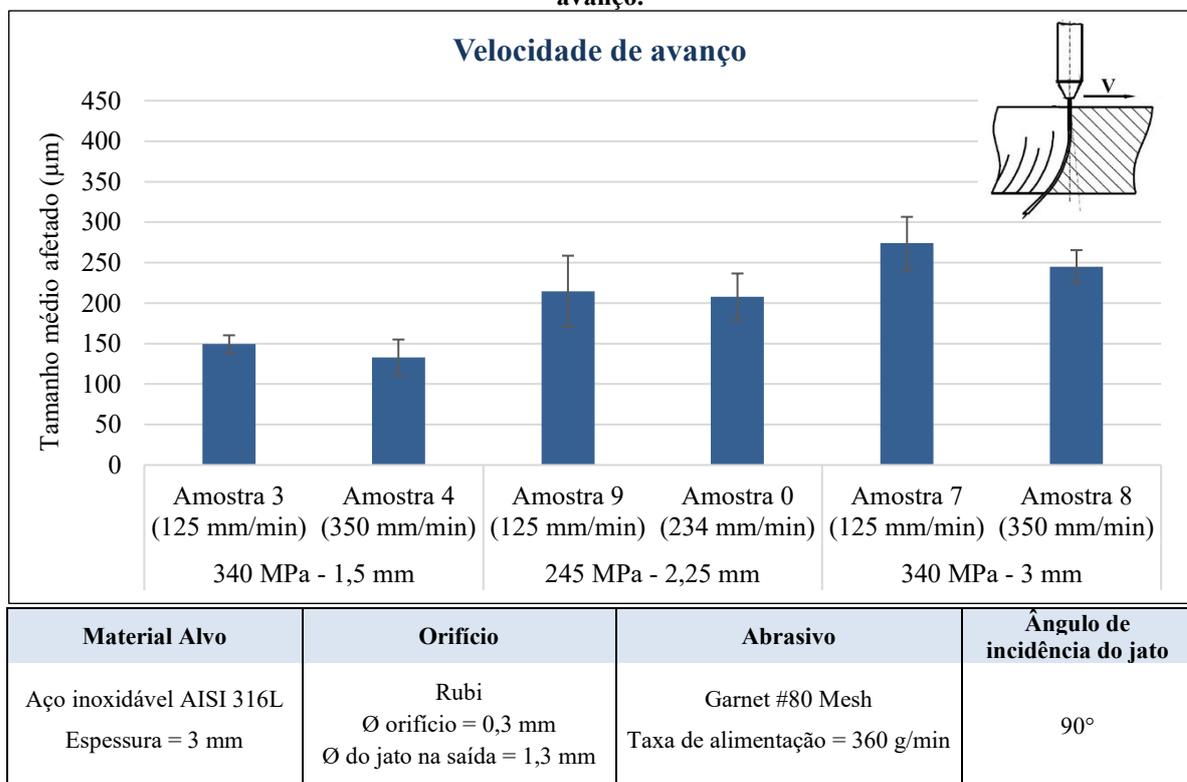
Fonte: Autor.

De acordo com os resultados observados anteriormente, a medida do tamanho médio da zona afetada revela valores muito próximos entre as amostras, conforme pode ser visto na Figura 42. A análise estatística dos dados usando o teste t de Student indicou que a diferença verificada entre as condições não é significativa, e, portanto, a velocidade de avanço não apresentou impacto direto no acabamento de superfície das amostras.

Contudo, é importante ressaltar que o aumento na velocidade de avanço pode acarretar no corte incompleto das peças, principalmente quando associado a pressões de corte reduzidas, conforme observado nas condições 2, 6, 10 e 11, nas quais os parâmetros utilizados não foram suficientes para a completa remoção das amostras.

A correta seleção da velocidade de avanço deve também levar em consideração o impacto econômico deste parâmetro, uma vez que velocidades menores de corte acarretam em maiores tempos de usinagem e conseqüentemente no aumento da quantidade de abrasivo, energia e tempo de mão de obra utilizados, encarecendo significativamente o processo. Desta forma, a otimização deste parâmetro deve sempre levar em consideração os requisitos de projeto a serem atendidos, sendo indicada a redução da velocidade de avanço quando busca-se atingir estreitas tolerâncias dimensionais e em casos onde a espessura da peça exija um maior tempo para a perfuração completa.

Figura 42 – Comparativo entre as distâncias médias afetadas pelo corte quando variada a velocidade de avanço.

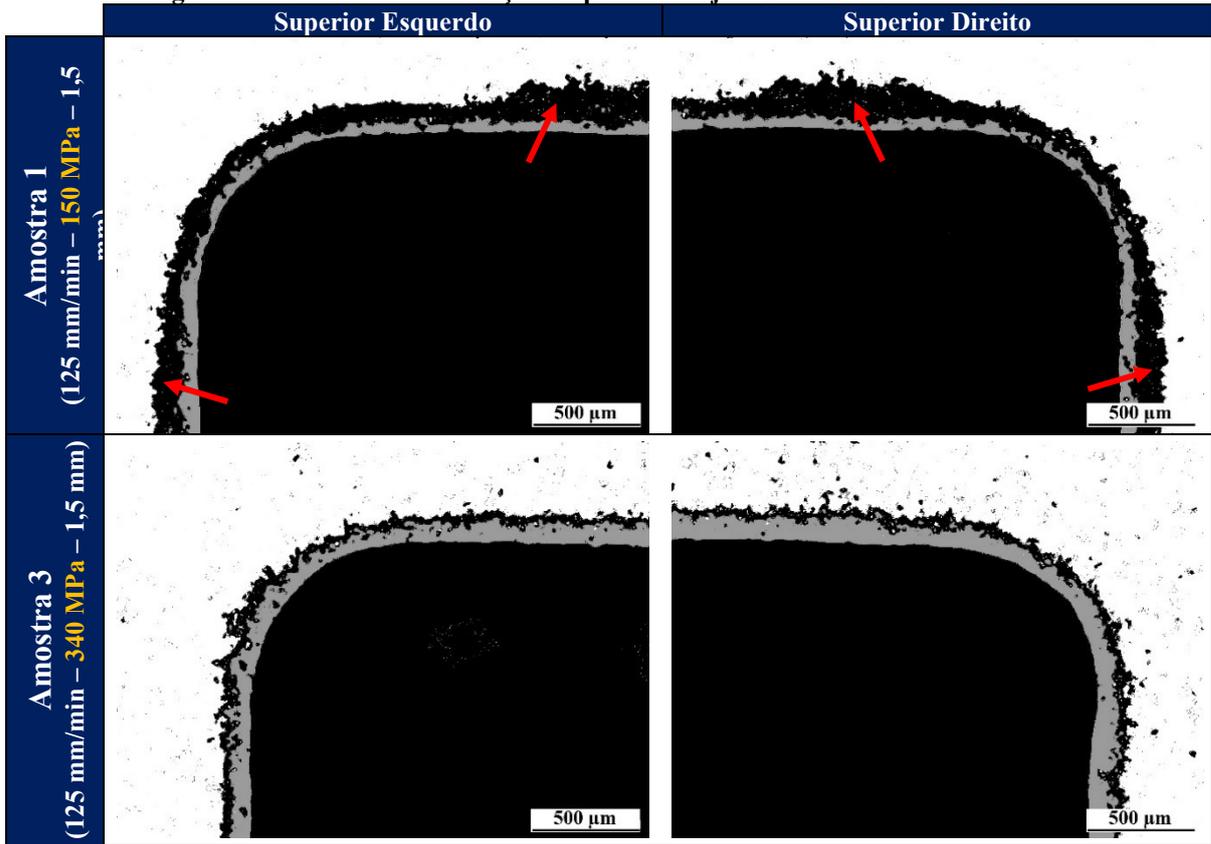


Fonte: Autor.

5.1.3. Pressão do jato

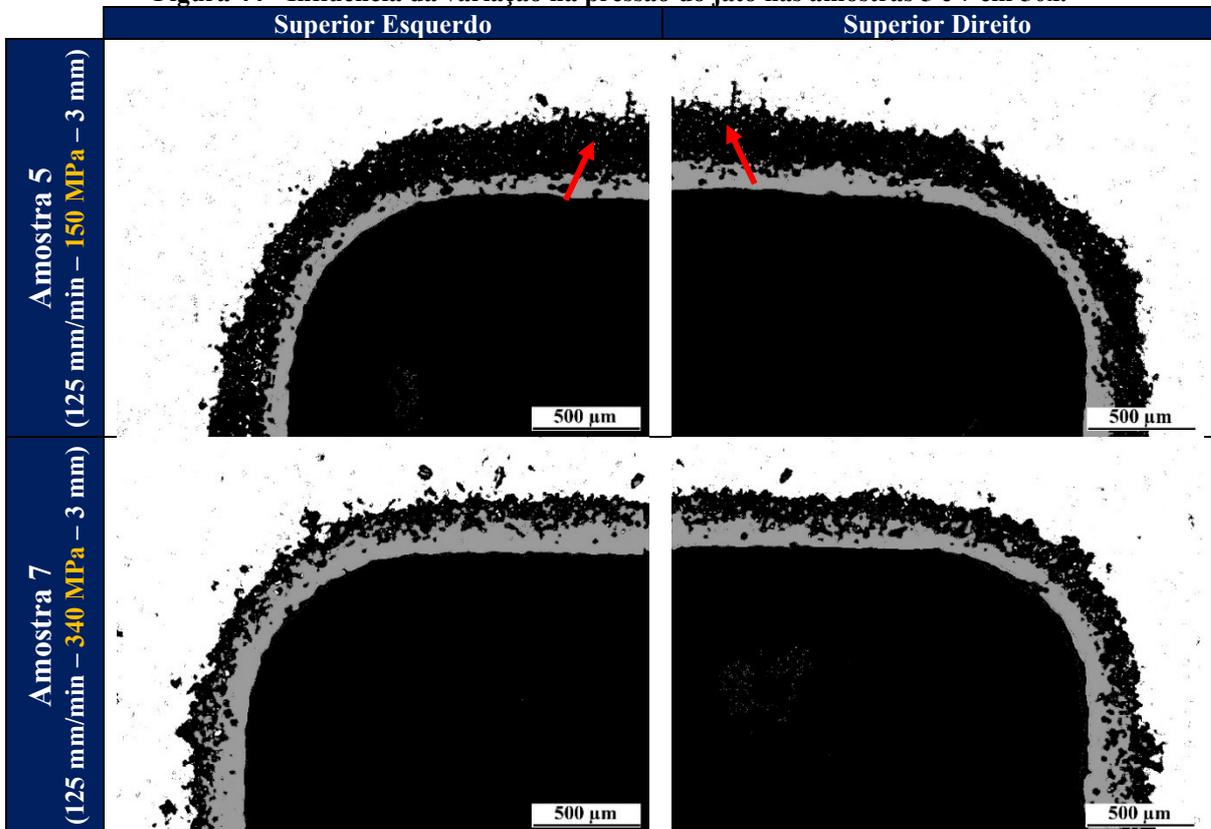
A avaliação da influência da variação da pressão do jato na qualidade final do corte revelou um baixo impacto deste parâmetro no tamanho da zona afetada, como pode ser observado nas Figuras 43 e 44. Contudo, é possível observar nas amostras fabricadas utilizando menores pressões pontos onde há um aumento no tamanho da zona afetada, principalmente nas regiões próximas ao topo do canal, o que sugere que o uso de pressões elevadas pode ser benéfico na redução da dispersão dos resultados, uma vez que reduz a incidência destes desvios. Alterações visíveis na geometria dos cortes não foram verificadas entre as condições de corte.

Figura 43 – Influência da variação na pressão do jato nas amostras 1 e 3 em 50x .



Fonte: Autor.

Figura 44 - Influência da variação na pressão do jato nas amostras 5 e 7 em 50x.



Fonte: Autor.

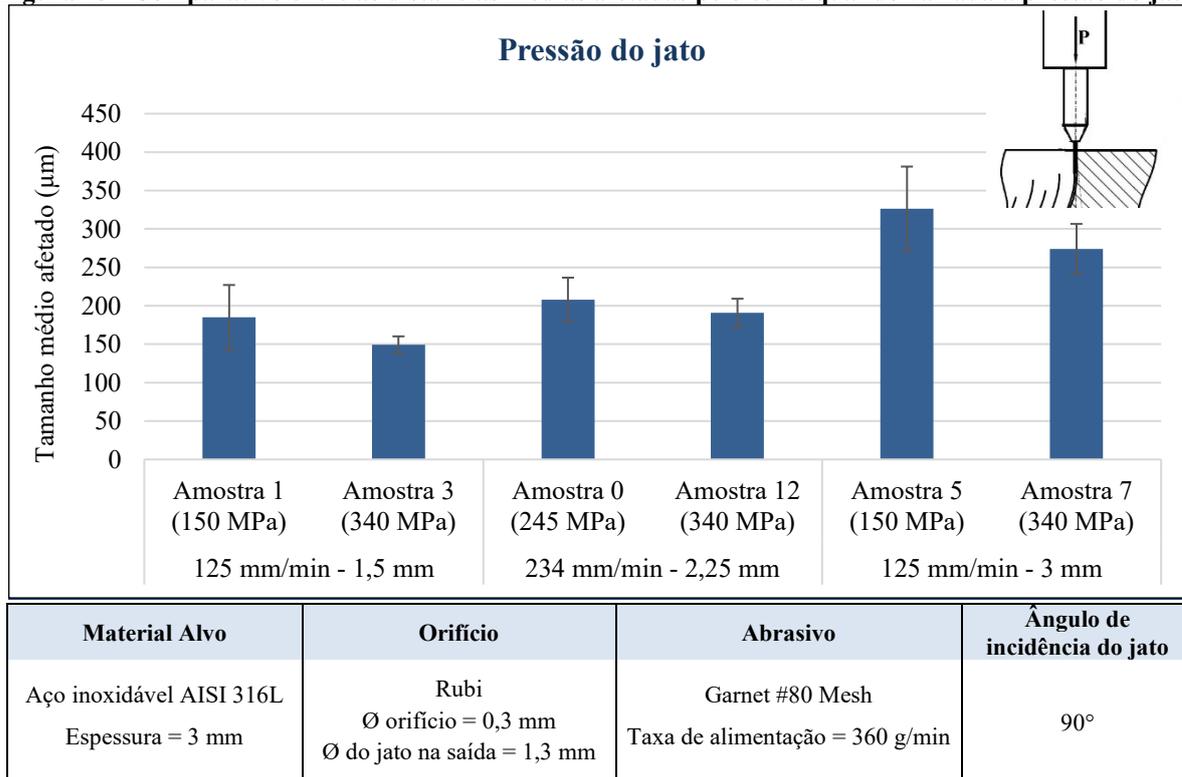
Quando quantificado o tamanho da zona afetada, conforme apresentado na Tabela 6 e representado graficamente na Figura 45, os resultados reforçam as conclusões inferidas qualitativamente, em que, apesar de valores médios muito próximos, menores desvios padrão foram sempre observados nas condições de maior pressão. A análise estatística utilizando o teste t de Student indica que, tal qual a velocidade de avanço, uma diferença não significativa entre as condições com diferentes pressões do jato é observada, demonstrando que variações neste parâmetro não apresentam impacto significativo no tamanho médio da região afetada.

Tabela 6 - Resultados obtidos ao avaliar a influência da pressão no tamanho da região afetada.

Amostra	Pressão (MPa)	Tamanho Médio (μm)	Desv. Padrão
Amostra 1	150	185,2	41,9
Amostra 3	340	149,3	10,9
Amostra 0	245	207,8	28,8
Amostra 12	340	190,8	18,4
Amostra 5	150	326,3	54,9
Amostra 7	340	274,0	32,6

Fonte: Autor.

Figura 45 - Comparativo entre as distâncias médias afetadas pelo corte quando variada a pressão do jato.



Fonte: Autor.

5.1.1. Comparação geral

Visando a definição de uma condição otimizada de corte para a manufatura de núcleos de trocadores de calor unidos por difusão, fez-se a comparação geral entre as condições estudadas. Os resultados foram classificados com base na avaliação visual da forma dos cortes e do tamanho médio medido para a zona afetada. Deste modo, fica evidente que distâncias menores entre o bocal e a peça devem ser utilizadas, sendo o parâmetro que apresentou maior impacto no tamanho da zona afetada originada durante o corte.

Pressões de corte maiores são também indicadas, uma vez que reduz a dispersão dos resultados de tamanho médio da zona afetada e aumenta a taxa de remoção de material, permitindo o corte completo do material mesmo quando utilizadas maiores velocidades de avanço. A velocidade de avanço demonstrou ser um parâmetro de baixo impacto na qualidade de superfície dos cortes, entretanto, apresentou impacto direto na qualidade geométrica dos canais, profundidade de corte e conseqüentemente na produtividade do equipamento.

Deste modo, a fim de selecionar corretamente a velocidade de avanço deve-se considerar a relação entre a qualidade geométrica e profundidade de corte necessárias, com a produtividade esperada. Um resumo dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho pode ser verificado na Tabela 7.

Tabela 7 – Impacto dos parâmetros estudados na qualidade final dos cortes.

Parâmetro	Tamanho Médio da Zona Afetada	Precisão Geométrica
↑Distância entre o bocal e a peça	↑↑	-
↑Velocidade de Avanço	-	↓↓
↑Pressão do jato	↓	-

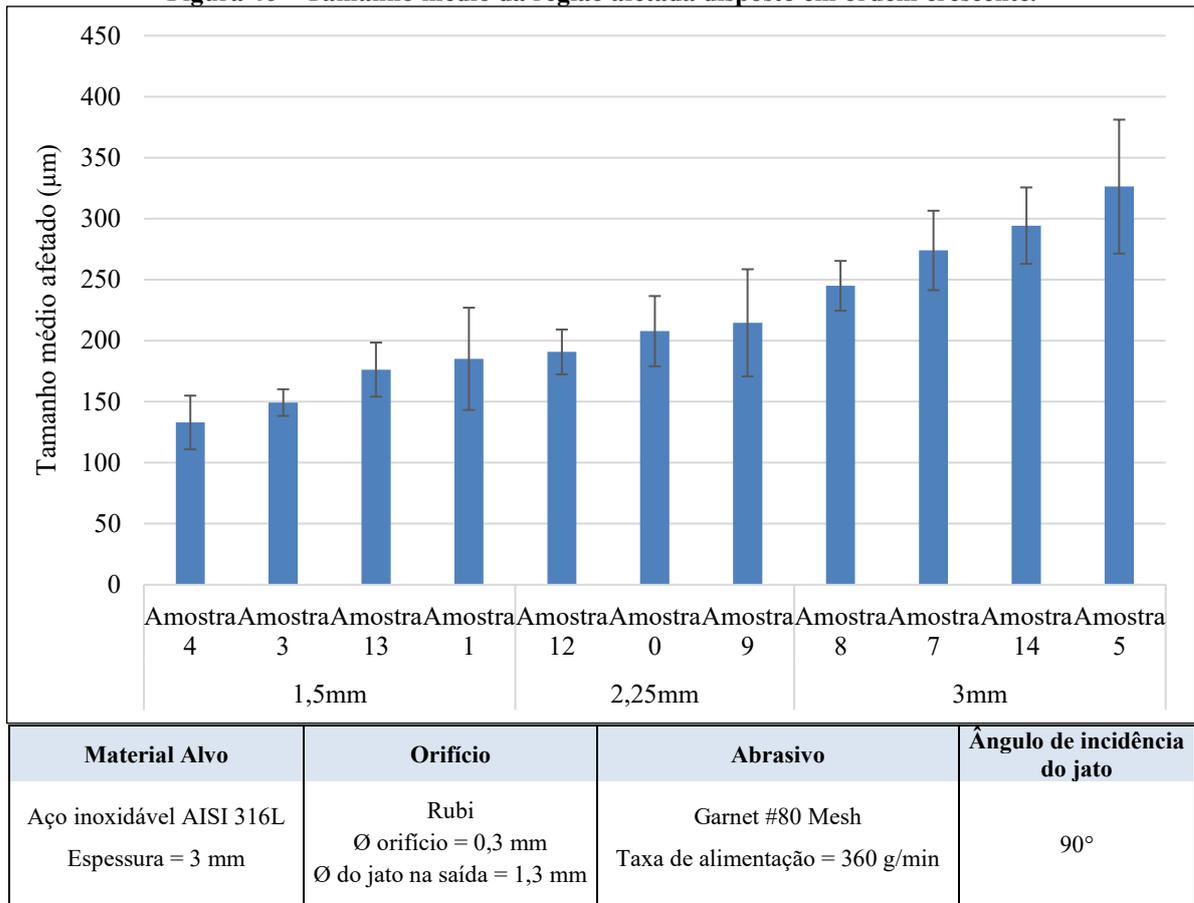
Fonte: Autor.

Para verificar o menor tamanho médio de zona afetada, as amostras foram distribuídas em ordem crescente de tamanho médio da zona afetada, sendo observado que a amostra 4 apresentou o menor tamanho médio (Figura 46). Contudo, dada a elevada velocidade de avanço utilizada, verificou-se nesta condição a perda de tolerância geométrica do corte, de modo que esta foi descartada na escolha da melhor condição. Assim, a amostra 3 apresentou o segundo menor tamanho médio afetado, baixa dispersão entre os valores medidos e tolerância geométrica adequada à aplicação, sendo definida como a melhor condição para união por difusão.

Na extremidade oposta do gráfico verificam-se as condições nas quais o processo afetou com maior intensidade a superfície das peças, sendo a amostra 5 a condição que apresentou o maior tamanho médio da região afetada, 326,3 μm , e conseqüentemente o maior potencial de impactar negativamente a qualidade do processo de união por difusão.

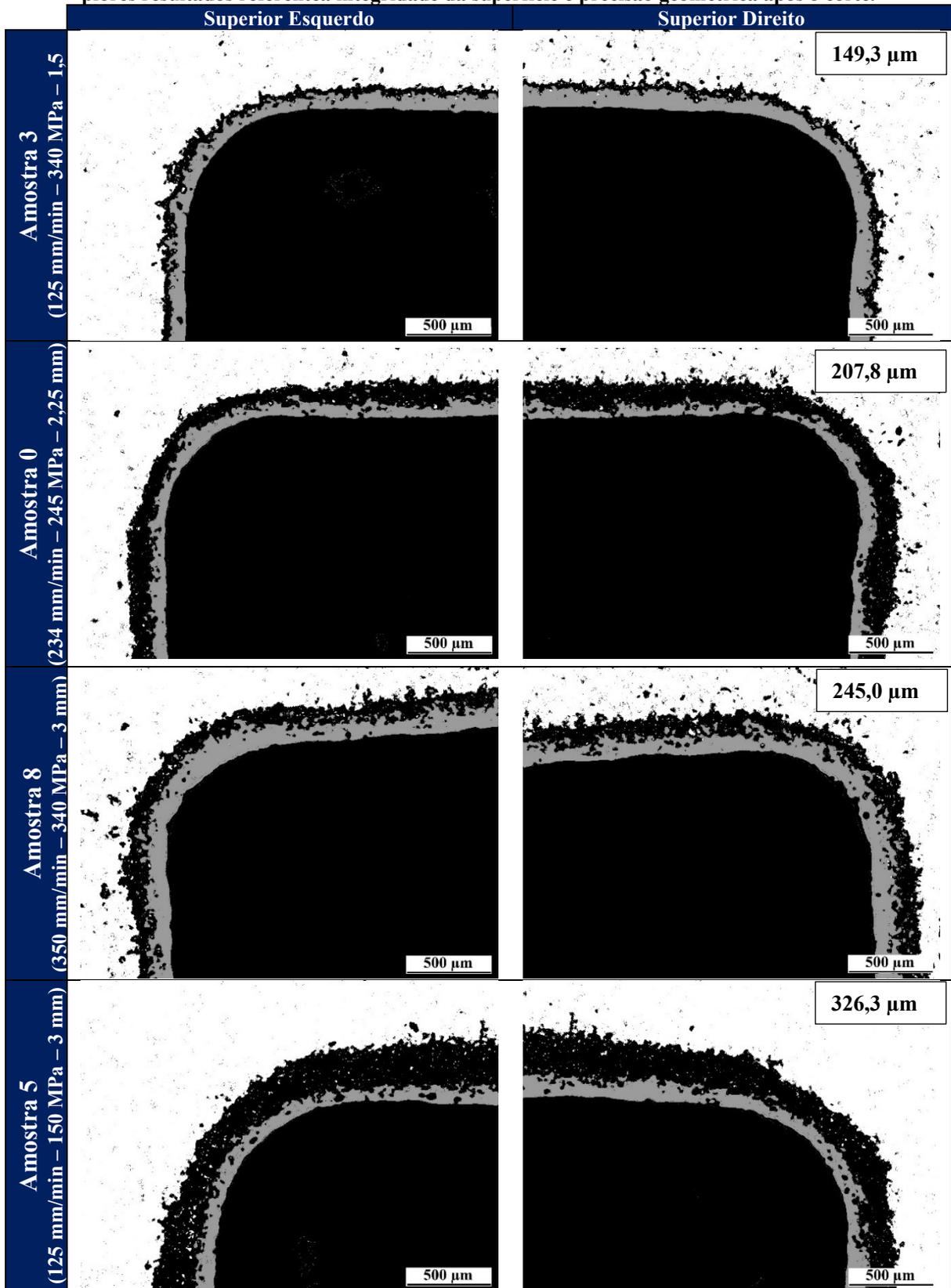
Uma representação visual destes resultados pode ser observada na Figura 47, onde são apresentadas as amostras 3, 0, 8 e 5.

Figura 46 – Tamanho médio da região afetada disposto em ordem crescente.



Fonte: Autor.

Figura 47 -Comparativo geral em aumento de 50x entre as condições que apresentaram os melhores e piores resultados referente a integridade da superfície e precisão geométrica após o corte.



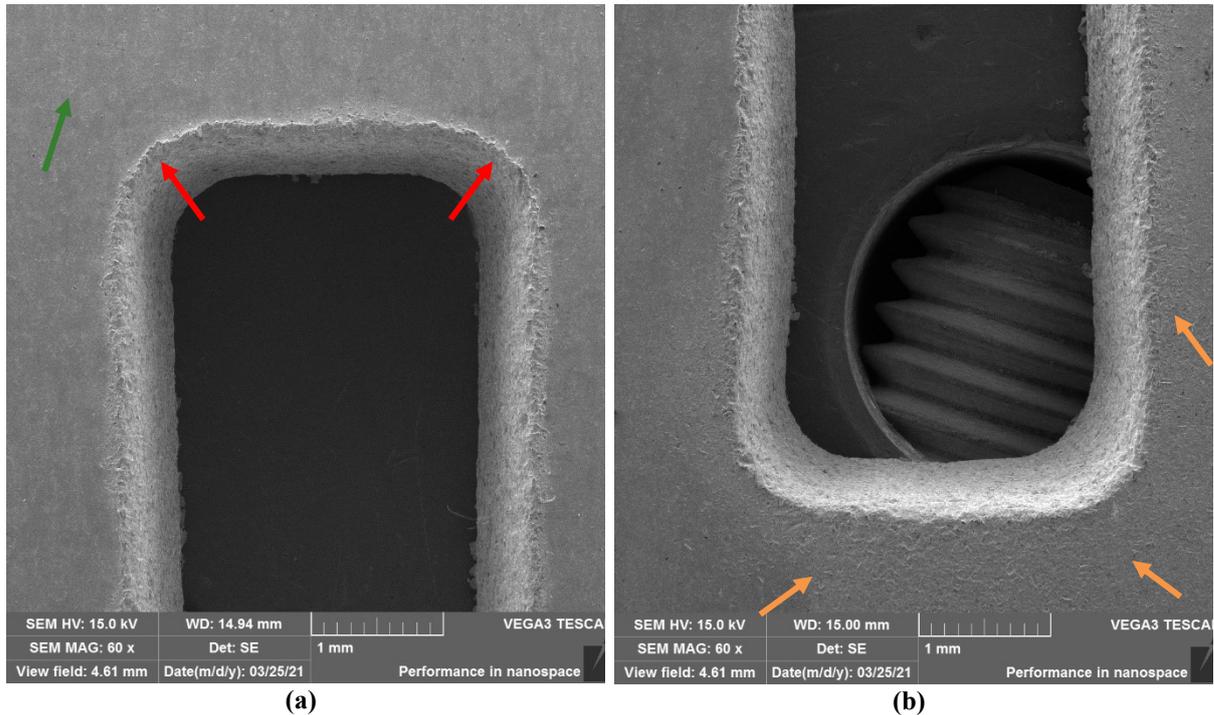
Fonte:Autor.

5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises em microscópio eletrônico de varredura reforçam os resultados verificados em microscópio ótico, sendo observada a presença de zona afetada nas regiões próximas ao corte, a qual varia de tamanho conforme são alterados os parâmetros de corte. Contudo, em virtude da capacidade de foco em regiões com diferentes profundidades, a análise com o MEV permite a obtenção de mais informações a respeito da textura observada nas zonas afetadas e possibilita também a visualização da rebarba formada nas bordas dos canais.

Conforme apresentado na Figura 48, utilizando um aumento de 60x são identificados alguns dos defeitos impostos pelo processo de corte na superfície das amostras. Na região superior do canal da face de entrada do jato (a), há um acúmulo de material nas bordas da amostra, na forma de rebarba, a qual assemelha-se a rebarba do tipo *Poisson* descrita por Gillespie & Blotter (1976), predominantemente formada em virtude da deformação plástica das regiões entorno ao impacto das partículas abrasivas e da incrustação destas partículas no material. Na Figura 48 (b) é apresentada a porção inferior do canal desta mesma amostra, onde observa-se também a presença de rebarba nas bordas dos canais. Entretanto, deve ser destacado o fato de a textura de superfície ser diferente da verificada no material de base, a qual atinge uma ampla área da região analisada.

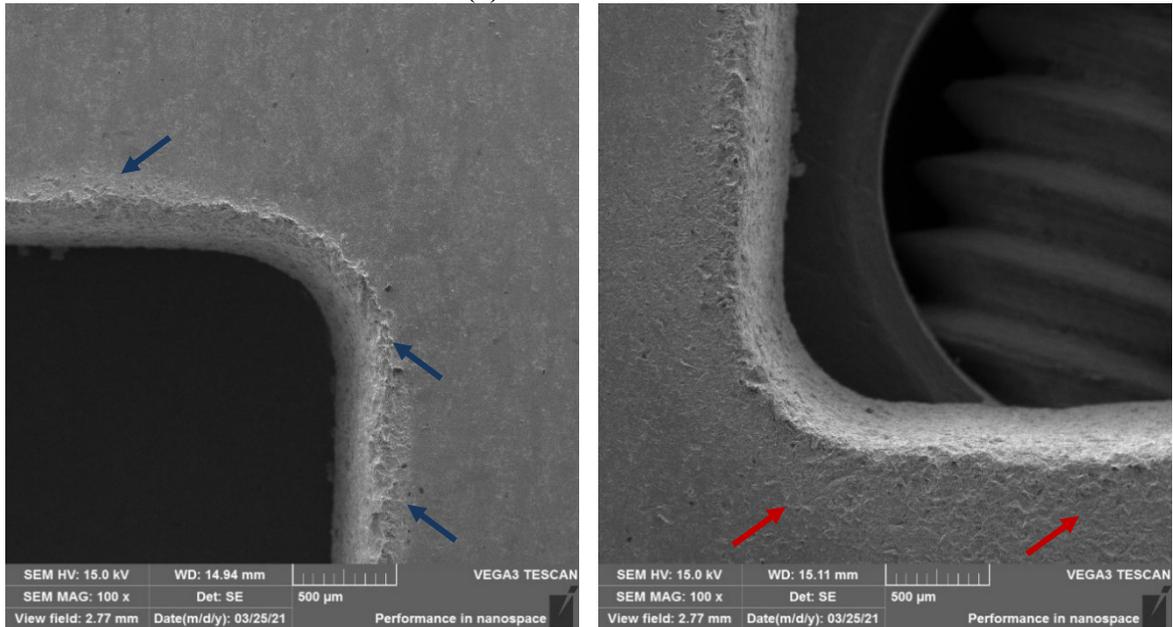
Figura 48 - Amostra 1 em SE, 60x de aumento. Impactos do corte via jato d'água abrasivo nas regiões próximas ao corte. Em verde o acabamento padrão, em vermelho as regiões de acúmulo de material com maior altura e em laranja regiões com textura formada após o corte (a) Região superior. (b) Região inferior.



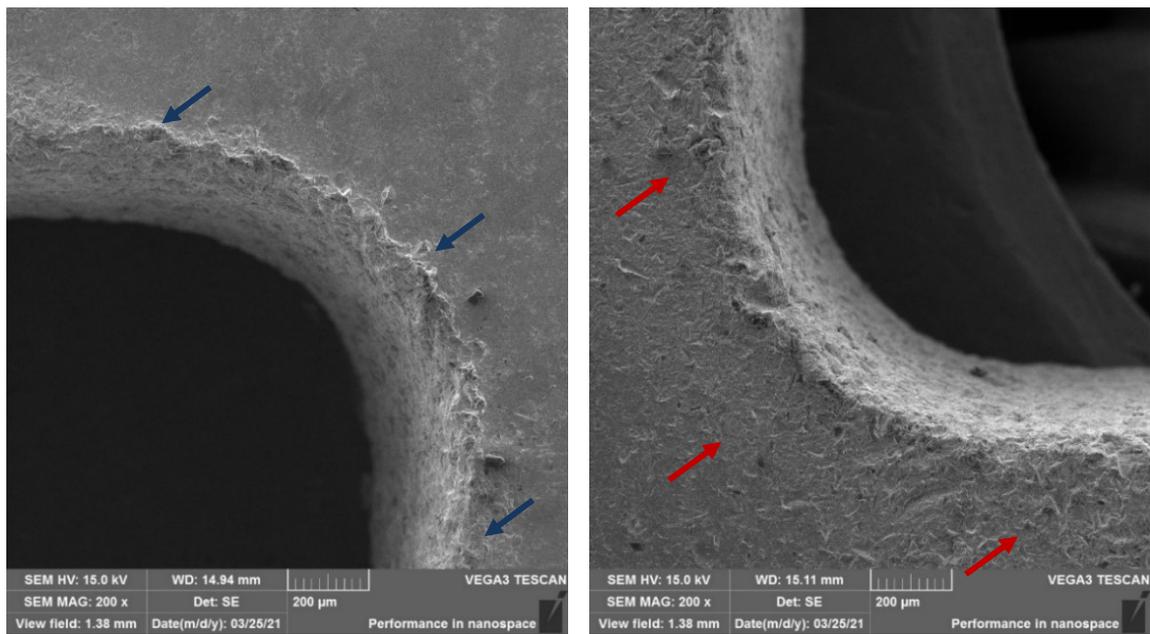
Fonte: Autor.

Na Figura 49 a rebarba e a textura formadas na amostra são avaliadas em 100x e 200x, identificando-se maior deterioração do acabamento de superfície na parte inferior dos canais, em virtude do impacto inicial do jato com a peça até a perfuração do material e estabilização do corte. Ao observar as regiões de topo do canal é verificada uma zona afetada de menor tamanho, a qual se restringe apenas as regiões adjacentes a borda dos cortes, originadas majoritariamente a partir da deformação plástica do material e do espalhamento do jato.

Figura 49 - Amostra 1 em SE, setas azuis indicam a região afetada no topo dos canais, setas vermelhas indicam degradação de uma grande área da superfície na parte inferior dos canais. (a) Aumento de 100x.
(b) Aumento de 200x.



(a)

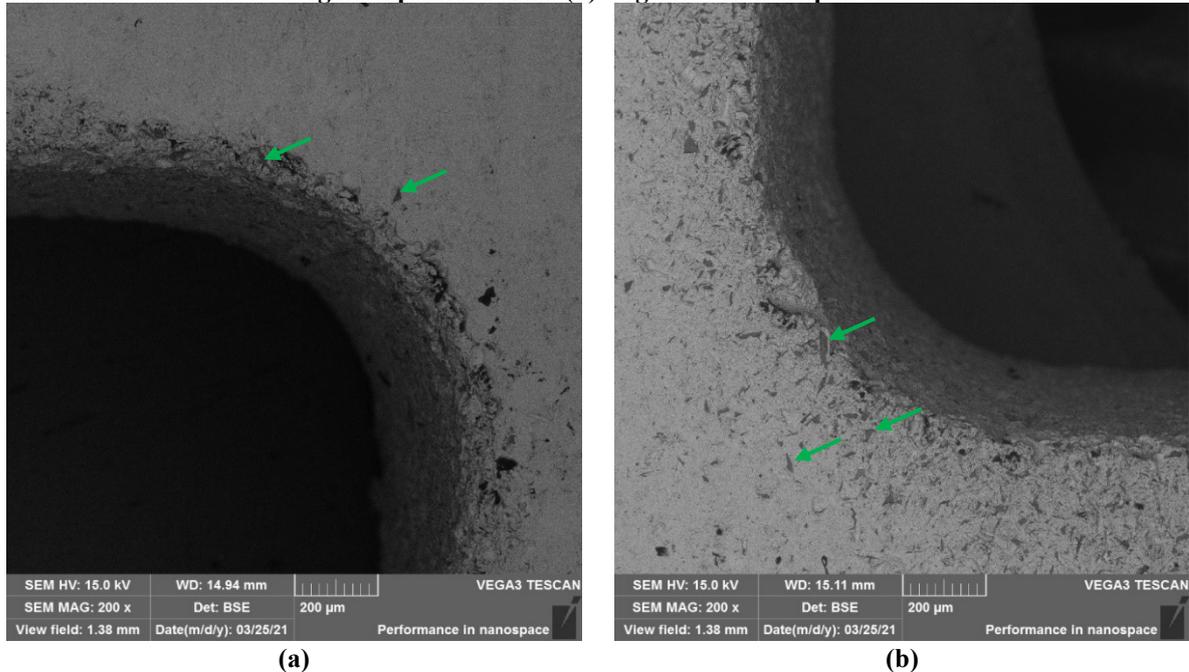


(b)

Fonte: Autor.

As análises em BSE revelam a presença de pontos escuros em meio material de base, tanto na região de topo quanto na base dos canais, conforme observado na Figura 50. O surgimento destes pontos indica a presença de partículas abrasivas incrustadas nestas regiões, sendo a caracterização destes pontos realizada mais à frente no presente trabalho.

Figura 50 -Amostra 1 em BSE, 200x de aumento. Setas indicam as partículas abrasivas incrustadas. (a) Região superior direita. (b) Região inferior esquerda.

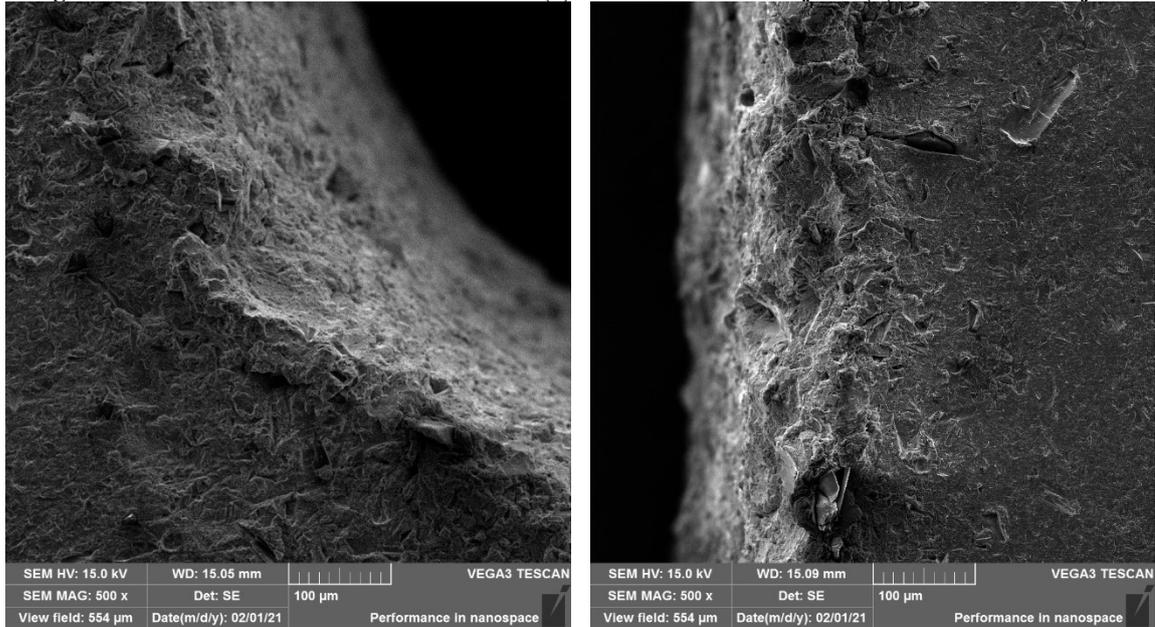


Fonte: Autor.

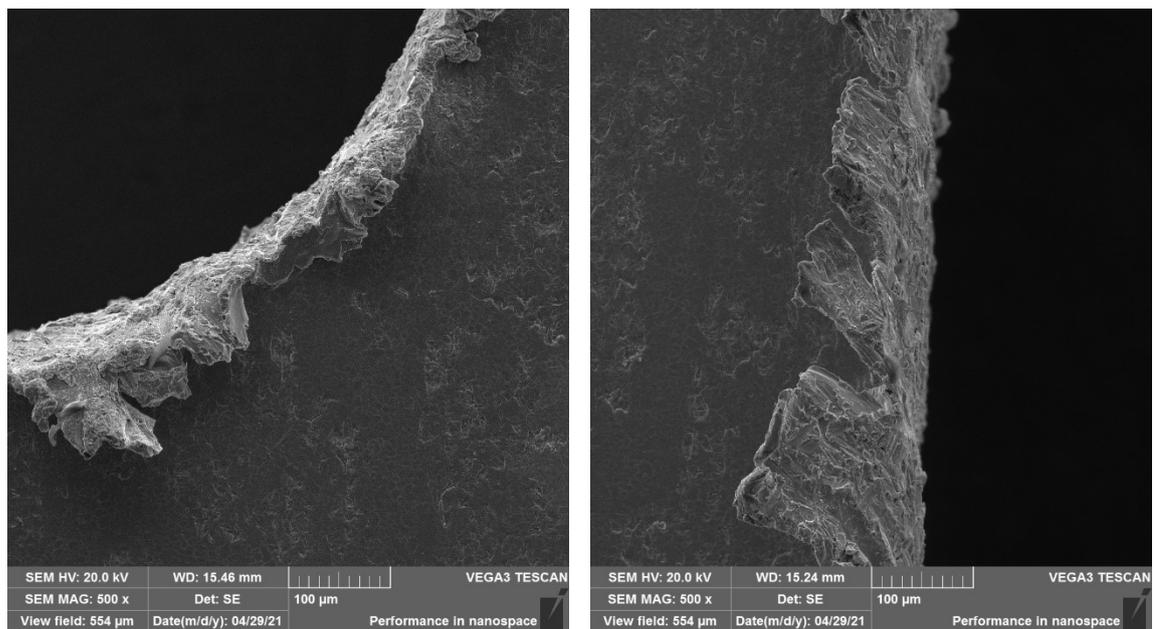
A comparação entre os impactos do processo de corte nas faces de entrada e saída do jato, conforme Figura 51, mostra que ao contrário do que ocorre na face de entrada das amostras, onde há a formação de uma zona afetada pelo corte e de uma pequena protuberância nas bordas, na face de saída observa-se a formação de rebarba, a qual apresenta tamanho significativamente maior, não sendo verificada a presença de uma zona afetada ao longo da borda das amostras.

Contudo, em casos isolados como na amostra 8, foram verificados pontos de ocorrência da deterioração da superfície na face de saída do jato, com aparência similar a observada na face de entrada. Estes pontos são formados em virtude do espalhamento do jato ao colidir com as aletas responsáveis pelo suporte do material dentro do tanque de água, de modo que as partículas abrasivas acabam sendo espalhadas e colididas contra a face inferior da amostra ao invés de serem desaceleradas pela água na piscina do equipamento, causando o desgaste da superfície.

Figura 51 – Amostra 0 em aumento de 500x. (a) Face de entrada do jato. (b) Face de saída do jato.



(a)



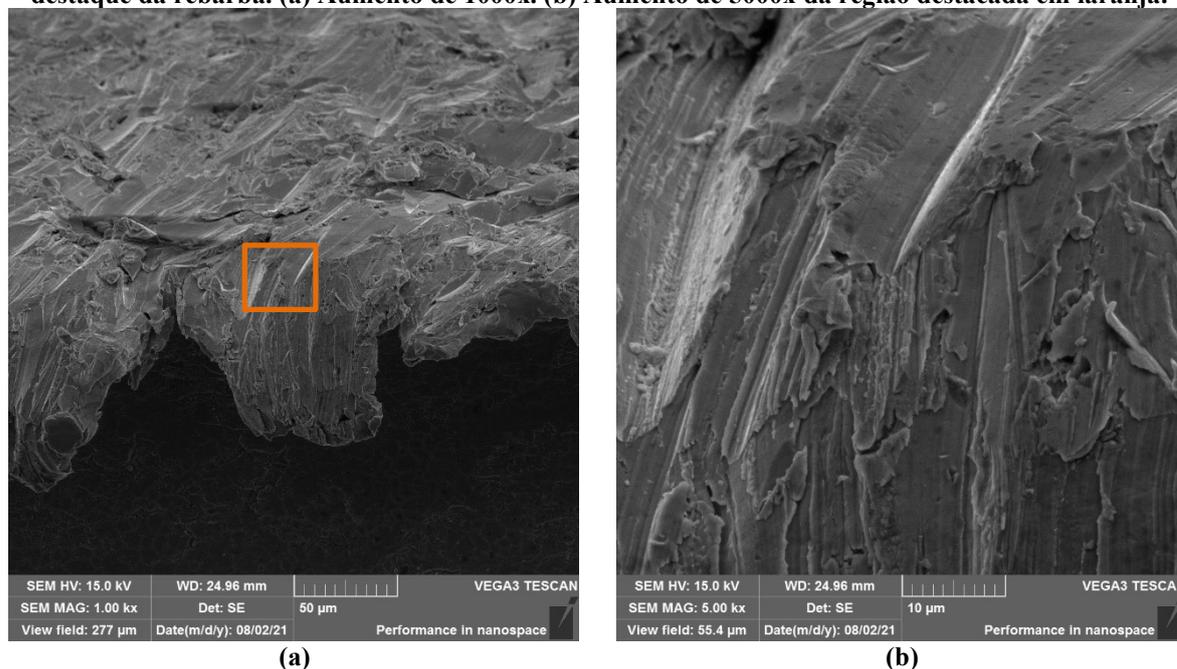
(b)

Fonte: Autor.

Quando avaliada a rebarba formada na face de saída do jato em maiores aumentos, conforme Figura 52, foram verificados resultados similares aos obtidos por Groppetti & Monno (1992), indicando a formação de rebarba do tipo *roll over*. Este tipo de rebarba é característico de processos de usinagem nos quais a ferramenta de corte atravessa o material alvo, de modo que, dada as condições de corte e as propriedades mecânicas do material, o cavaco formado é deformado plasticamente e rotaciona na extremidade do corte, mantendo-se preso ao material ao invés de cisalhar e ser removido. De maneira análoga, no processo de corte via jato d'água abrasivo, este fenômeno é atribuído à ação incompleta de corte das partículas abrasivas, não

sendo capazes de cisalhar o material por completo, fazendo com que este deforme e rotacione na extremidade do corte.

Figura 52 - Face de saída do jato da amostra 3 analisada em MEV com inclinação da amostra em 15° para destaque da rebarba. (a) Aumento de 1000x. (b) Aumento de 5000x da região destacada em laranja.



Fonte: Autor.

A confirmação da presença de partículas abrasivas incrustadas nas regiões adjacentes ao corte foi realizada por meio da análise destes pontos em aumento de 1000x em SE e BSE, aliada à caracterização da composição química dos pontos utilizando EDS.

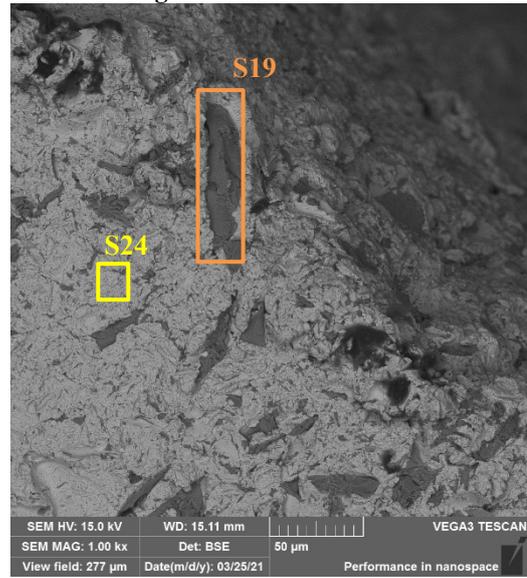
Na Figura 53(b) são destacadas duas regiões da face de entrada do jato, as quais foram avaliadas em EDS. Na região destacada em amarelo observou-se a presença de elementos típicos da composição química do aço inoxidável austenítico 316L, como Fe, Cr, Ni, O e Si. Por outro lado, ao avaliar a região destacada em laranja verificou-se a presença de elementos como O, Fe, Si, Al, Mg, Ca, dos quais o Al, Mg e Ca são característicos da composição química do Garnet e não estão presentes na composição química padrão do aço inoxidável austenítico 316L, confirmando a presença de incrustações de abrasivo na superfície.

Na Figura 54 são apresentados os resultados obtidos em EDS para a face de saída do jato, destacando-se a presença de elementos comuns da composição química padrão do aço inoxidável austenítico 316L como C, Fe, O, Cr, Ni, Mn, Si. Nesta face, elementos típicos da composição química do Garnet não foram observados, indicando a não contaminação desta região por incrustação de partículas abrasivas. Contudo, a presença de elementos como Na, Cl e K foram identificados, os quais acredita-se serem provenientes de impurezas presentes no tanque do equipamento ou nas aletas que suportam as amostras durante o corte.

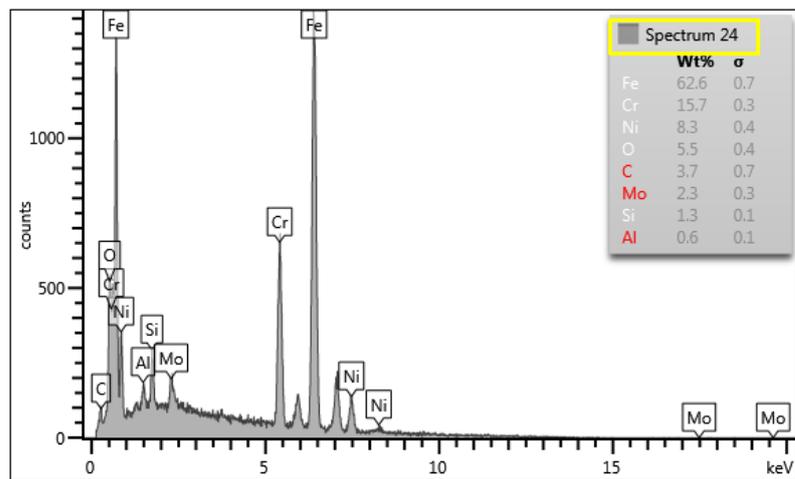
Figura 53 – Amostra 1 face de entrada em 1000x de aumento, revelando a presença de abrasivos incrustados. (a) Imagem em BSE. (b) Imagem em BSE. (c) Resultado da análise de EDS da região destacada em laranja. (d) Resultado da análise de EDS da região destacada em amarelo.



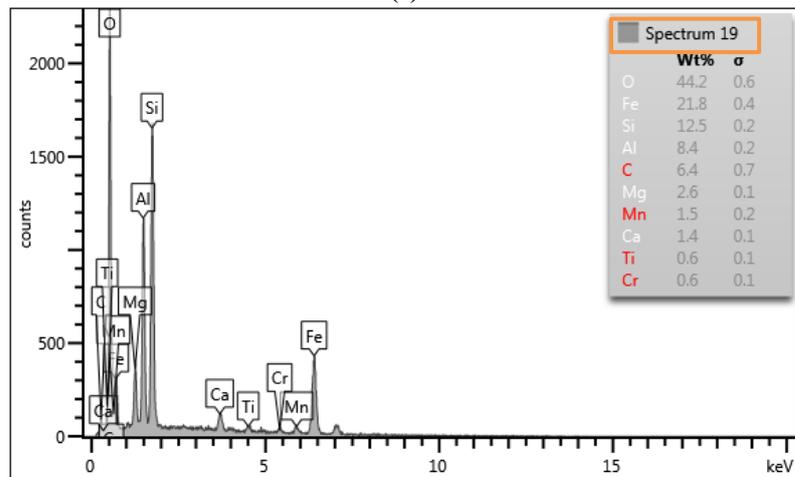
(a)



(b)



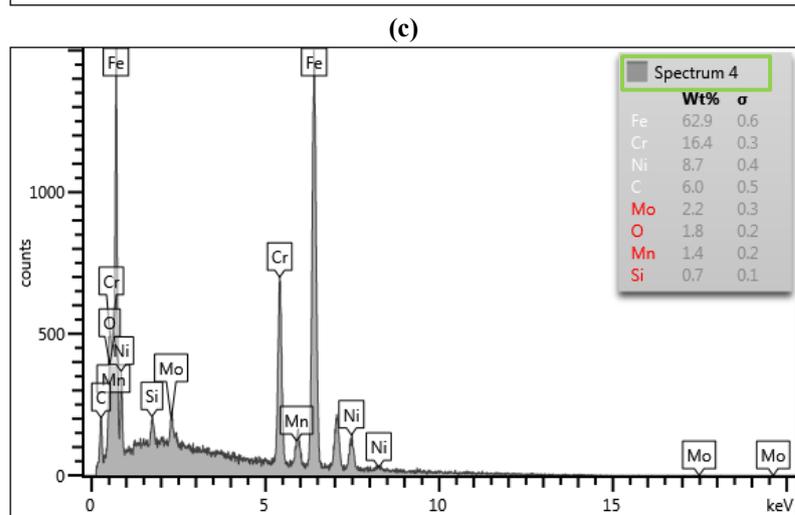
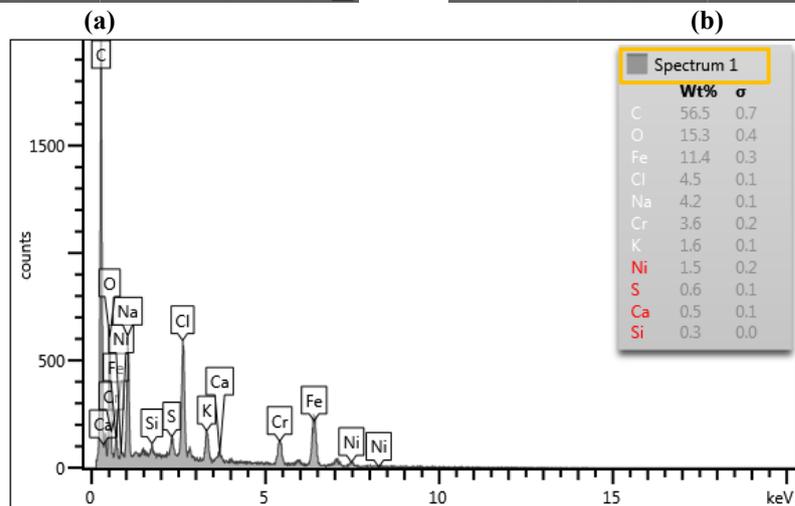
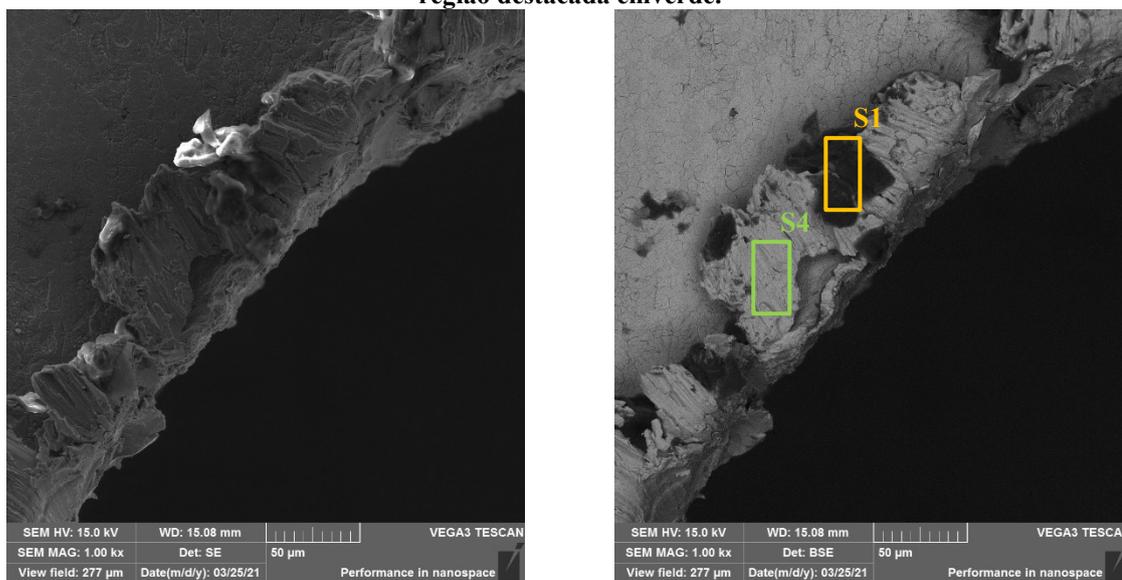
(c)



(d)

Fonte: Autor.

Figura 54 - Amostra 3 face de saída em 1000x de aumento. (a) Imagem em BSE. (b) Imagem em BSE. (c) Resultado da análise de EDS da região destacada em amarelo. (d) Resultado da análise de EDS da região destacada emverde.

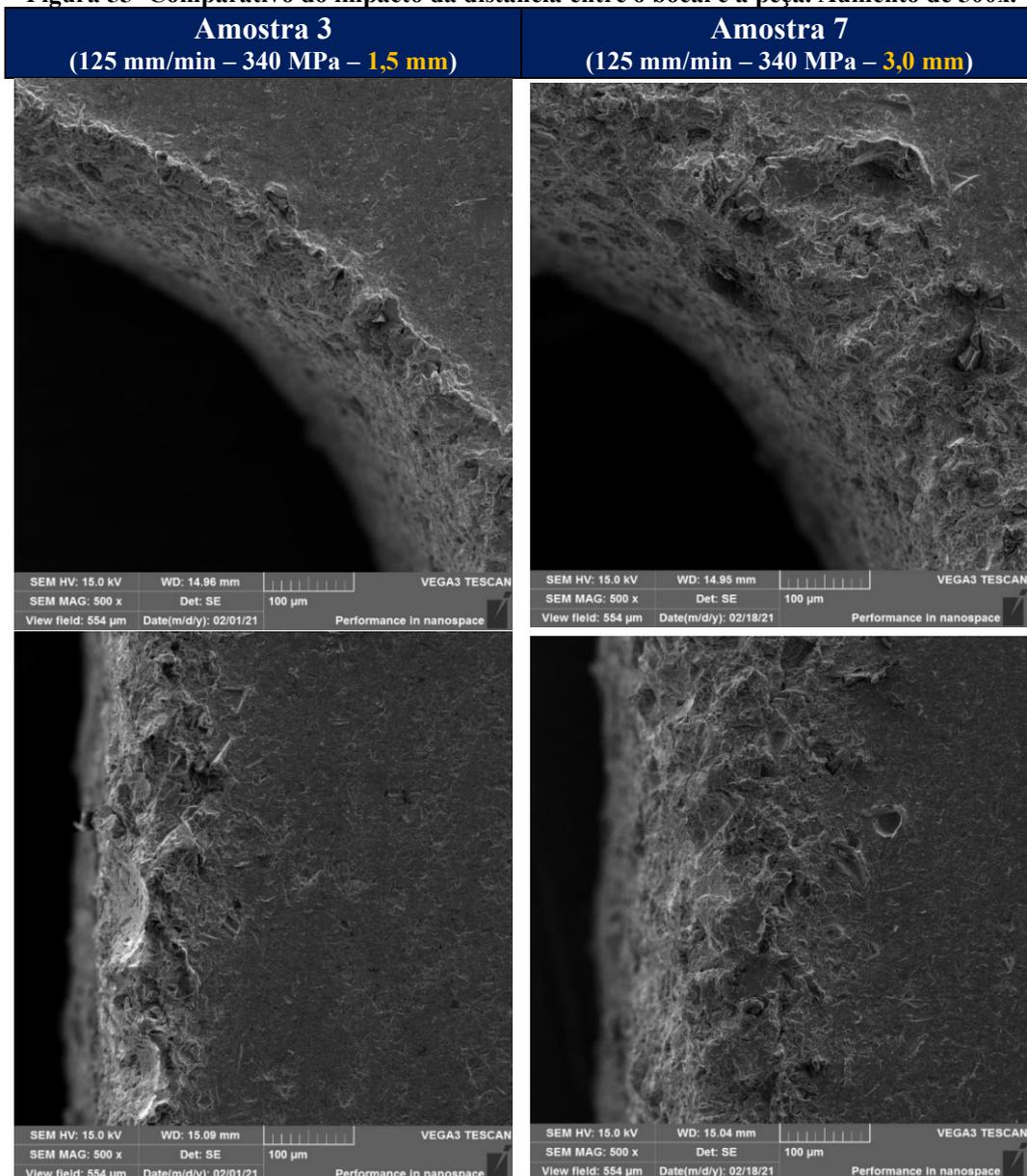


(d)
Fonte: Autor.

5.2.1. Distância entre o bocal e a peça

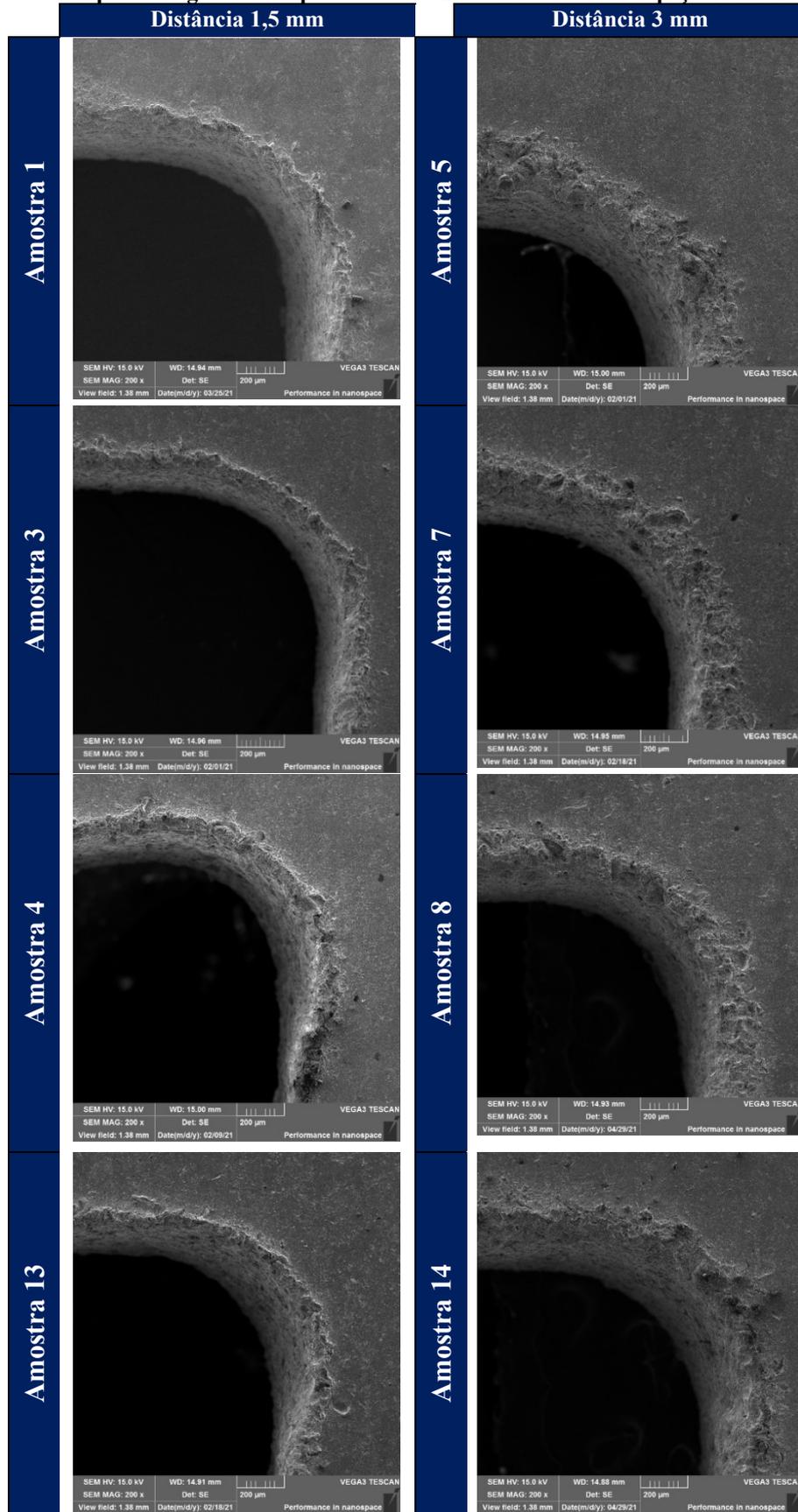
Quando avaliada a influência da distância entre o bocal e a peça na qualidade dos cortes, observa-se que amostras fabricadas utilizando distâncias de 1,5 mm apresentaram uma zona afetada visivelmente menor que as fabricadas com 3 mm de distância, corroborando com os resultados observados com o microscópio ótico. Na Figura 55 são apresentados os resultados obtidos em 500x de aumento das regiões superior direita e centro direita das amostras 3 e 7. Uma comparação geral entre as demais condições, em aumento de 200x, pode ser observada na Figura 56.

Figura 55- Comparativo do impacto da distância entre o bocal e a peça. Aumento de 500x.



Fonte: Autor.

Figura 56 - Comparativo geral do impacto da distância entre o bocal e a peça. Aumento de 200x.

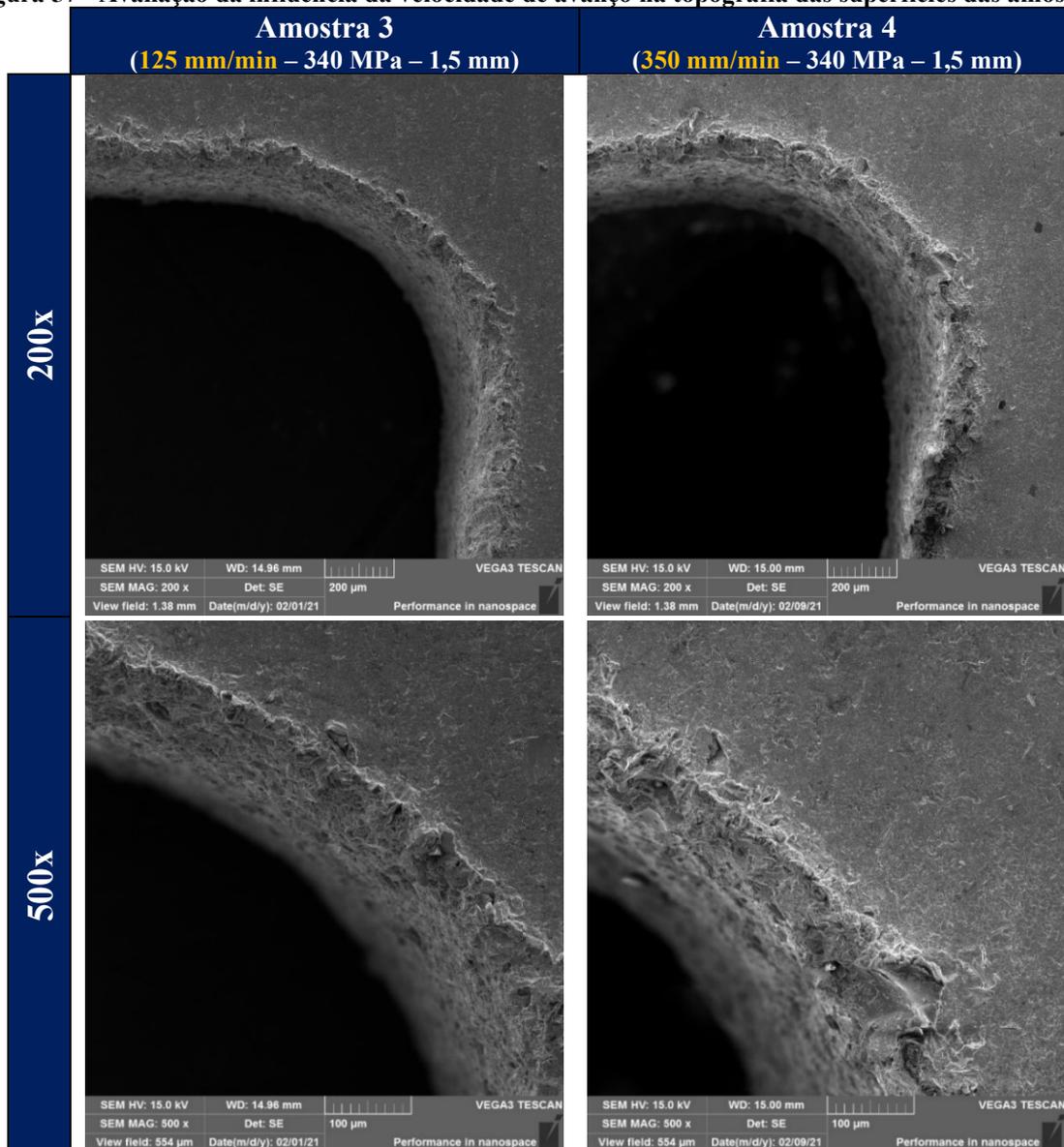


Fonte: Autor.

5.2.2. Velocidade de avanço

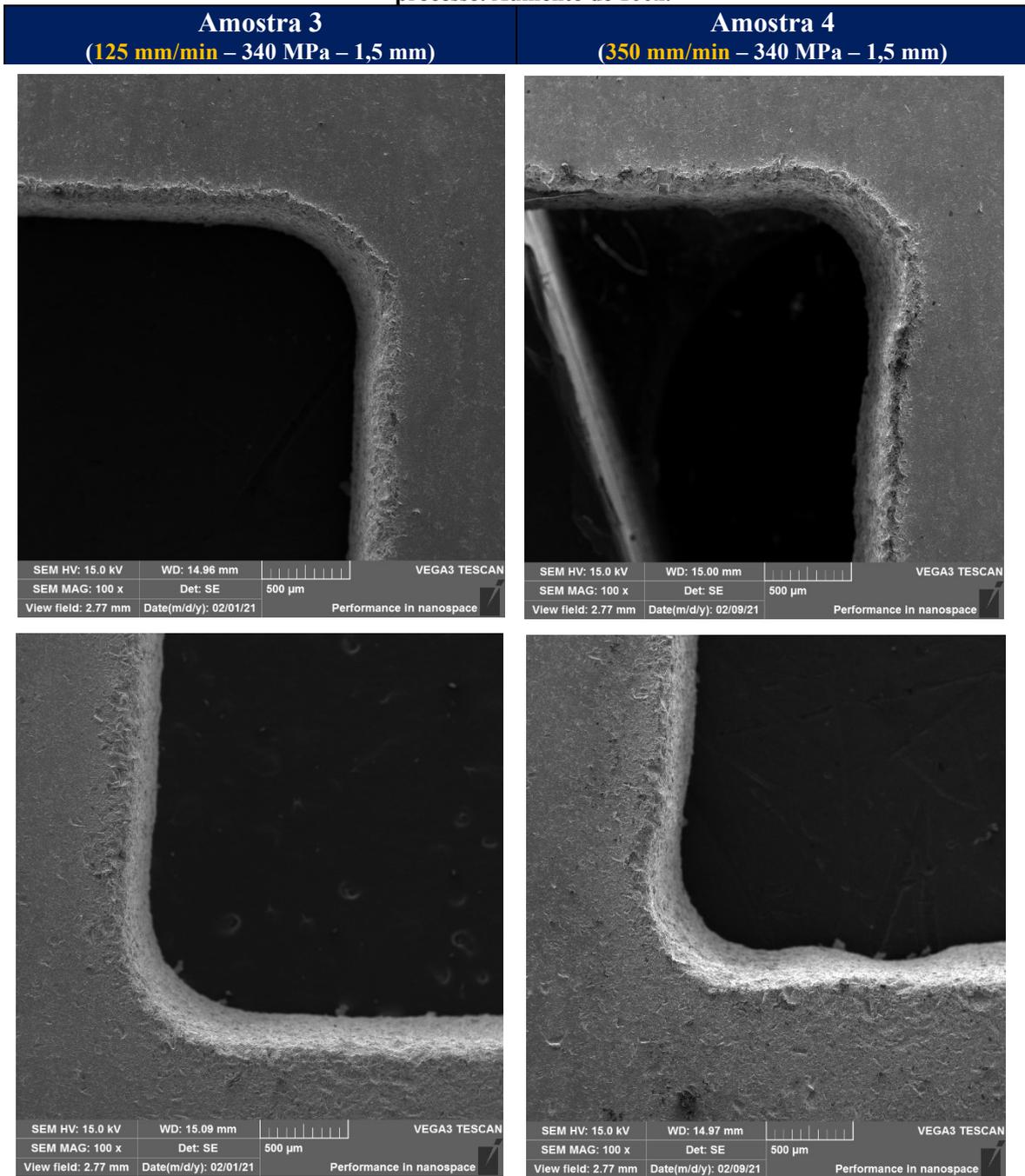
Ao avaliar a influência da velocidade de avanço no tamanho da região afetada formada após o processo de corte, conforme apresentado na Figura 57, alterações visíveis entre as condições não foram observadas. Entretanto, um aumento significativo no número de irregularidades e desvios de geometria nas paredes dos canais quando aumentada a velocidade de avanço foi identificado, sendo possível observá-los com menores aumentos, tal qual exposto na Figura 58. Estes resultados estão de acordo com os observados em microscopia ótica e reforçam o entendimento que a otimização da velocidade de avanço deve considerar o balanço entre a capacidade de atingir os requisitos geométricos de projeto das peças e a produtividade e custo associados ao processo.

Figura 57 - Avaliação da influência da velocidade de avanço na topografia das superfícies das amostras.



Fonte: Autor.

Figura 58 - Comparação da influência do parâmetro velocidade de avanço na tolerância geométrica do processo. Aumento de 100x.

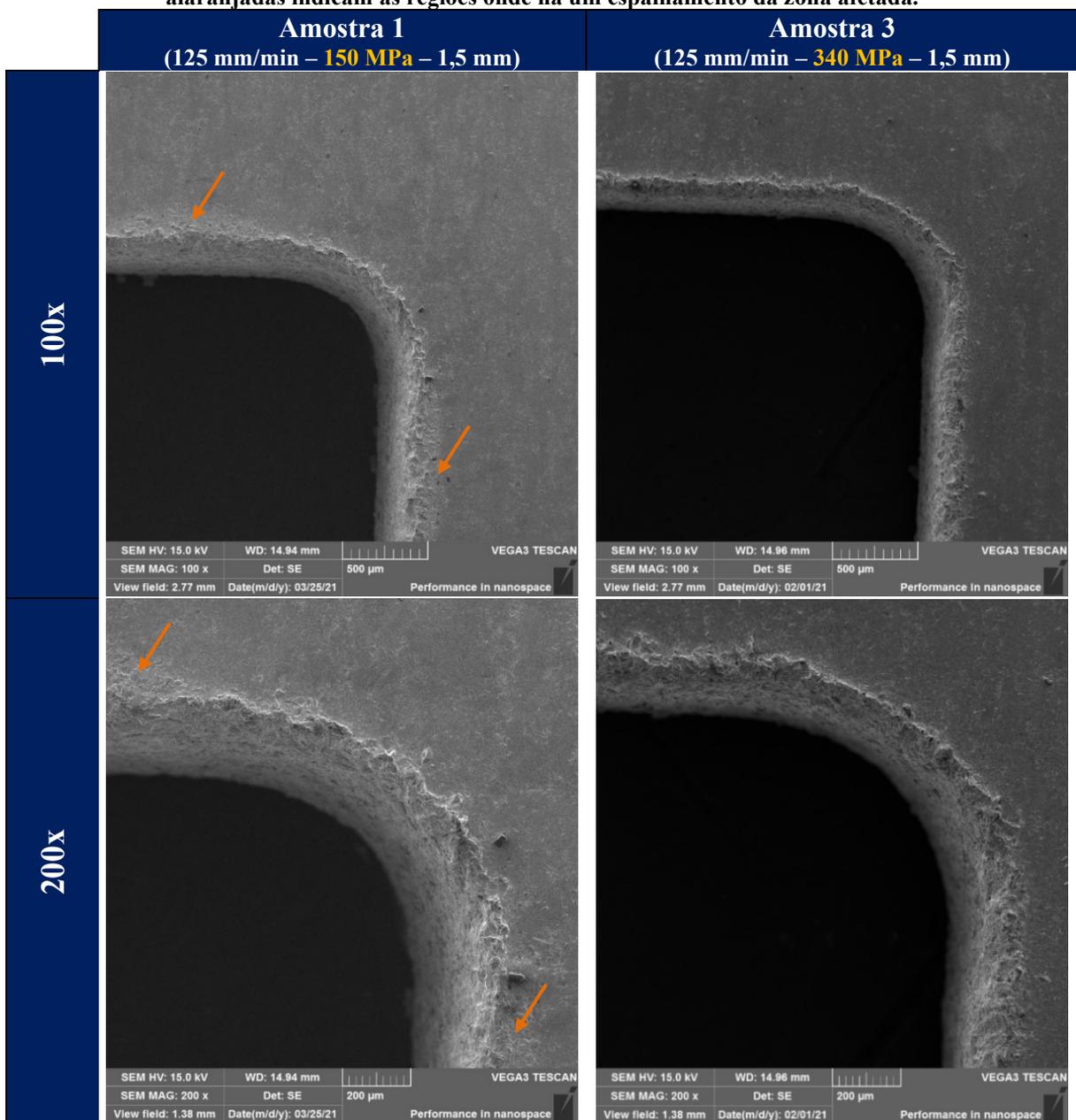


Fonte: Autor.

5.2.3. Pressão do jato

Ao analisar de maneira isolada a influência da pressão do jato na qualidade final do corte, as condições estudadas apresentaram resultados visualmente semelhantes entre as condições. Pontos onde há um aumento no tamanho da zona afetada, tal qual verificado no microscópio ótico, também puderam ser observados, corroborando com o entendimento de que ocorre a redução na dispersão dos resultados quando aumentada a pressão do jato. Na Figura 59 são comparadas as amostras 1 e 3 em aumentos de 100x e 200x, onde é possível verificar na amostra 1 regiões nas quais há um aumento no tamanho da área afetada.

Figura 59 - Comparativo entre resultados variando a pressão do jato. Aumentos de 100x e 200x. Flechas alaranjadas indicam as regiões onde há um espalhamento da zona afetada.



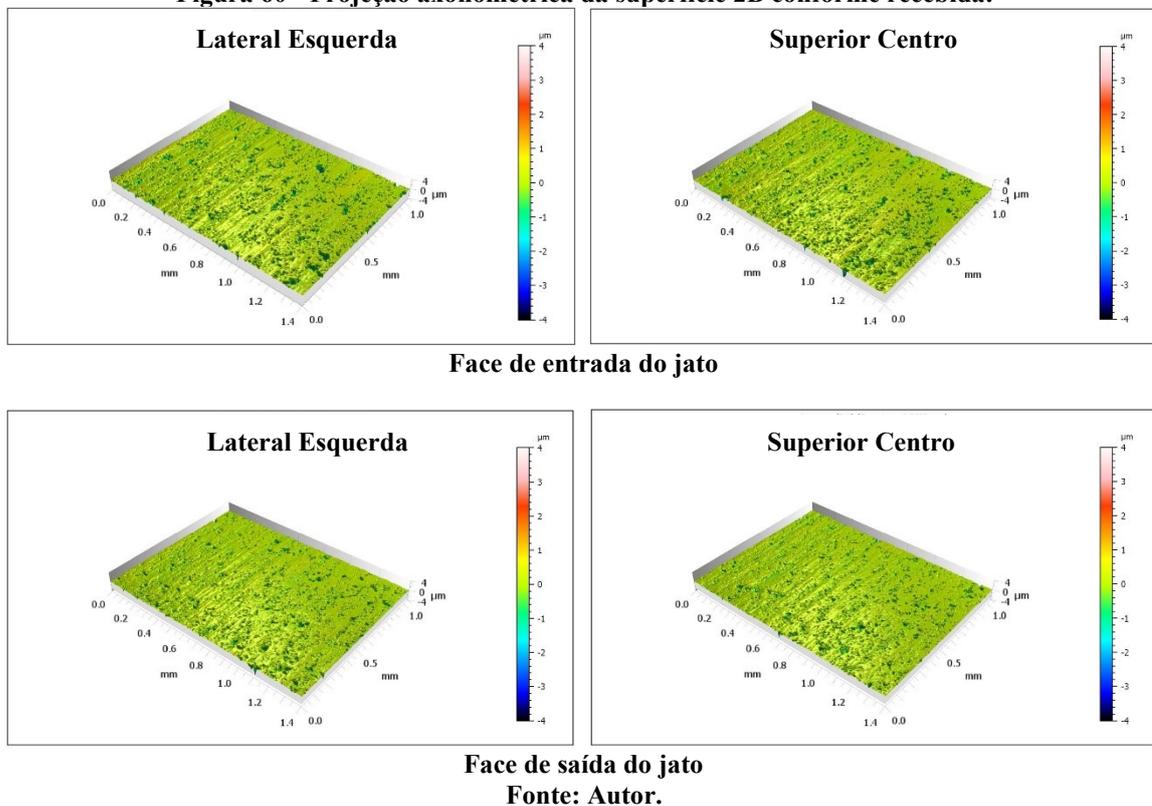
Fonte: Autor.

5.3. Interferometria ótica de luz branca

A análise com interferômetro ótico das chapas de 3mm com acabamento 2B conforme recebidas revelou uma rugosidade média (S_a) de $0,13 \mu\text{m}$ para a face de saída do jato e $0,17 \mu\text{m}$ para a face de entrada, aumento este que foi verificado na face de entrada do jato para todos os demais parâmetros de superfície avaliados.

Quando observadas as projeções axonométricas apresentadas na Figura 60, identificam-se superfícies predominantemente compostas por vales e defeitos abaixo da linha média, com linhas orientadas em uma única direção. Ambas as características são comuns ao processo de laminação empregado na fabricação das chapas, o qual promove o achatamento dos picos e imprime na superfície das chapas defeitos provenientes do rolo laminador.

Figura 60 - Projeção axonométrica da superfície 2B conforme recebida.



Fonte: Autor.

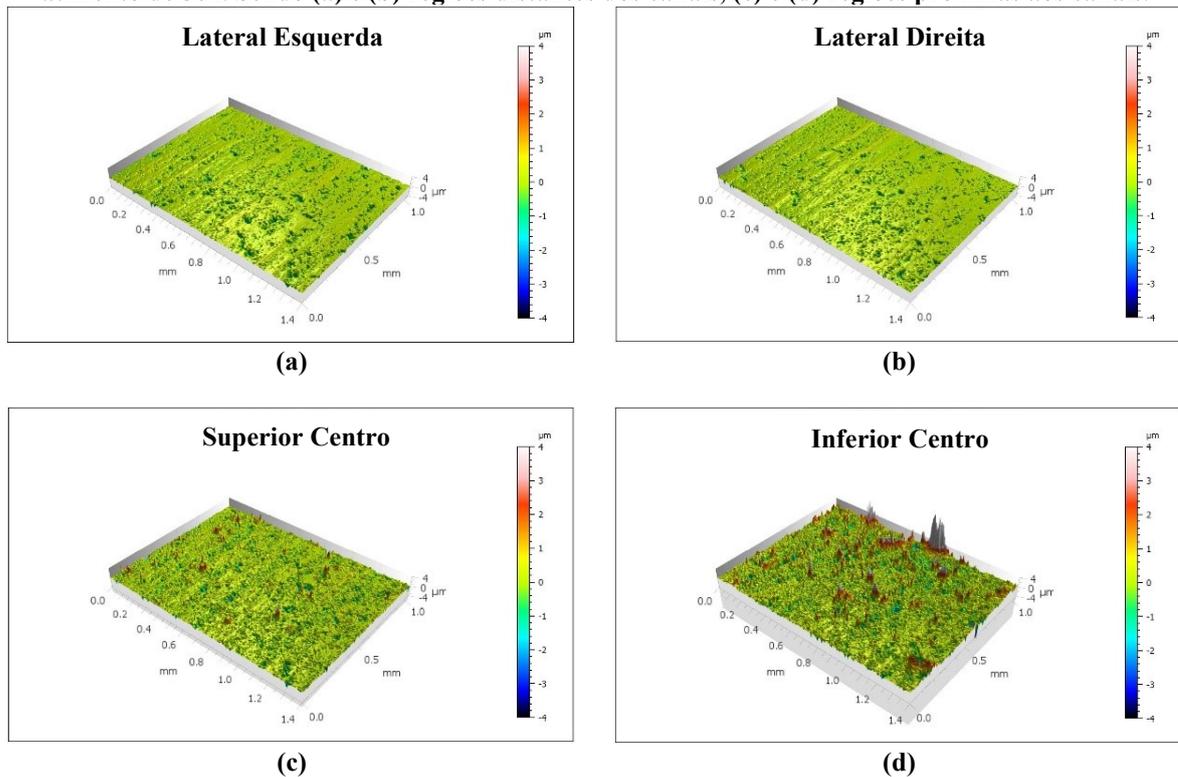
Ao avaliar as superfícies após o processo de corte via jato d'água abrasivo, observou-se uma intensa degradação nos pontos próximos à borda dos canais na face de entrada do jato, apresentados na Figura 61 (c) e (d), região descrita anteriormente como a zona afetada pelo corte. Nestes pontos, observa-se um aumento significativo na quantidade e intensidade de picos presentes, bem como um aumento visível na heterogeneidade da superfície.

Este comportamento pode apresentar impactos deletérios durante o processo de união por difusão, uma vez que o aumento do número de picos, bem como da heterogeneidade da

amostra faz com que os vazios formados durante o contato inicial entre as superfícies apresentem maior tamanho, de modo que é aumentada a quantidade de material a ser transportada a partir de fenômenos difusivos e, conseqüentemente, o tempo necessário para o completo preenchimento dos vazios.

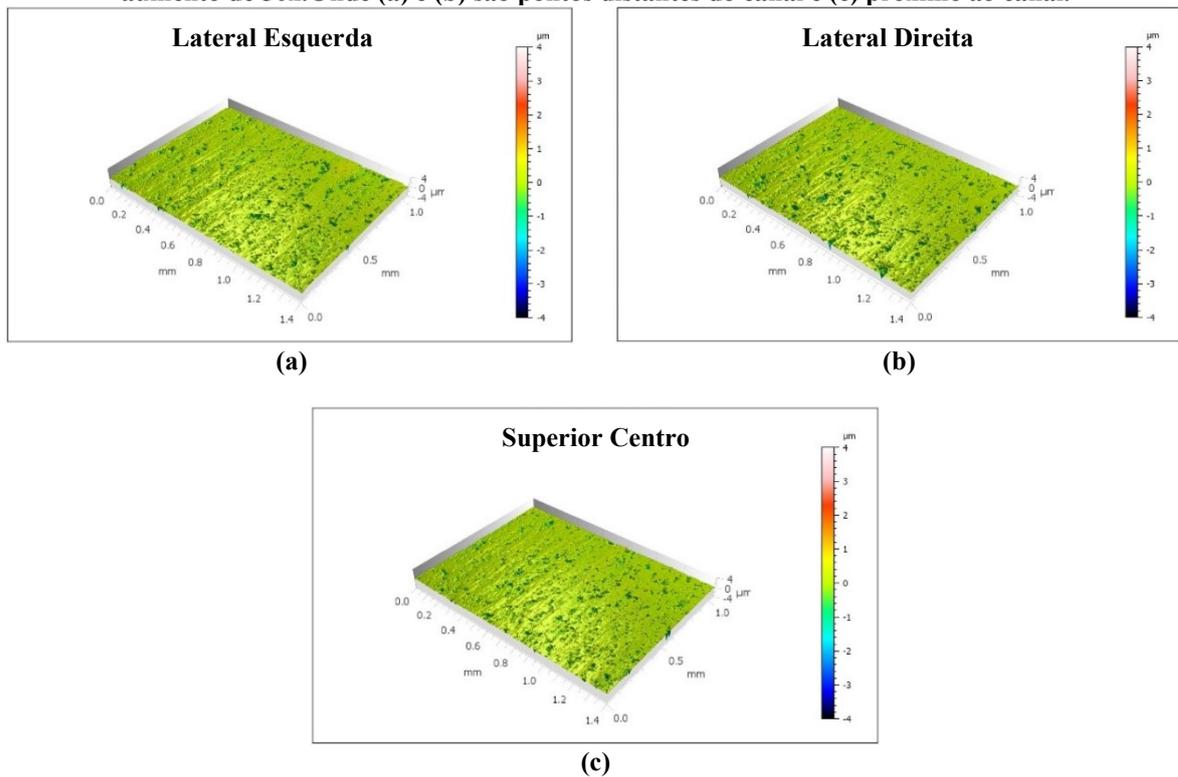
Para os pontos mais distantes da borda dos canais, como os representados na Figura 61 (a) e (b), e para os pontos na face de saída do jato (Figura 62), as amostras apresentam características similares às observadas no material de base, não sendo identificadas alterações significativas em seu acabamento de superfície, de modo que se concluiu que a face de saída do jato, bem como as regiões distantes das bordas, dada a qualidade do acabamento da superfície do material base, não sofreram modificações significativas em seu acabamento de superfície em função do processo de corte.

Figura 61 – Representação 3D da superfície de entrada do jato para a amostra 8 após processo de corte, aumento de 50x. Sendo (a) e (b) regiões distantes dos canais, (c) e (d) regiões próximas aos canais.



Fonte: Autor.

Figura 62 - Representação 3D da superfície de saída do jato para a amostra 8 após processo de corte, aumento de 50x. Onde (a) e (b) são pontos distantes do canal e (c) próximo ao canal.

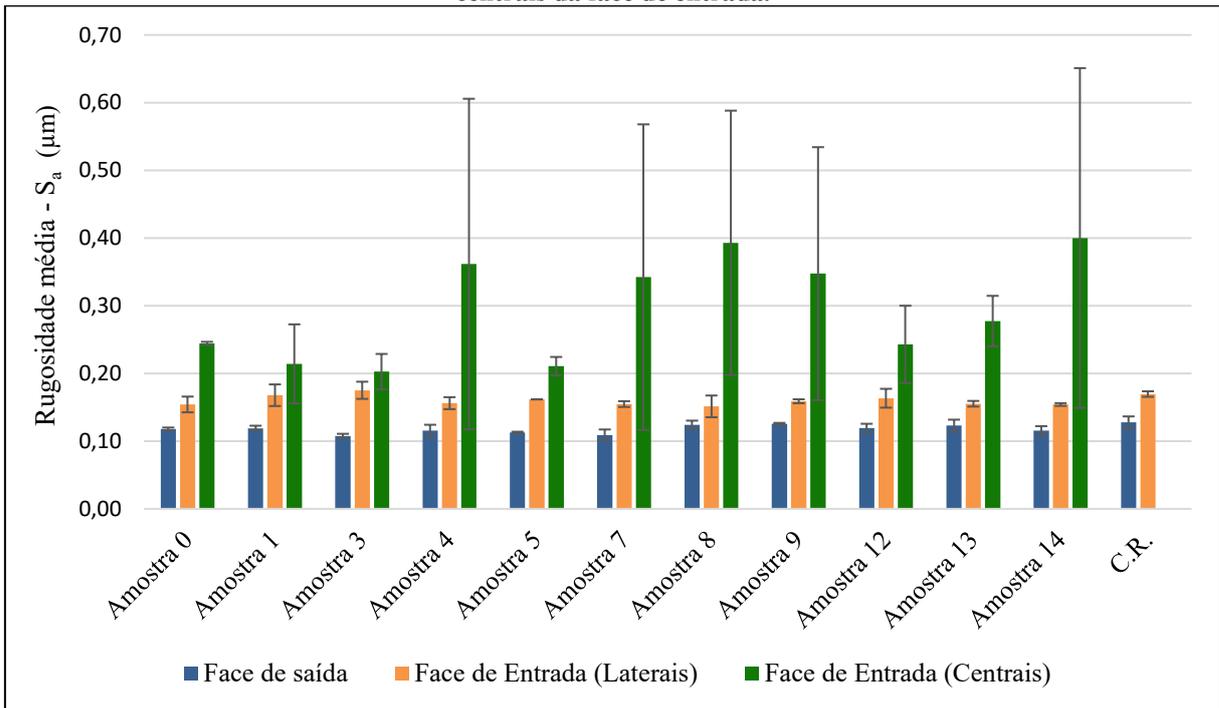


Fonte: Autor.

Os resultados de rugosidade média (S_a), desvio médio quadrático (S_q), altura máxima (S_z) e de altura total do perfil (P_t) são apresentados nas Figuras 63, 64, 65 e 66, a partir dos quais conclui-se que o impacto causado pelo corte via jato d'água abrasivo no acabamento de superfície das peças concentra-se majoritariamente na face de entrada do jato, em específico nas regiões adjacentes à borda dos canais, enquanto o acabamento de superfície no restante de amostra permanece semelhante ao material de base.

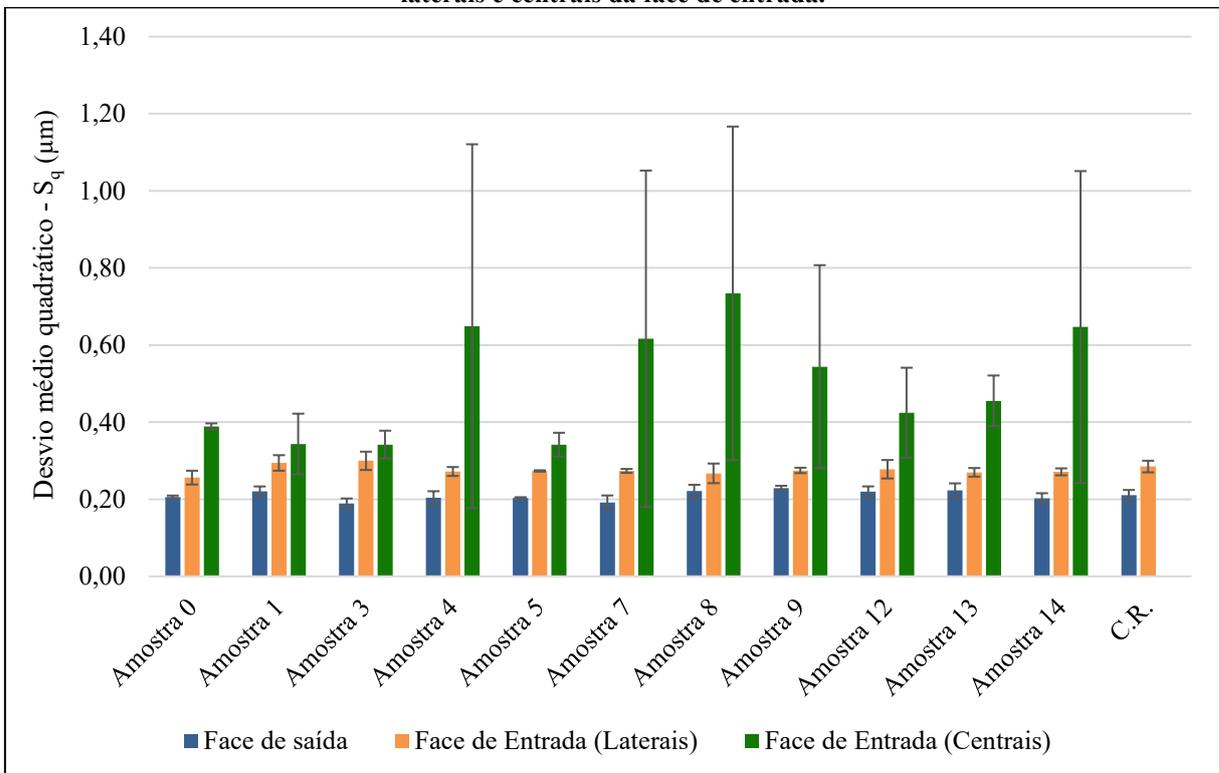
Este impacto verificado consiste em um brusco aumento em todos os parâmetros de superfície avaliados, apresentando valores mais de duas vezes maiores que observados no material conforme recebido, bem como na dispersão dos resultados, indicando uma intensa deterioração e um aumento na heterogeneidade do acabamento de superfície das amostras.

Figura 63 - Rugosidade média das amostras avaliada na face de saída do jato e nas regiões laterais e centrais da face de entrada.



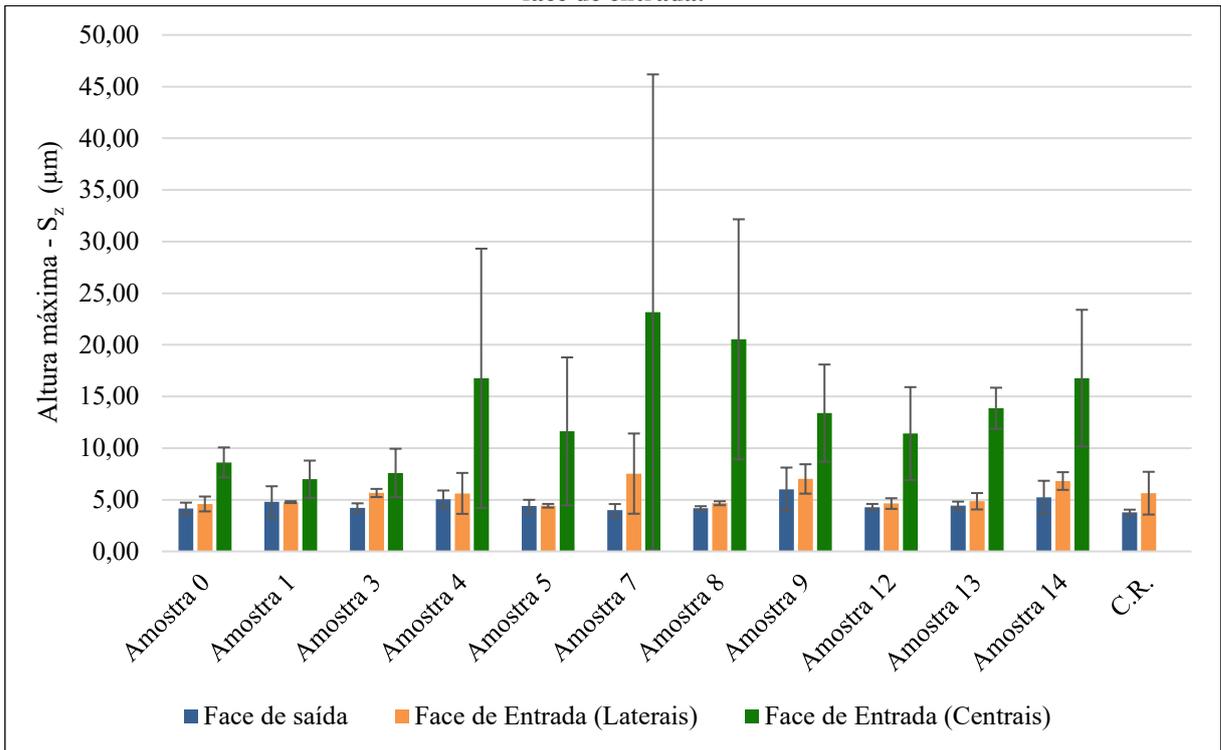
Fonte: Autor.

Figura 64 - Rugosidade quadrática média das amostras avaliada na face de saída do jato e nas regiões laterais e centrais da face de entrada.



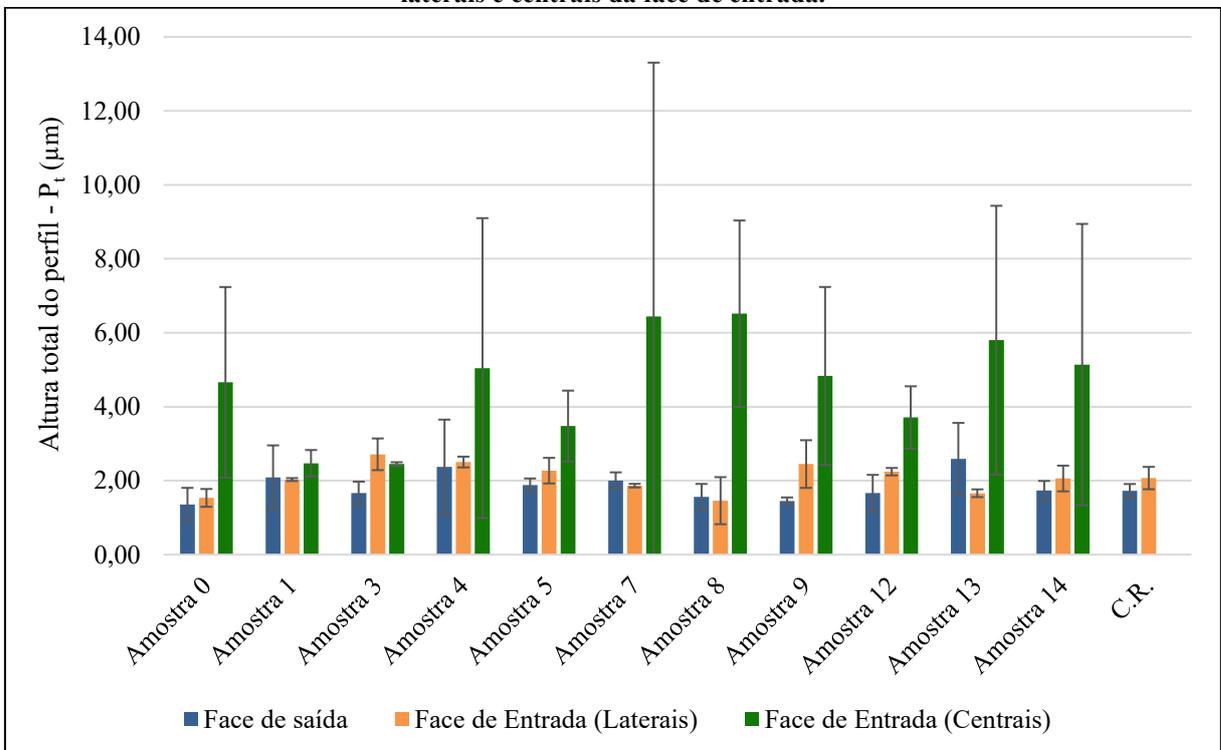
Fonte: Autor.

Figura 65 - Altura máxima medida avaliada na face de saída do jato e nas regiões laterais e centrais da face de entrada.



Fonte: Autor.

Figura 66 – Média de altura total do perfil para as amostras avaliada na face de saída do jato e nas regiões laterais e centrais da face de entrada.



Fonte: Autor.

Vale ressaltar ainda que dentre as condições avaliadas as amostras 1 e 3 não apresentaram variações significativas entre os pontos medidos próximos e distantes ao corte em nenhum dos parâmetros estudados. Este fato pode ser relacionado ao tamanho e a forma da zona afetada presente nestas amostras, de modo que os pontos avaliados podem estar localizados fora da região afetada, o que justificaria os resultados semelhantes aos observados no material de base.

Verifica-se também uma diferença entre o acabamento de superfície medido na face de entrada e na face de saída do jato para todas as condições. Esta diferença, entretanto, deve-se à limitação do processo de fabricação das chapas, na qual o acabamento de superfície é realizado a partir de um rolo de laminação polido e que permite a garantia da qualidade de superfície em apenas uma das faces.

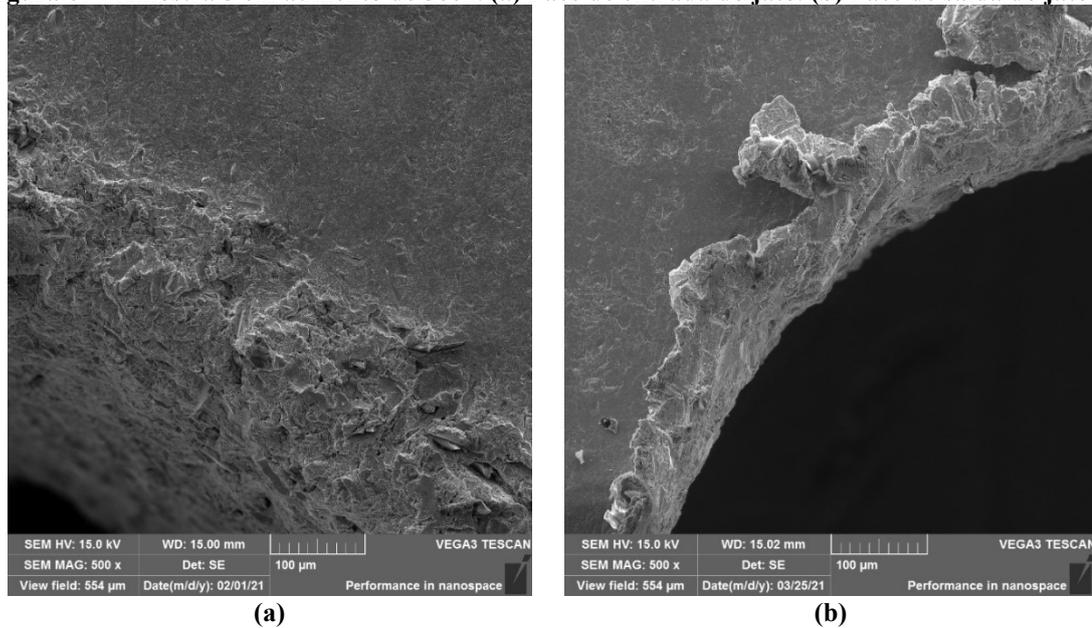
5.4. Perfilometria

Por meio da análise em perfilômetro fez-se a avaliação da altura da rebarba formada na borda dos canais usinados pelo processo de corte via jato d'água abrasivo. Ao ser analisada a face de entrada do jato as amostras apresentaram a formação de uma pequena rebarba nas laterais do corte, as quais obtiveram altura média em torno de 31 μm .

As medições realizadas na face de saída do jato revelam uma altura média da rebarba de 74 μm , cerca de duas vezes maior. Uma comparação visual destes resultados pode ser observada na Figura 67, em que são apresentadas imagens em MEV da face de entrada e saída do jato em uma mesma região da amostra 5. Já as alturas médias calculadas estão dispostas graficamente na Figura 68.

É possível verificar também um aumento na dispersão dos resultados entre as faces, de modo que o desvio padrão passa de $\pm 7 \mu\text{m}$ na face de entrada para $\pm 17 \mu\text{m}$ na face de saída do jato. Este aumento está diretamente relacionado à natureza irregular da formação da rebarba durante o processo, efeito que é intensificado na face de saída, onde a rebarba pode ou não permanecer fixada a peça.

Figura 67 - Amostra 5 em aumento de 500x. (a) Face de entrada do jato. (b) Face de saída do jato.

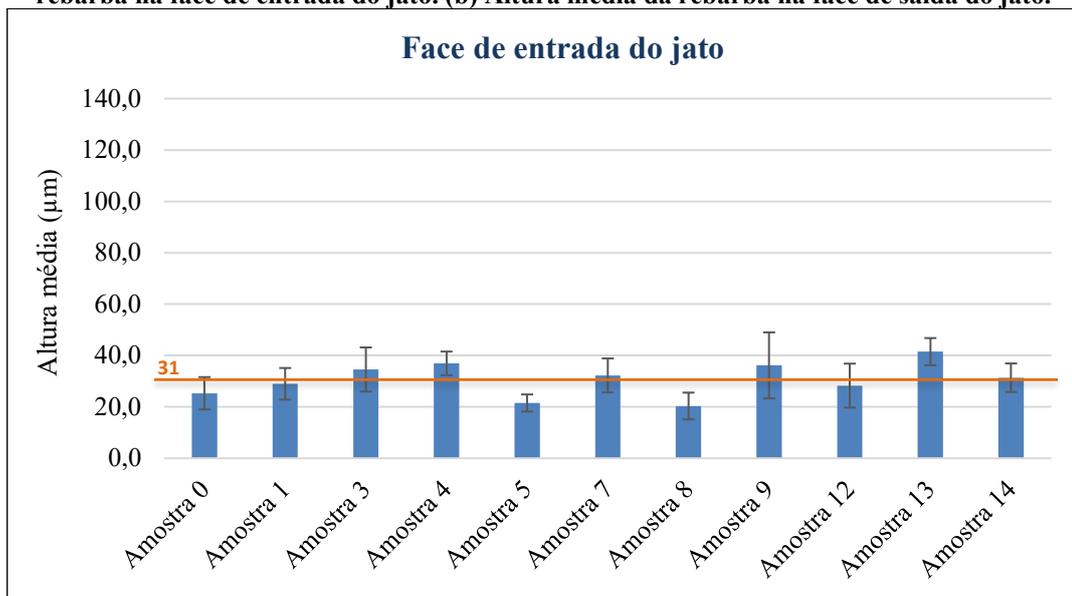


Fonte: Autor.

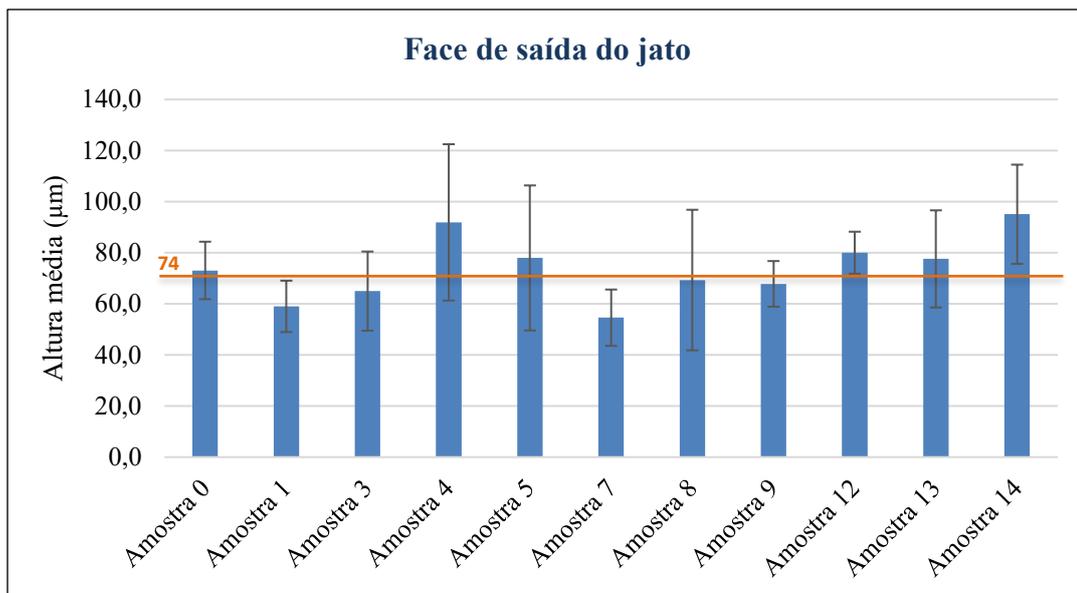
As diferenças observadas entre a rebarba formada na face de entrada e de saída do jato são esperadas, dado que, conforme destacado por Niknam, Zedan, *et al.* (2014), nos processos de usinagem a rebarba verificada na região de saída apresenta, de maneira geral, maior tamanho e maior dificuldade de remoção, comumente causando problemas nas etapas de rebarbação.

Neste contexto, dadas as diferentes características apresentadas pela rebarba do tipo *Poisson* formada na face de entrada e do tipo *roll over* formada na face de saída das amostras, uma análise mais detalhada dos resultados será feita de forma individual para cada uma das faces.

Figura 68 - Média dos resultados obtidos a partir da perfilometria das amostras. (a) Altura média da rebarba na face de entrada do jato. (b) Altura média da rebarba na face de saída do jato.



(a)



(b)

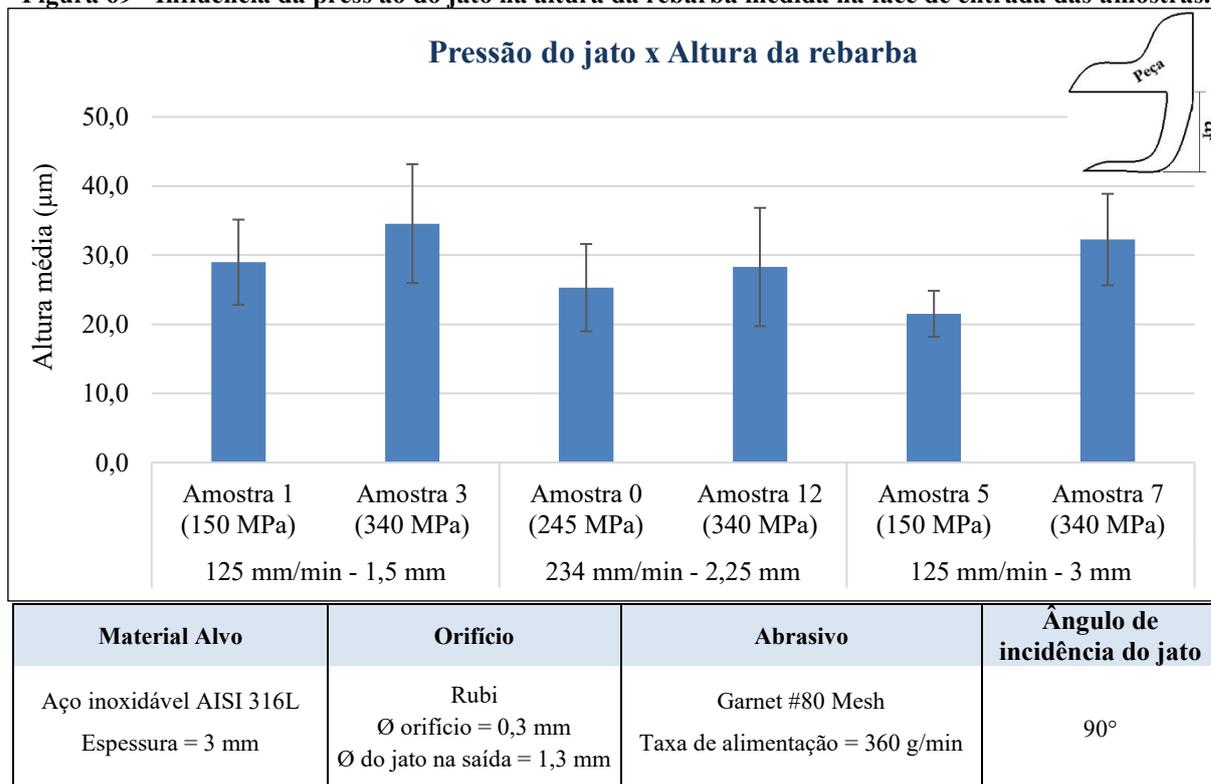
Fonte: Autor.

5.4.1. Face de entrada do jato

Ao avaliar a influência de cada parâmetro na altura da rebarba formada na face de entrada dos canais verificou-se uma tendência a redução do valor médio de altura da rebarba quando aumentada a distância entre o bocal e a peça, de modo que, amostras usinadas com 1,5 mm de distância apresentaram uma média de altura de 35 μm , enquanto as usinadas com 2,25 mm apresentaram uma média de 30 μm e as usinadas com 3 mm de distância uma média de 26 μm .

Pequenas diferenças foram também observadas ao avaliar a pressão do jato, em que um aumento do valor médio de altura da rebarba pode ser observado nos casos nos quais aumentou-se a intensidade da pressão do jato, como pode ser visto na Figura 69. Alterações na velocidade de avanço não apresentaram influência na formação da rebarba.

Figura 69 - Influência da pressão do jato na altura da rebarba medida na face de entrada das amostras.



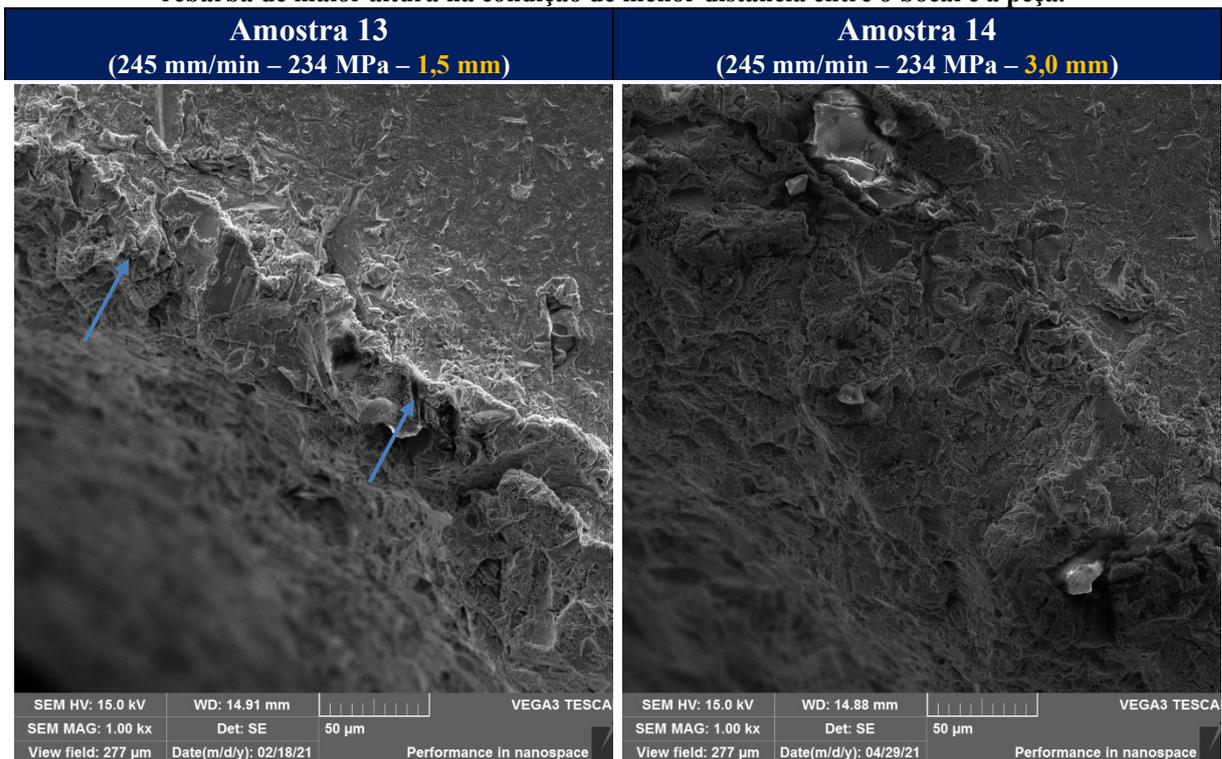
Fonte: Autor.

Os resultados observados podem ser explicados em função dos mecanismos de remoção de material envolvidos no processo, de modo que, na face de entrada do jato a superfície do material é bombardeada por partículas abrasivas aceleradas a partir de um jato d'água pressurizado. A colisão destas partículas abrasivas aceleradas com o material promove sua deformação plástica, resultando na remoção de material e na formação de uma rebarba que se assemelha a do tipo *Poisson*.

Desta forma, quando aumentada a distância entre o bocal e a peça, intensifica-se o fenômeno de espalhamento do jato, suavizando a altura da rebarba, uma vez que as partículas passam a atingir maior área, porém com menor intensidade. Este comportamento pode ser melhor observado nas imagens de MEV disposta na Figura 70. O aumento da pressão do jato está relacionado ao aumento da energia cinética das partículas abrasivas, de modo que a rebarba formada apresenta maior altura em virtude da intensificação da deformação plástica do material durante o corte.

Contudo, apesar das tendências verificadas, os resultados encontrados entre as diversas condições avaliadas são muito próximos, com aproximadamente 88% dos pontos medidos entre 25 e 50 µm de altura, os quais são considerados segundo classificação proposta por Wang, J. & Wong (1999) como rebarba de tamanho pequeno. Esta proximidade entre os resultados avaliados indica um baixo impacto dos parâmetros de corte na altura da rebarba formada na face de entrada.

Figura 70 – Impacto da distância entre o bocal e a peça na altura da rebarba formada. Setas indicam rebarba de maior altura na condição de menor distância entre o bocal e a peça.



Fonte: Autor.

5.4.2. Face de saída do jato

Tratando-se da caracterização da rebarba formada na face de saída do jato, a medição da altura de maneira isolada demonstrou não ser o suficiente para representar seu tamanho. Isto se deve ao fato da rebarba formada na face de saída ser do tipo *roll over*, dobrando-se sobre o material, de modo que ao medir a rebarba o valor encontrado pode representar apenas a altura na qual a rebarba sofreu dobramento e não seu tamanho real.

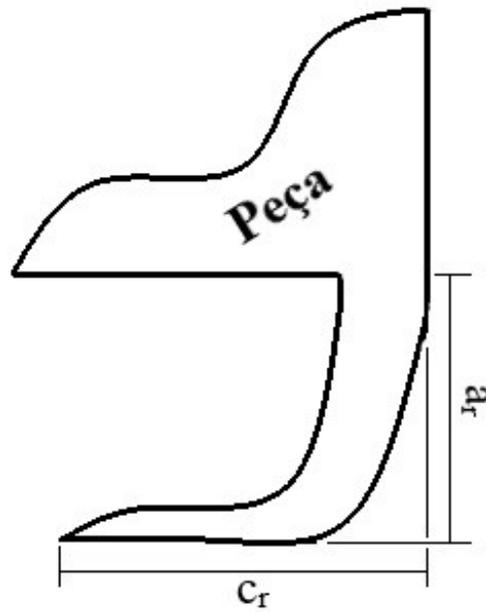
Wang, J. & Wong (1999) observam ainda que ao aumentar as distâncias entre o bocal e a peça, o fenômeno de dobramento da rebarba é intensificado em razão da redução de energia cinética das partículas durante o corte, dificultando a correta caracterização da rebarba formada.

Desta forma, buscando melhor caracterizar a rebarba formada e seu impacto na qualidade final do processo de união, optou-se por definir para a face de saída do jato a medição do tamanho da rebarba (t_r), conforme Figura 71, sendo este a soma da altura medida em perfilômetro (a_r) e o comprimento da rebarba (c_r), o qual foi calculado com auxílio do software de análise de imagens a partir das imagens de MEV. O cálculo para aproximação do tamanho de rebarba é apresentado abaixo:

$$t_r = a_r + c_r$$

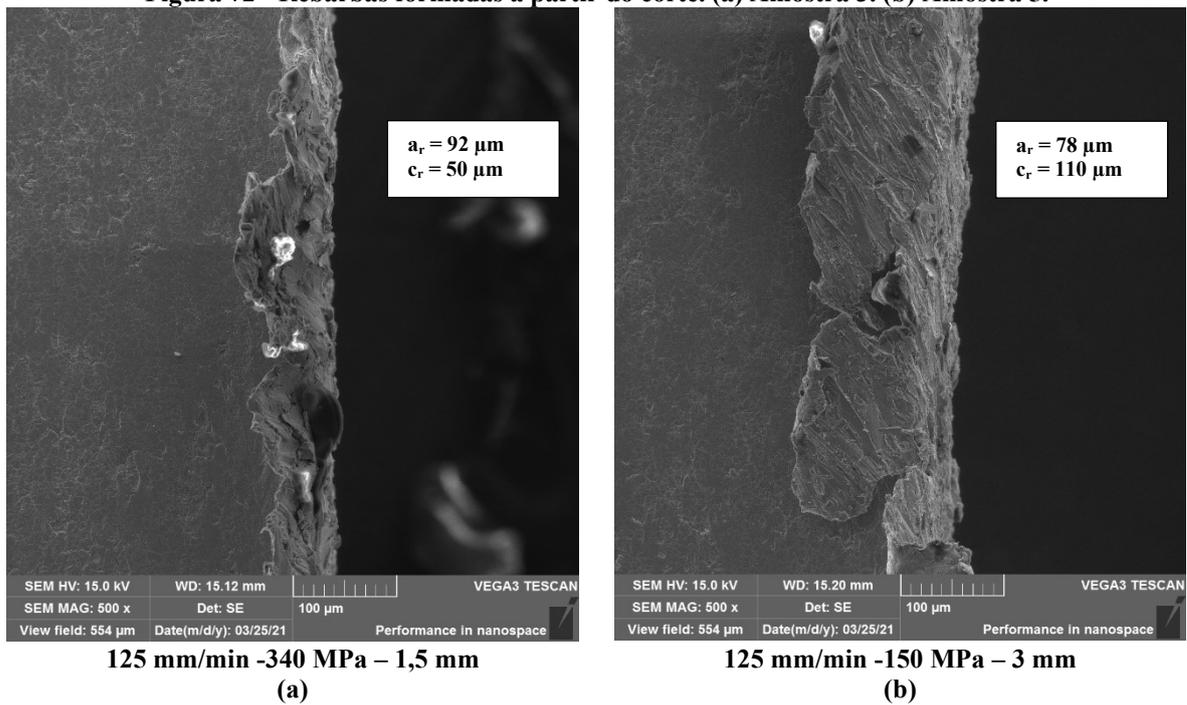
Na Figura 72 é ilustrada a importância deste procedimento. Neste caso as medidas em perfilômetro resultaram em uma altura média de rebarba de 92 μm para a amostra 3 em (a) e 78 μm para a amostra 5 em (b), indicando que a rebarba formada no primeiro caso é maior e consequentemente tem maior potencial de afetar a qualidade do processo de união por difusão. Contudo, a análise das amostras em MEV torna evidente que apenas este resultado não é suficiente para representar a real condição da rebarba formada, visto o tamanho da rebarba observada na amostra 5.

Figura 71 - Representação visual do método utilizado para aproximar o tamanho da rebarba formada na face de saída do jato.



Fonte:Autor.

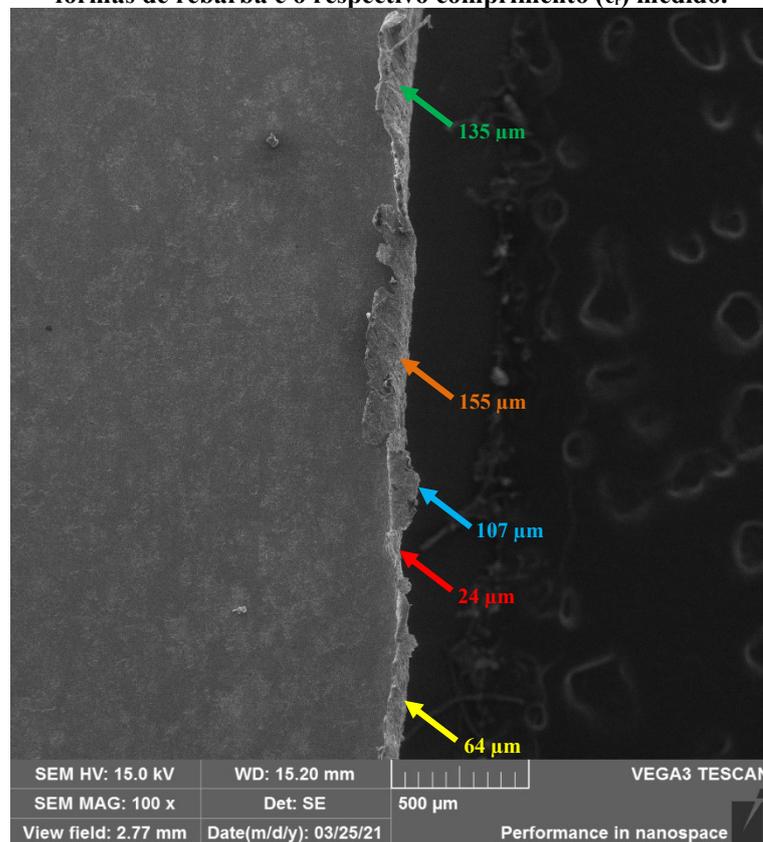
Figura 72 - Rebarbas formadas a partir do corte. (a) Amostra 3. (b) Amostra 5.



Fonte: Autor.

Apesar dos esforços na caracterização da rebarba identificada na face de saída, a observação de relações concretas entre a variação dos parâmetros de corte e o tamanho da rebarba observada não foi possível. Este fato deve-se a ampla variação de formas e tamanhos de rebarba identificados em uma mesma condição de usinagem, conforme exemplificado na Figura 73, onde é possível observar em uma única amostra regiões apresentando rebarbas de maior comprimento (155 μm), menor comprimento (64 μm), regiões onde a rebarba sofreu dobramento na direção dos canais (107 μm) e regiões onde houve o arrancamento da rebarba durante o processo (24 μm). O mesmo ocorre com a altura da rebarba, que dependem da forma como a rebarba foi dobrada ou cortada em cada seção da amostra, podendo medir valores distintos.

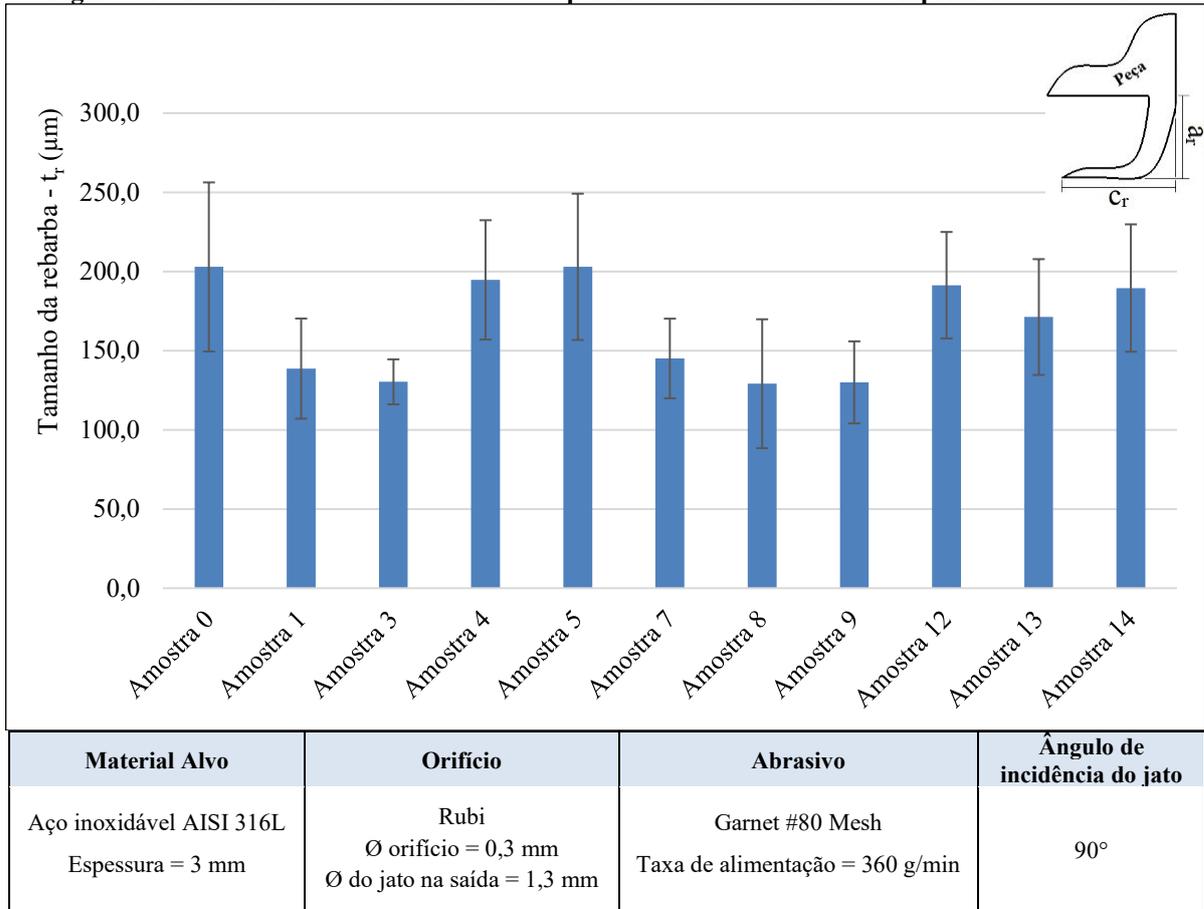
Figura 73 - Amostra 5 em aumento de 100x. Setas em diferentes cores indicam diferentes tamanhos e formas de rebarba e o respectivo comprimento (c_r) medido.



Fonte: Autor.

Desta forma, os resultados medidos apresentaram alta dispersão, conforme verificado na Figura 74, o que dificulta a diferenciação entre os impactos impostos exclusivamente pela variação na intensidade dos parâmetros avaliados e os decorrentes da variação de tamanho intrínseca ao processo de formação da rebarba, impedindo a correta comparação entre as condições estudadas.

Figura 74 - Tamanho da rebarba calculado a partir da soma da altura e comprimento da rebarba.



Fonte: Autor.

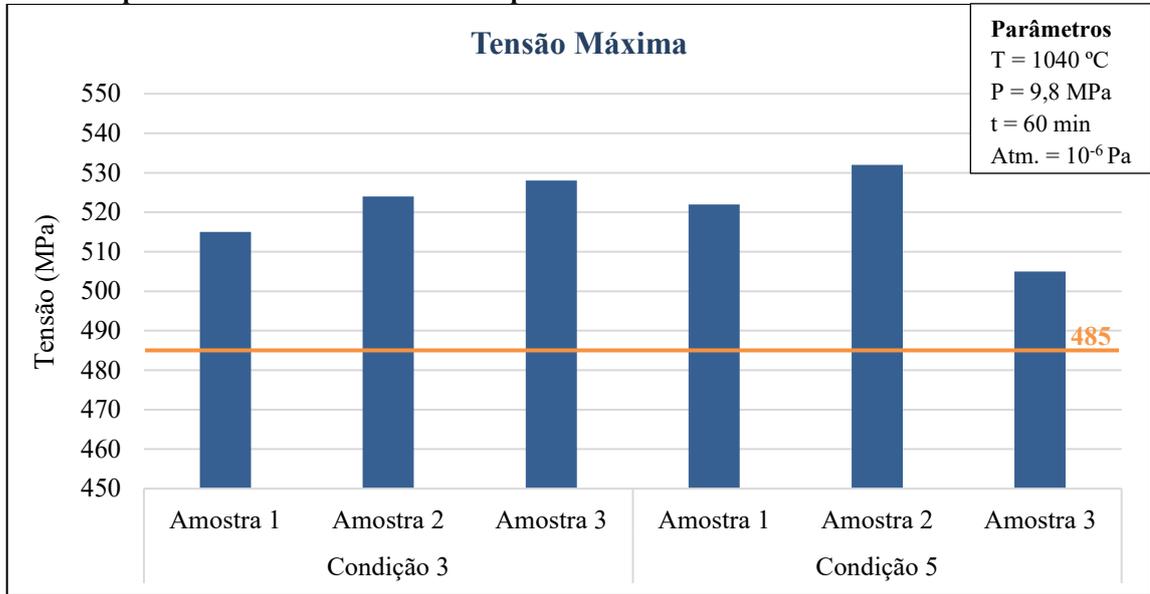
5.5. Ensaio de tração

Os ensaios de tração revelam resultados semelhantes para ambos os blocos, de modo que o bloco fabricado a partir da melhor condição de usinagem (condição 3) apresentou um valor médio de tensão máxima de 522 MPa, de tensão escoamento de 235 MPa e alongamento de 45,9%, enquanto os resultados para o bloco fabricado a partir da pior condição (condição 5) foram 520 MPa de tensão máxima, 231 MPa de tensão de escoamento e alongamento de 44,8%. Por meio do tratamento estatístico dos dados, empregando o teste t de Student, observou-se que os valores de tensão máxima, tensão de escoamento e alongamento não apresentam diferenças estatisticamente significativas, sendo aceita a hipótese nula de que não há diferença entre os resultados obtidos em ambas as uniões.

A partir dos gráficos apresentados nas Figuras 75, 76 e 77, observa-se que, com exceção do alongamento observado no corpo de prova 3 da condição 5, o qual ficou 4% abaixo do esperado, os demais resultados superam as propriedades mecânicas mínimas aceitas para o material de base conforme ASTM - A240/A240M, indicando uniões de excelente qualidade em ambas as condições. Desta forma, de acordo com as exigências das normas ASME VIII – Div. 1

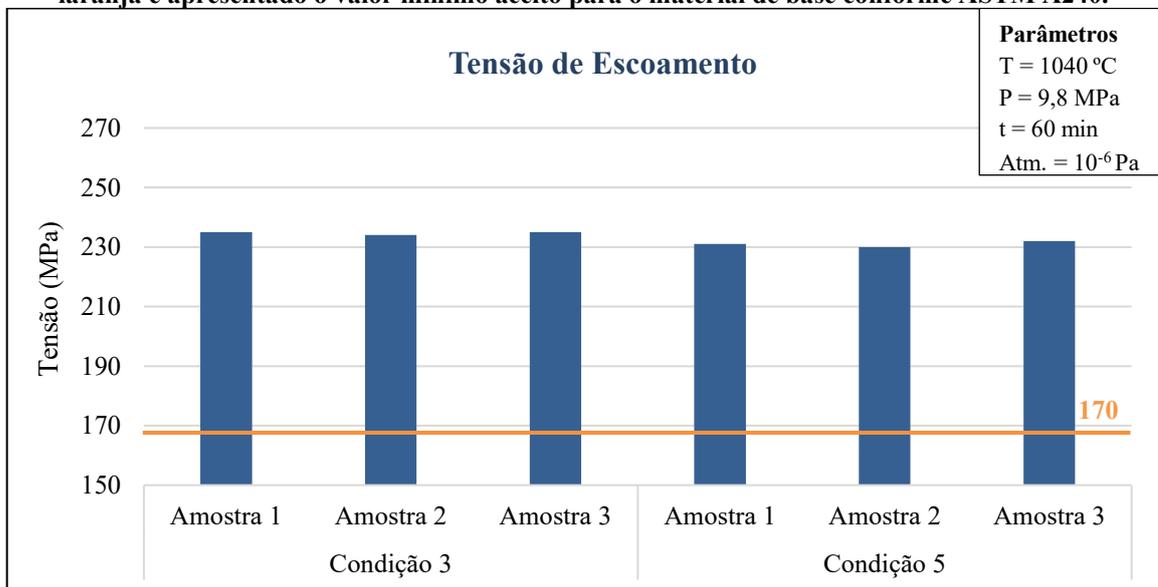
e ASME IX – Part. QW-185 para a fabricação de vasos de pressão, ambas as uniões atendem os requisitos mecânicos solicitados, sendo consideradas como qualificadas para a fabricação de trocadores de calor.

Figura 75 - Tensão máxima medida nas amostras retiradas dos blocos unidos por difusão. Em laranja é apresentado o valor mínimo aceito para o material de base conforme ASTM A240.



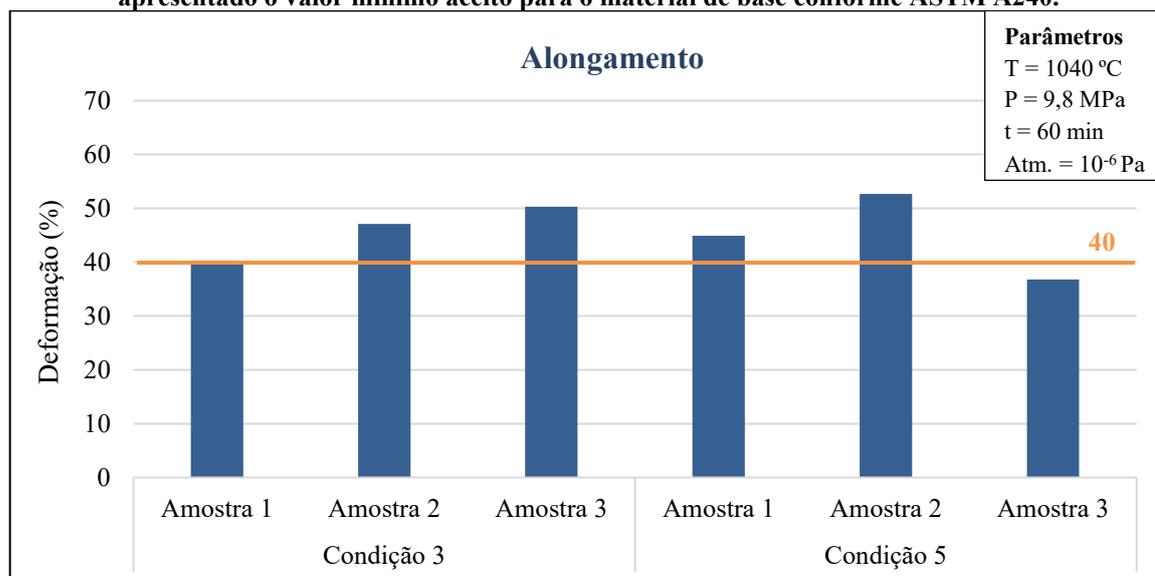
Fonte: Autor.

Figura 76 - Tensão de escoamento medida nas amostras retiradas dos blocos unidos por difusão. Em laranja é apresentado o valor mínimo aceito para o material de base conforme ASTM A240.



Fonte: Autor.

Figura 77 - Alongamento medido nas amostras retiradas dos blocos unidos por difusão. Em laranja é apresentado o valor mínimo aceito para o material de base conforme ASTM A240.



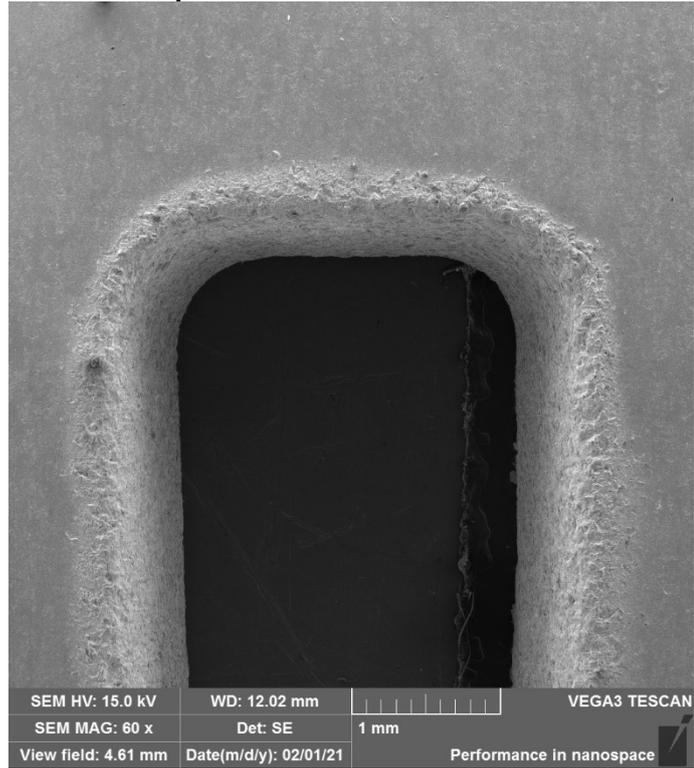
Fonte: Autor.

Estes resultados demonstram que as modificações impostas no acabamento de superfície e no tamanho da rebarba em virtude da alteração dos parâmetros de corte não apresentaram influência na qualidade final do dispositivo unido por difusão. Fato este que pode ser explicado devido à baixa relação entre a área da amostra sob influência da ação do jato d'água abrasivo e a superfície total de união, conforme observado anteriormente nas análises em MO e MEV e representado na Figura 78.

Todavia, dada a necessidade da remoção de amostras maciças para a realização dos ensaios de tração, a região com canais não pode ser diretamente analisada por meio desta técnica. Assim, o desenvolvimento de técnicas para avaliar quantitativamente a qualidade da união na região com canais torna-se essencial, uma vez que, dada sua espessura reduzida, a degradação do acabamento de superfície e a presença de partículas abrasivas incrustadas chegam a atingir valores próximos a 40% da área dos canais, tornando esta uma região crítica para o processo de união por difusão, levando a soldas de menor resistência mecânica e a perda de estanqueidade entre os canais.

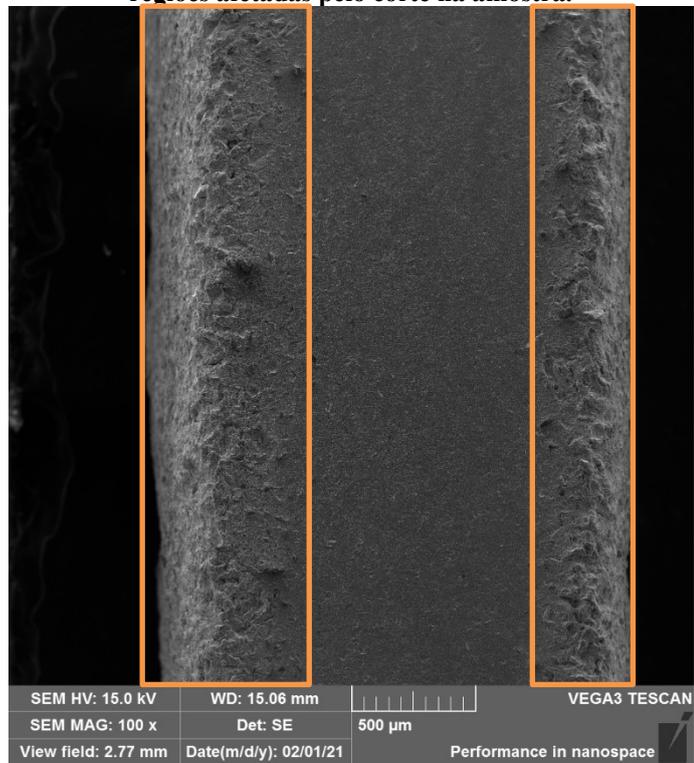
Na Figura 79 é apresentada uma imagem em 100x de aumento da amostra 5, onde pode-se observar a aleta de separação dos canais e a região afetada pelo corte em ambos os lados desta, atingindo grande parte da região a ser unida entre os canais.

Figura 78 – Parte superior do canal 1 da amostra 5 em 60x de aumento.



Fonte: Autor.

Figura 79 - Lateral do canal 1 da amostra 5 em 100x de aumento. Retângulos alaranjados destacam as regiões afetadas pelo corte na amostra.



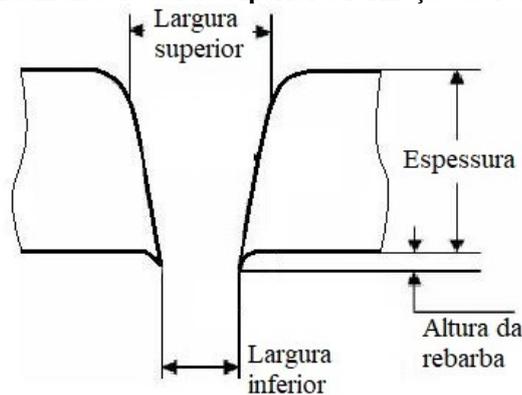
Fonte: Autor.

5.6. Análise microestrutural

A avaliação em microscópio ótico da união na base dos canais, face onde ocorre a saída do jato, revelou um acúmulo de material nas extremidades da linha de união, o qual acredita-se ser ocasionado a partir do formato cônico do corte, característico do processo de corte via jato d'água abrasivo e apresentado na Figura 80, em conjunto com o deslocamento de material da rebarba para fora da linha de união ao ser aplicada a pressão.

Em virtude deste formato cônico do corte, pôde-se observar também uma leve diferença de espessura entre o topo e a base dos canais, em que a base dos canais apresentou espessura visivelmente maior que a região de topo. Este comportamento é comum em cortes realizados via jato d'água abrasivo, uma vez que as partículas abrasivas vão sendo desaceleradas ao longo do corte, perdendo sua capacidade de remoção de material.

Figura 80 - Formato característico resultante do processo de corte via jato d'água abrasivo, em que é observado o arredondamento da borda superior e formação de rebarba na borda inferior.



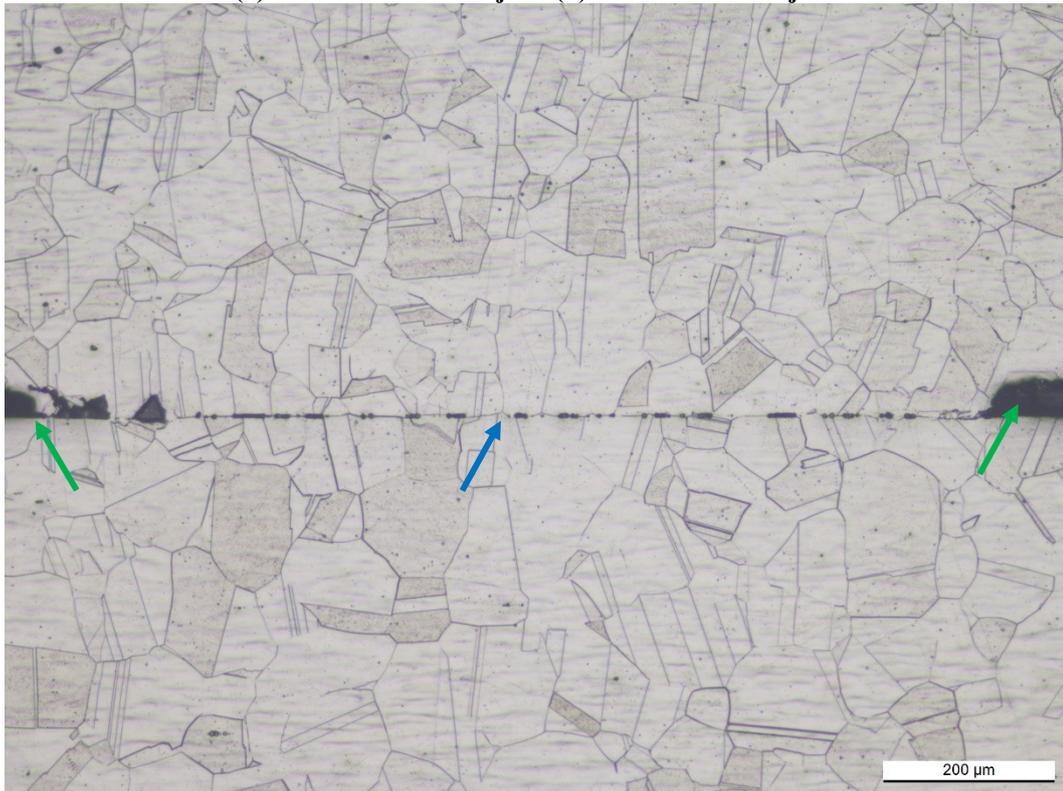
Fonte: Adaptado de KRAJCARZ, BAŃKOWSKI, et al. (2017).

Na região de topo dos canais (face de entrada do jato) foram verificadas falhas geométricas nas bordas da linha de união e vazios, conforme indicado por setas verdes na Figura 81 (a), podendo ser associados à deterioração do acabamento de superfície na região de borda dos canais, conforme observado em análises prévias neste estudo, e ao arredondamento da borda superior do corte, comum ao processo.

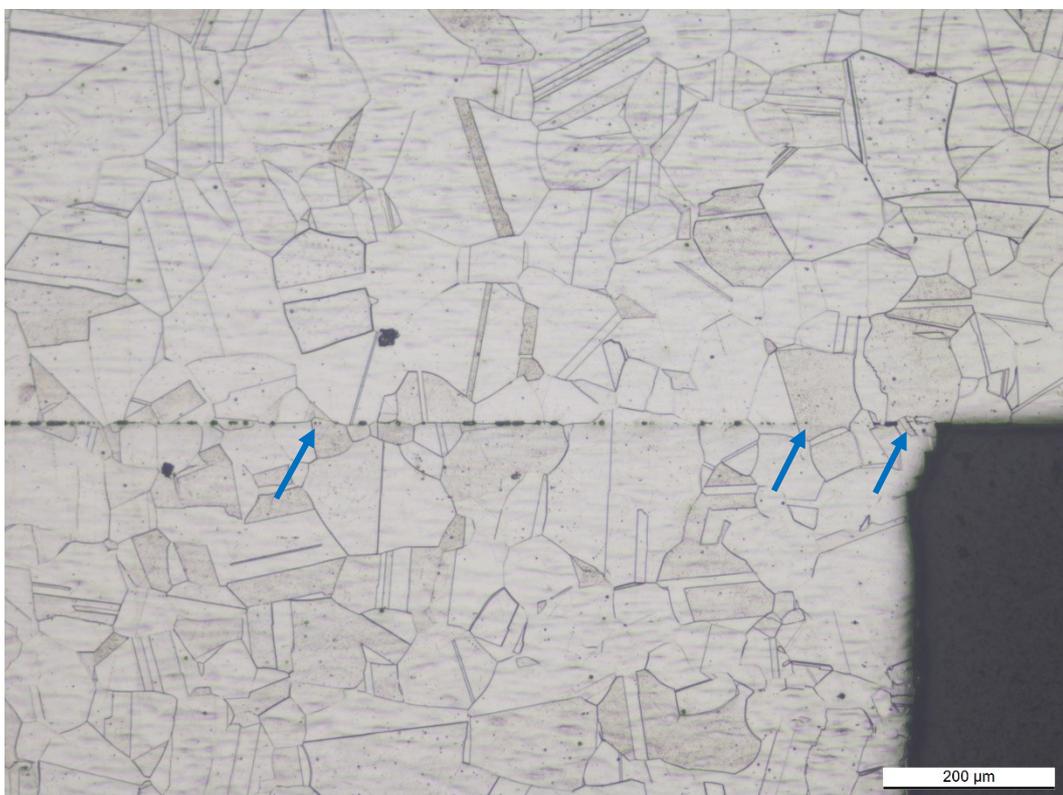
Neste contexto, fica claro que o impacto observado na face de entrada do jato é crítico tanto para a união por difusão quanto para o funcionamento e manutenção dos núcleos de trocadores de calor, uma vez que forma vazios nas bordas da união, os quais não são vistos na face de saída do jato (Figura 81 (b)). Em operação estes vazios atuam como concentradores de tensão, reduzindo a resistência a fadiga do dispositivo, bem como servem como sítios para o acúmulo de sujidades, levando ao entupimento dos canais e a necessidade de manutenções mais frequentes.

Estes resultados corroboram com as observações realizadas no MEV, conforme apresentado na Figura 82, de modo que a zona afetada verificada na face de entrada do jato, a qual apresentou deterioração severa de textura e acabamento de superfície, resultou em linhas de união apresentando defeitos de forma e formação de vazios de maior tamanho próximos à borda dos canais. Na face de saída, apesar do formato cônico do corte e da presença de rebarba, os quais originaram ressaltos nas bordas da linha de união, um menor número de defeitos foi observado, sendo verificados grãos transpassando a linha de união também nestas regiões.

Figura 81 – Comparação em 100x entre as linhas de união formadas na região com canais. Setas verdes indicam vazios de grande tamanho formados. Setas azuis indicam grãos transpassando a linha de união.
(a) Face de entrada do jato. (b) Face de saída do jato.



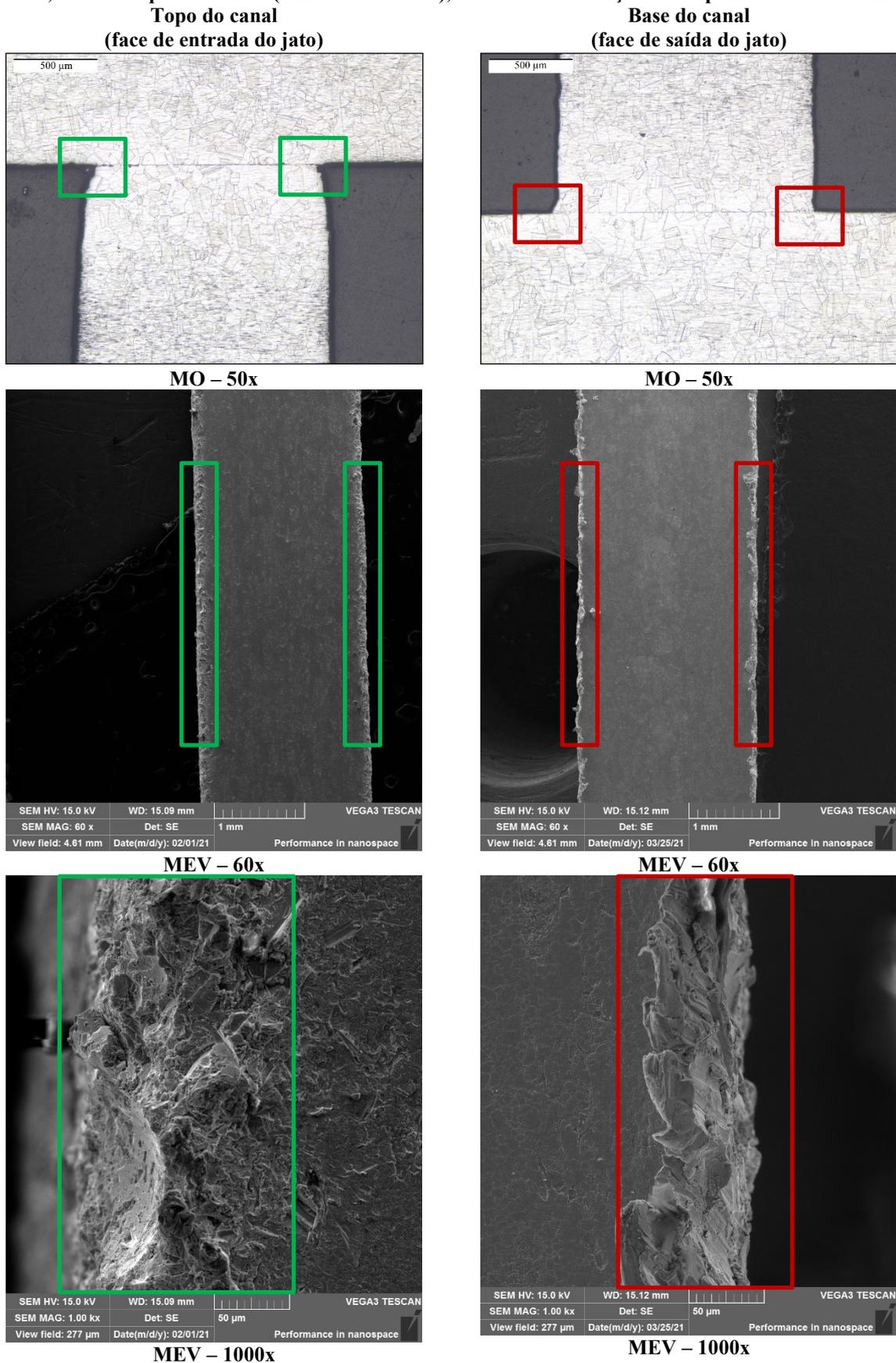
(a)



(b)

Fonte: Autor.

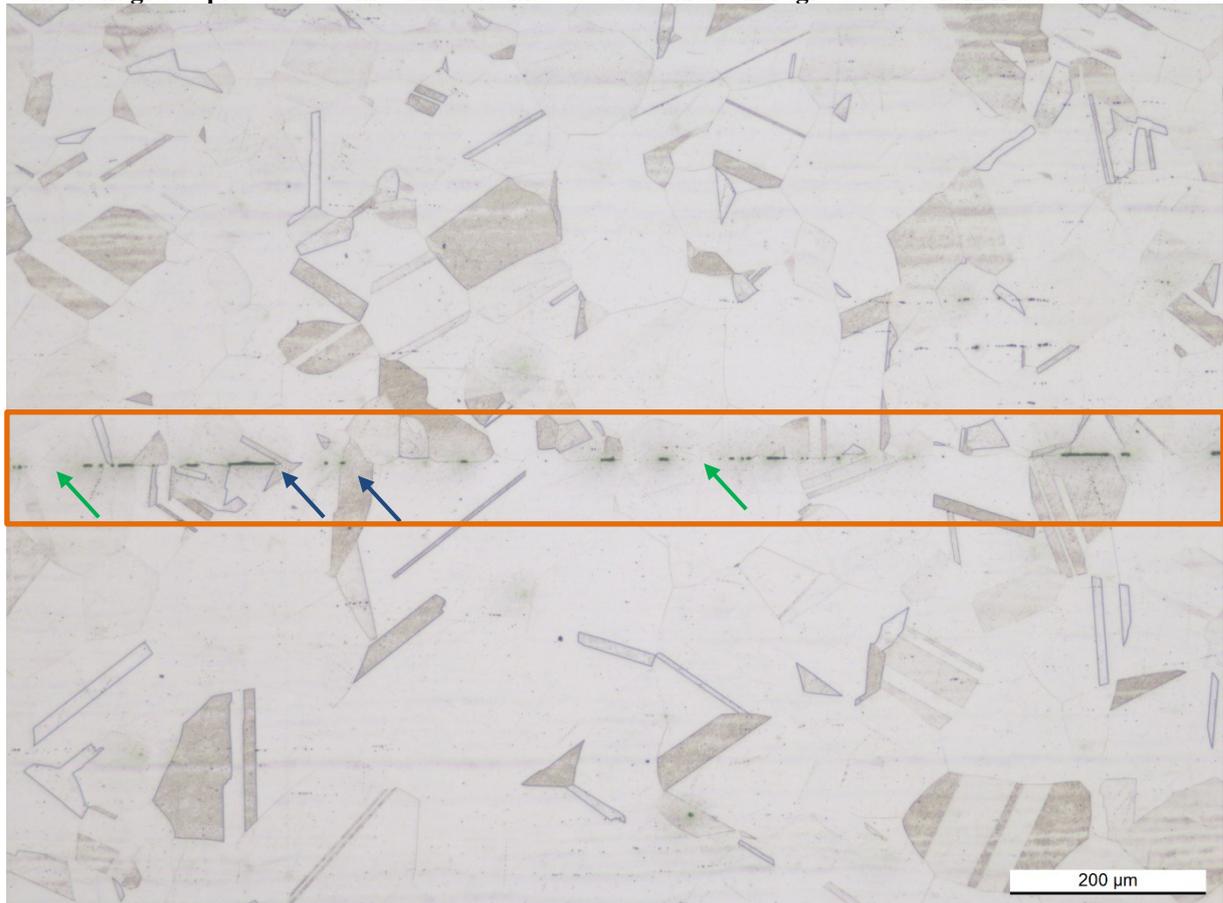
Figura 82 – Acima, vista lateral das linhas de união no topo e base dos canais em microscópio ótico (50x). Abaixo, vista de topo dos canais (MEV 60x – 1000x), indicando a condição das superfícies antes da união.



Fonte: Autor.

Ao realizar a análise microestrutural das linhas de união, foram obtidos resultados com bom aspecto visual em todas as amostras observadas, conforme visto na Figura 83, sendo identificados grãos que atravessam a linha de união, regiões de continuidade de material e defeitos arredondados, descontínuos e em sua maioria de tamanho pequeno, indicativos de uma união de alta qualidade.

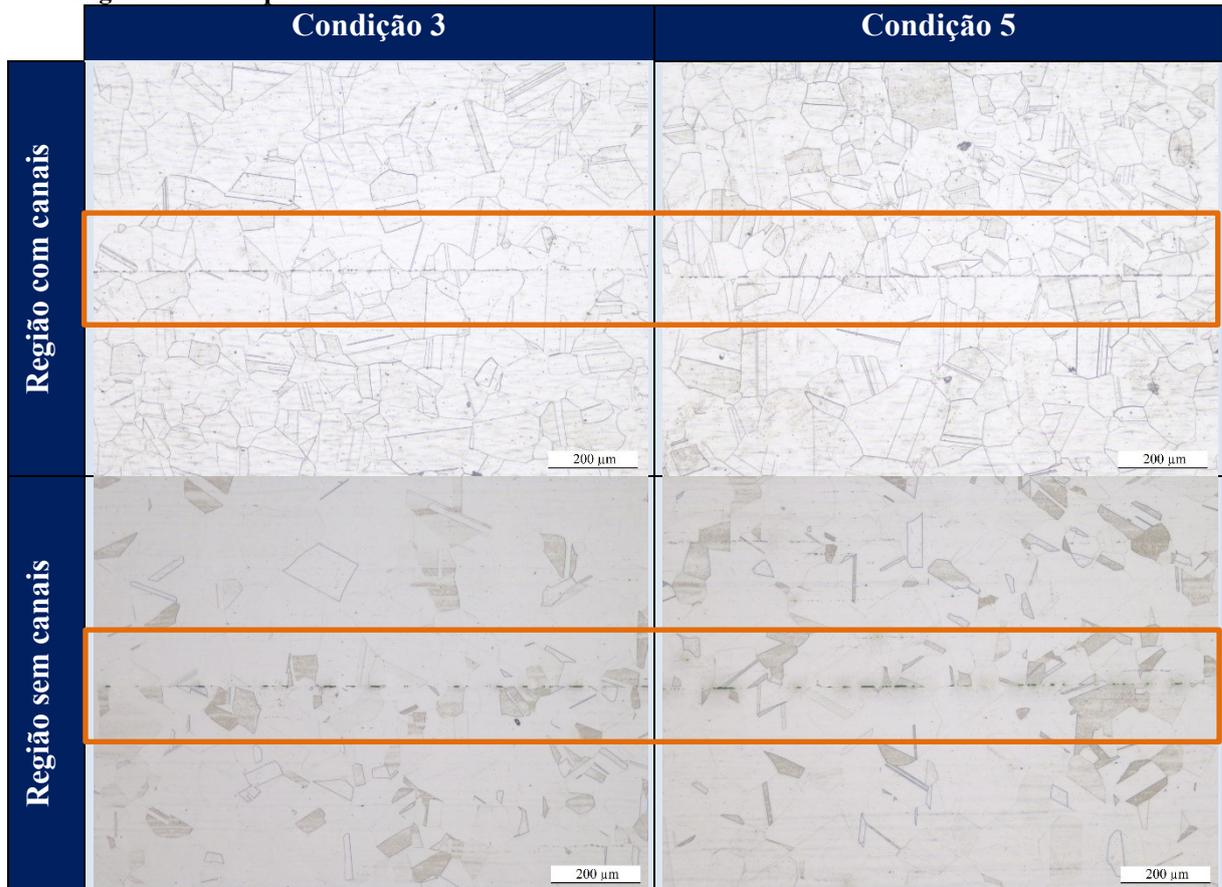
Figura 83 - Amostra 5 em 100x na região sem canais, linha de união destacada em laranja. Setas azuis indicam grãos que atravessam a linha de união e verdes indicam regiões com continuidade de matéria.



Fonte: Autor.

Na Figura 84 são comparados os resultados entre o bloco fabricado a partir da condição 3 e o fabricado a partir da condição 5. Nas micrografias é possível observar que ambos os blocos apresentam aspecto visual similar, com grãos que transpassam a linha de união e vazios em quantidade e tamanho semelhantes, o que condiz com os resultados quantitativos verificados nos ensaios de tração, não sendo identificada diferença significativa na qualidade da união entre as duas condições de usinagem avaliadas.

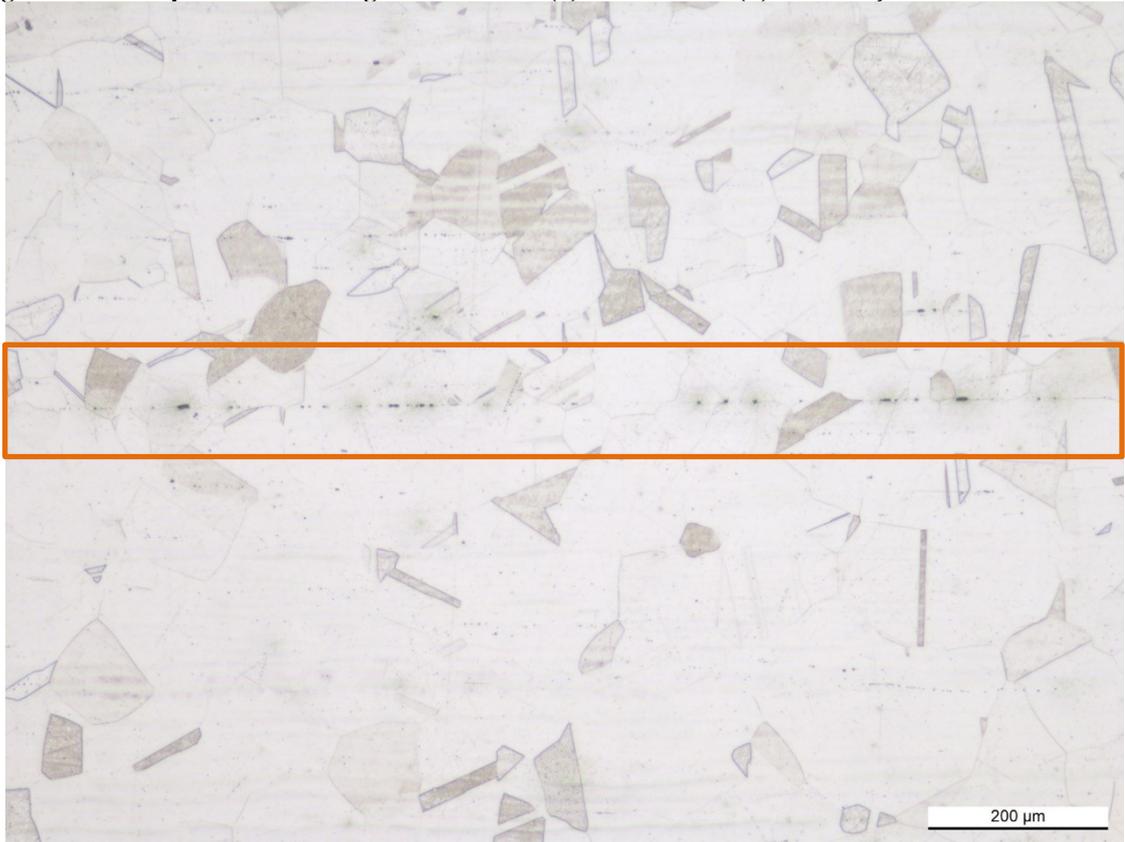
Figura 84 - Comparativo entre as linhas de união verificadas em cada bloco. Aumento de 100x.



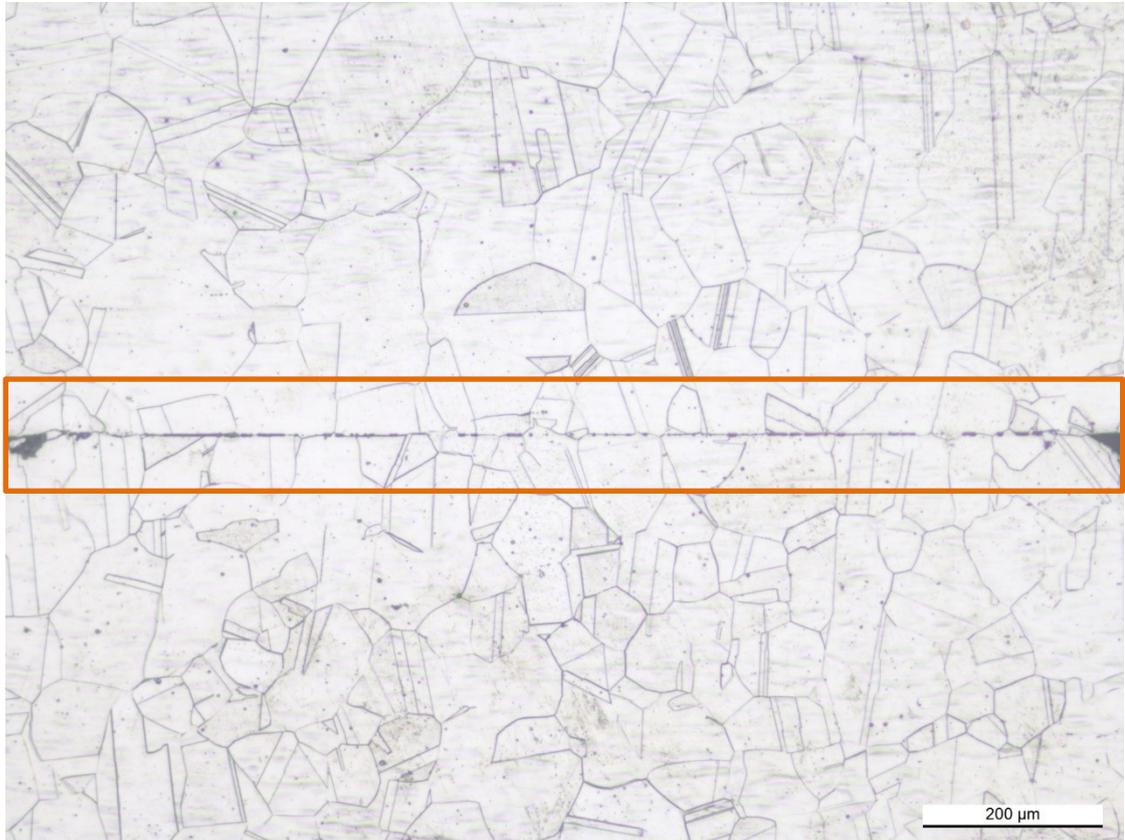
Fonte:Autor.

Contudo, quando comparados os resultados entre a região maciça dos blocos e a região com canais, conforme Figura 85 e Figura 86, é possível observar na região com canais um aumento visível na quantidade e tamanho dos vazios. Uma possível causa para este aumento é a presença de partículas abrasivas incrustadas, rebarba e/ou a deterioração do acabamento de superfície verificados nestas regiões, dado que, conforme verificado por Ziegelheim, Hiraki, *et al.* (2007), alterações no acabamento de superfície das partes reduzem significativamente a qualidade das uniões. Aliado a isto, a área reduzida das aletas altera o modo como é dada a distribuição de força nestas regiões, fazendo com que a pressão nas aletas não seja precisamente a pressão esperada, o que pode apresentar efeito negativo na qualidade das uniões.

Figura 85 – Comparativo entre região sem canais (a) e com canais (b) da condição 5. Aumento de 100x.



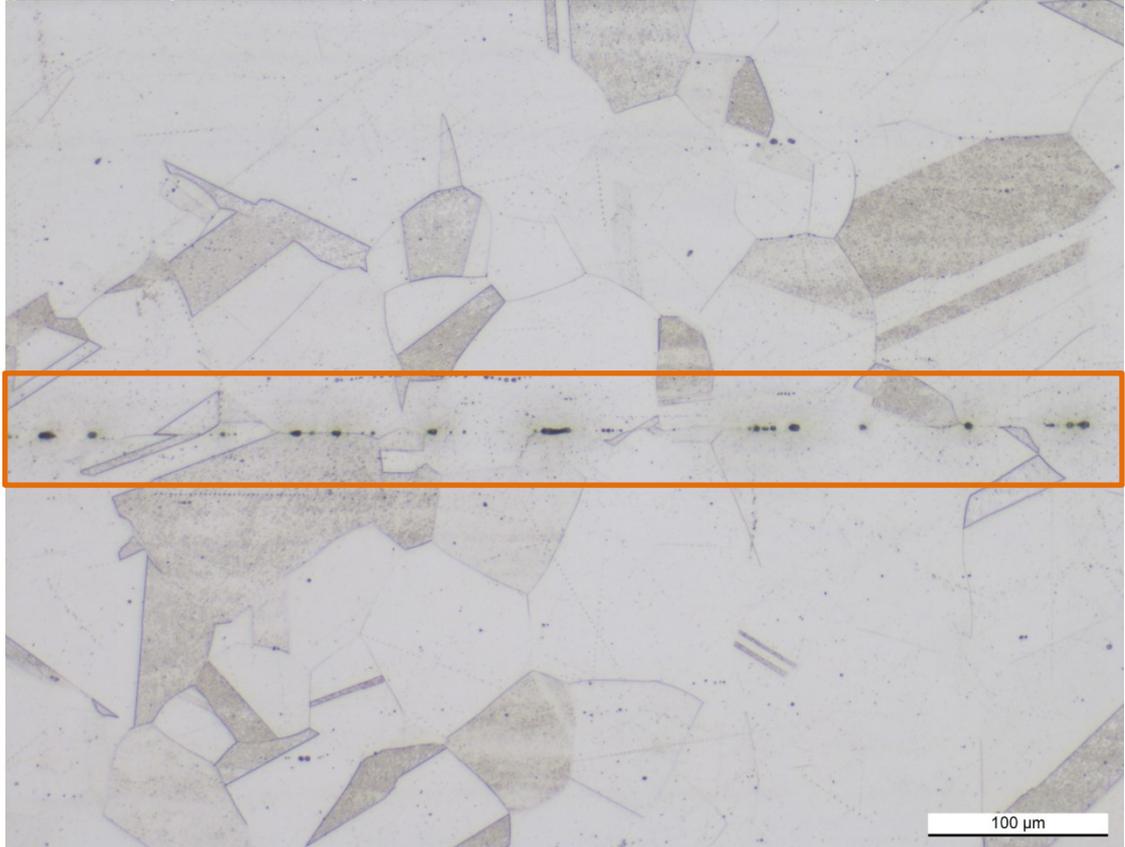
(a)



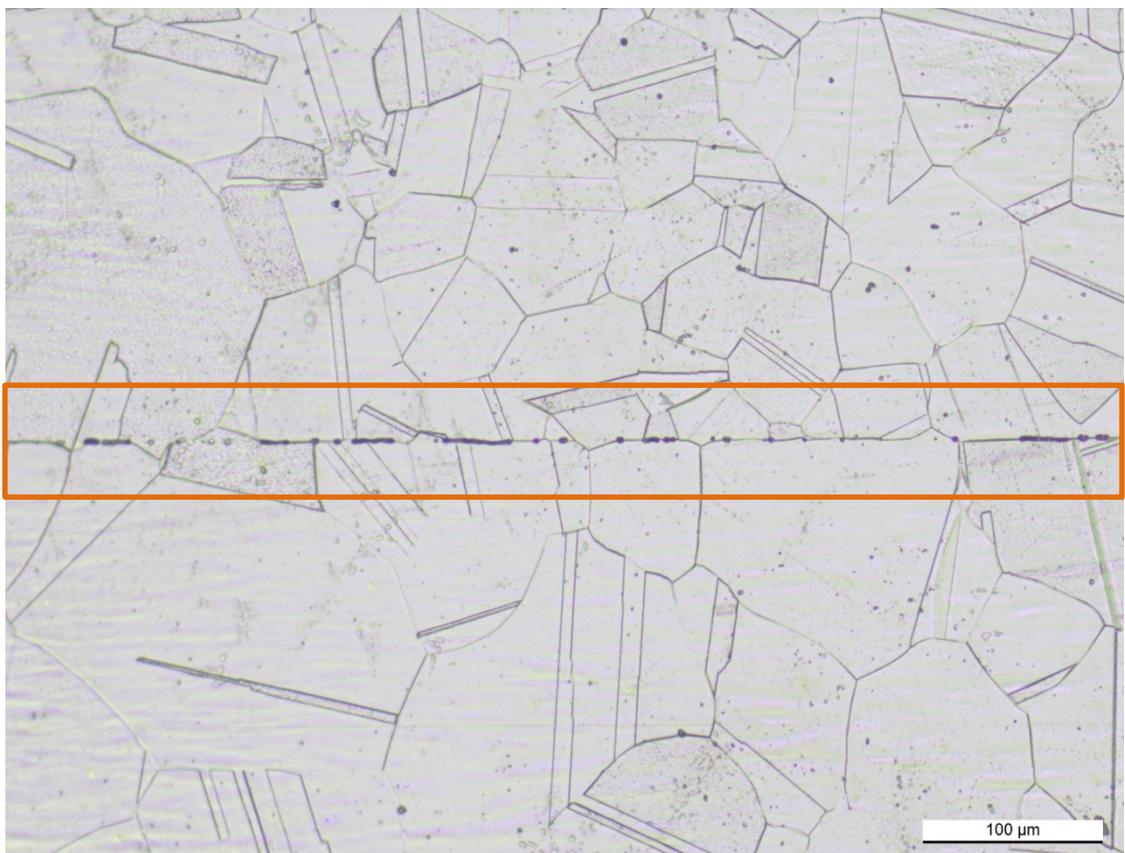
(b)

Fonte: Autor.

Figura 86 - Comparativo entre região sem canais (a) e com canais (b) da condição 5. Aumento de 200x.



(a)



(b)

Fonte: Autor.

Este aumento na quantidade e tamanho de vazios presentes nas linhas de união verificado na região com canais é um forte indicador de redução na qualidade da união, estando diretamente ligado tanto a perda de propriedades mecânicas do trocador de calor, quanto a perda de estanqueidade entre os canais, de modo que, a depender da intensidade deste aumento, a funcionalidade e segurança do dispositivo podem ser drasticamente afetadas. Para evitar este problema, recomenda-se antes do procedimento de união realizar uma operação de pós-processamento para remover as rebarbas e possíveis materiais incrustados na superfície.

Deste modo, observa-se que o impacto do processo de corte via jato d'água abrasivo concentra-se nas regiões adjacentes ao corte, sendo verificada degradação do acabamento de superfície e de geometria na borda dos canais, o que resultou em um aumento visivelmente na quantidade e tamanho dos defeitos na linha de união. Regiões distantes dos canais apresentaram linhas de uniões com menor quantidade de defeitos, quando comparada a região dos canais, indicando uniões de maior qualidade, resultado o qual condiz com as características topográficas observadas nestas regiões, similares ao material de base.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho, assim como são propostos temas para a continuidade do presente estudo.

6.1. Conclusões

1. O processo de corte via jato d'água abrasivo apresentou impactos na textura e integridade de superfície em ambas as faces das amostras. Na face de entrada do jato foi identificada a presença de uma zona afetada, que apresentou deterioração do acabamento de superfície, presença de incrustação de partículas abrasivas e rebarba com altura média de 31 μm . Na face de saída do jato apenas a formação de rebarba com tamanho médio de 74 μm foi observada.
2. A Pressão do jato não apresentou influência significativa no tamanho da região afetada pelo corte, no acabamento de superfície e na tolerância geométrica dos cortes. Contudo, foi observado um aumento na dispersão do tamanho médio da região afetada medido quando reduzida a pressão do jato.
3. A velocidade de avanço apresentou influência direta na qualidade geométrica dos cortes, uma vez que as amostras cortadas com maiores velocidades

apresentaram bordas visivelmente mais irregulares. Alterações significativas no acabamento de superfície não foram observadas.

4. A seleção da pressão do jato e da velocidade de avanço deve ser realizada de maneira conjunta, tendo em vista que estes parâmetros estão diretamente ligados à taxa de remoção de material e profundidade de corte, de modo que, condições como baixas pressões e altas velocidades de avanço foram combinadas e não foram efetivas no corte das amostras. Este resultado indica que o uso de pressões mais elevadas é desejável, uma vez que permite o aumento da velocidade de avanço e conseqüentemente da produtividade do processo, com melhora da qualidade.
5. A distância entre o bocal e a peça foi o parâmetro que apresentou maior influência no acabamento de superfície das amostras, sendo observado um tamanho médio de zona afetada de 285 μm nas amostras em que a distância utilizada foi de 3 mm, 204 μm nas amostras fabricadas com distância de 2,25 mm e 165 μm para as fabricadas com 1,5 mm de distância. A redução deste parâmetro resulta na redução significativa do tamanho médio da região afetada.
6. A condição 3 (125 mm/min – 340 MPa – 1,5 mm) apresentou o melhor resultado dentre as combinações de parâmetros estudadas, contando com o menor tamanho médio de zona afetada (149,3 μm) enquanto mantida a precisão geométrica do canal.
7. O pior resultado foi verificado na condição 5 (125 mm/min – 150 MPa – 3 mm), a qual apresentou maior tamanho médio da zona afetada (326 μm), mantendo boa qualidade geométrica, sendo considerada a condição crítica para o processo de união por difusão.
8. A presença de partículas abrasivas na face de entrada do jato foi confirmada por meio da análise química em EDS, em que foram identificados elementos típicos da composição química do Garnet como Al, Mg e Ca. Na face de saída não foram observados elementos típicos da composição química do Garnet, sendo identificados apenas elementos típicos da composição química do aço inoxidável austenítico 316L e elementos como Na e Cl, presentes na água da piscina do jato.
9. A caracterização em interferômetro ótico da superfície das amostras após o corte confirmou a deterioração do acabamento de superfície nas regiões adjacentes à borda dos canais na face de entrada do jato, apresentando aumentos de até 250% nos parâmetros Sa, Sq, Sz e Pt. Este aumento fica ainda mais claro quando

avaliadas as projeções axonométricas, onde as zonas afetadas passam a apresentar um perfil composto por grande quantidade de picos elevados, em contraste ao perfil composto majoritariamente por platôs e vales verificado na superfície conforme recebida. Na face de saída do jato, bem como nos pontos distantes das bordas dos canais na face de entrada, os parâmetros topográficos avaliados, bem como as projeções axonométricas mantiveram-se semelhantes ao material conforme recebido, não apresentando deterioração.

10. Na face de entrada do jato verificou-se a presença de uma rebarba de altura média de 31 μm , enquanto na face de saída o tamanho médio observado foi de 74 μm . Esta diferença é associada ao processo de formação e tipo de rebarba verificado em cada uma das faces, sendo no primeiro caso identificado rebarba do tipo *Poisson* e no segundo caso rebarba do tipo *roll over*.
11. Na face de entrada do jato foi observada uma leve redução na altura da rebarba quando aumentada a distância entre o bocal e a peça ou reduzida a pressão do jato. Entretanto, 88% dos pontos medidos encontram-se dentro da classificação de rebarba de tamanho pequeno, o que indica um baixo impacto dos parâmetros de corte no tamanho da rebarba formada nesta face e um menor potencial de perda de qualidade durante o processo de união por difusão em virtude da sua presença.
12. A natureza irregular da formação de rebarba na face de saída das amostras dificulta o uso do seu tamanho como um parâmetro de controle da qualidade de corte, de modo que, mesmo ao representar o tamanho da rebarba como a soma entre sua altura e comprimento, os resultados não convergem para uma conclusão concreta a respeito do modo como cada parâmetro impacta no tamanho final da rebarba.
13. A tentativa de representar o tamanho da rebarba como a soma entre sua altura e comprimento não foi exitosa, visto que os resultados não convergem para uma conclusão concreta a respeito do modo como cada parâmetro impacta no tamanho final da rebarba. Este resultado se deve a natureza irregular da formação de rebarba na face de saída das amostras, o que faz com que valores de tamanho muito dispersos sejam verificados em uma mesma amostra, dificultando o uso do seu tamanho como um parâmetro de controle da qualidade de corte.
14. Os blocos unidos por difusão e fabricados a partir das condições de corte 3 e 5 apresentaram resultados mecânicos semelhantes entre si (522 e 520 MPa de

tensão máxima, 235 e 231 MPa de tensão de escoamento e 45,9 e 44,8 % de alongamento respectivamente), não apresentando diferença estatisticamente significativa entre as condições conforme teste t de Student. Desta forma, concluiu-se que tanto o tamanho da rebarba, quanto o tamanho médio da zona afetada não apresentaram impacto significativo na resistência mecânica dos blocos unidos por difusão nas regiões analisadas. Deve-se destacar que dada a necessidade de uma seção contínua de material para realização de ensaios de tração, a região com canais não pode ser quantitativamente avaliada, sendo retiradas as amostras apenas da região sem canais.

15. A análise em microscopia ótica dos canais após união apresentou um desvio de forma no topo das aletas dos canais (face de entrada do jato), o que resultou na formação de cantos vivos, redução da área de união e no surgimento de vazios de maior tamanho próximo as bordas. Este comportamento é intrínseco a técnica de corte utilizada e apresenta impactos negativos tanto na qualidade da união, como no funcionamento do trocador de calor, podendo ser minimizado com a otimização na seleção dos parâmetros de corte.
16. A análise microestrutural dos blocos fabricados a partir da condição 3 e 5 condizem com os resultados dos ensaios de tração, de modo que as linhas de união em ambos os blocos apresentaram aspecto visualmente similares, com vazios de tamanho e quantidade semelhantes entre si, indicando baixa influência da variação dos parâmetros de corte na qualidade final da união
17. A região com canais demonstrou ser crítica para a fabricação de trocadores de calor, sendo verificado em ambos os blocos vazios em quantidade e comprimento visualmente maiores que os observados na região sem canais, indicando uma união de menor qualidade nestas regiões. Este aumento dos vazios na linha de união está associado a presença da zona afetada, visto que as modificações observadas no acabamento de superfície, a presença de particulados abrasivos incrustados e a rebarba, são observados com maior intensidade nesta região em virtude do aumento na razão entre área afetada pelo corte e a área total de união.
18. As regiões afetadas pelo corte apresentam uma superfície com maior heterogeneidade e maior quantidade e tamanho de picos, o que tende a reduzir a área real de contato durante a união e aumentar o tamanho e a quantidade dos vazios formados nas etapas iniciais, sendo necessário um tempo maior de união

para que os mecanismos difusivos sejam capazes de preencher completamente estes vazios. Deve-se ressaltar ainda que, em virtude da área reduzida, a distribuição irregular de pressão nas aletas dos canais pode também influenciar na qualidade das uniões.

Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas sugestões para trabalhos futuros:

- 1) Avaliar o impacto dos demais parâmetros de corte via jato d'água na qualidade final da superfície das peças, a exemplo do tamanho do abrasivo utilizado, taxa de alimentação, tamanho do orifício, e outros.
- 2) Avaliar o corte de múltiplas chapas empilhadas e/ou o uso de uma chapa de sacrifício sobre as chapas a serem cortadas, de modo a tentar evitar os impactos observados na face de entrada do jato e preservar a superfície da chapa conforme recebida.
- 3) Avaliar a utilização da técnica de corte via laser na fabricação das chapas com canais, de modo permitir a comparação do acabamento de superfície obtido e da qualidade final dos dispositivos unidos por difusão.
- 4) Avaliar técnicas alternativas para furação dos canais, de modo a reduzir os danos causados pela perfuração do jato durante o corte via jato d'água nestas regiões.
- 5) Realizar teste de estanqueidade nos blocos, visando garantir a qualidade da solda.
- 6) Realizar teste hidrostático nos blocos unidos, de modo ter um controle quantitativo de qualidade da união na região com canais.
- 7) Avaliar técnicas de adequação de superfície como eletropolimento e lapidação para a posterior união por difusão.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ASME. "Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay; ASME B46.1-2009", **The American Society of Mechanical Engineers, An American National Standard**, v. 2009, 2009.
- BADGUJAR, P. P., RATHI, M. G. "Analysis Of Surface Roughness In Abrasive Waterjet Cutting Of Stainless Steel", **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 3, n. 6, p. 209–212, 2014. Disponível em: <https://www.ijert.org/research/analysis-of-surface-roughness-in-abrasive-waterjet-cutting-of-stainless-steel-IJERTV3IS060282.pdf>.
- BAGNATO, O. R., ZAVAGLIA, C. A. de C., FERRANTE, M. **Propriedades Mecânicas de Juntas ALSu12/Al2O3 Soldadas por Difusão**. 2002
- BAMPTON, C. C. **Method For Diffusion Bonding Aluminum. United States Patent**. 1987
- BEGIC-HAJDAREVIC, D., CEKIC, A., MEHMEDOVIC, M., *et al.* "Experimental study on surface roughness in abrasive water jet cutting", **Procedia Engineering**, v. 100, n. January, p. 394–399, 2015. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.383. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.383>.
- BERGSETH, E., SJÖBERG, S., BJÖRKLUND, S. "Influence of real surface topography on the contact area ratio in differently manufactured spur gears", v. 56, p. 72–80, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.06.014>.
- BHATTACHARYYA, B., DOLOI, B. **Machining processes utilizing mechanical energy**. 2020.
- BITTER, J. G. A. "A Study of Erosion Phenomena Part I", **Wear**, v. 6, p. 169–190, 1963.
- BOTTOMLEY, I. E., GINTY, B., "The Development of DB/SPF Titanium Technology for Military Aircraft Applications BT - Diffusion Bonding 2". In: STEPHENSON, D. J. (Org.), Dordrecht, Springer Netherlands, 1991. p. 232–241. DOI: 10.1007/978-94-011-3674-7_19. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-011-3674-7_19.
- BRIEN, A. O. **Welding, Brazing and Soldering**. ASM International, 1993. v. 115. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/115416d0>.
- BUIJS, M. "Erosion of Glass as Modeled by indentation Theory", **Journal of the American Ceramic Society**, v. 77, n. 6, p. 1676–1678, 1994. DOI: 10.1111/j.1151-

2916.1994.tb09777.x.

CHITHIRAI PON SELVAN, M., MOHANA SUNDARA RAJU, N., SACHIDANANDA, H. K. "Effects of process parameters on surface roughness in abrasive waterjet cutting of aluminium", **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 7, n. 4, p. 439–444, 2012. DOI: 10.1007/s11465-012-0337-0.

DAVIM, J. P. **Surface integrity in machining**. 2010.

DUSPARA, M., STARČEVIĆ, V., SAMARDŽIĆ, I. "Analysis of zones created with waterjet cutting of AISI 316 L corrosion resistant steel", **Tehnicki Vjesnik**, v. 25, n. 2, p. 616–621, 2018. DOI: 10.17559/TV-20170216095042.

ETTL, P., SCHMIDT, B. E., SCHENK, M., *et al.* "Roughness parameters and surface deformation measured by coherence radar". 3407, 29 set. 1998. **Anais [...]**, 29 set. 1998. p. 133–140. DOI: 10.1117/12.323304. Disponível em: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=953298>.

FERGUSON, B., RAMULU, M. "Surface tracking of diffusion bonding void closure and its application to titanium alloys", **International Journal of Material Forming**, v. 13, n. 4, p. 517–531, 2019. DOI: 10.1007/s12289-019-01489-0.

GAHR, K. H. Z. **Microstructure and Wear of Materials**. Elsevier Science, 1987.

Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=qibApT7zNcYC>. (Tribology series).

GARMONG, G., PATON, N. E., ARGON, A. S. "Attainment of full interfacial contact during diffusion bonding", **Metallurgical Transactions A**, v. 6, n. 6, p. 1269–1279, 1975. DOI: 10.1007/BF02658537.

GIETZELT, T., TOTH, V., HUELL, A., *et al.* "Determining the Dependence of Deformation during Diffusion Welding on the Aspect Ratio Using Samples Made of SS 304 (1.4301)", **Advanced Engineering Materials**, v. 19, n. 2, p. 1–8, 2017. DOI: 10.1002/adem.201600344.

GIETZELT, T., TOTH, V., HUELL, A., "Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and Material Microstructure". **Joining Technologies**. InTech, 2016. v. 3. DOI: 10.5772/64312. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/joining-technologies/diffusion-bonding-influence-of-process-parameters-and-material-microstructure>.

GILLESPIE, L. K., BLOTTER, P. T. "The formation and properties of machining burrs", **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 98, n. 1, p. 66–74, 1976. DOI: 10.1115/1.3438875.

GONÇALVES, P. da C. **União por difusão de aço 316L na fabricação de trocadores de calor compacto**. 2019. 2019.

GROPETTI, R., MONNO, M., "A Contribution to the Study of Burr Formation in Hydro

Abrasive Jet Machining". 1992. p. 621–633. DOI: 10.1007/978-94-011-2678-6_41.
Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-94-011-2678-6_41.

GUPTA, K., JAIN, N. K., LAUBSCHER, R. **Advanced Gear Manufacturing And Finish: Classical and Modern Processes**. 2017.

HARVEY, J., PARTRIDGE, P. G., SNOOKE, C. L. "Diffusion bonding and testing of Al-alloy lap shear test pieces", **Journal of Materials Science**, v. 20, n. 3, p. 1009–1014, mar. 1985. DOI: 10.1007/BF00585745. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00585745>.

HASHISH, M., DU PLESSIS, M. P. "Prediction equations relating high velocity jet cutting performance to stand off distance and multipasses", **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 101, n. 3, p. 311–318, 1979. DOI: 10.1115/1.3439512.

HASHISH, Mohamed. "A modeling study of metal cutting with abrasive waterjets", **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 106, n. 1, p. 88–100, 1984. DOI: 10.1115/1.3225682.

HASHISH, Mohamed. "Pressure effects in abrasive-waterjet (AWJ) machining", **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, v. 111, n. 3, p. 221–228, 1989. DOI: 10.1115/1.3226458.

HAUSER, D., KAMMER, P. A., MARTIN, D. C. "Fundamentals of Solid State Welding and Their Application to Beryllium, Aluminum, and Stainless Steel", 1965. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/837160.pdf>.

HILL, A., WALLACH, E. R. "Modelling solid-state diffusion bonding", **Acta Metallurgica**, v. 37, n. 9, p. 2425–2437, 1989. DOI: 10.1016/0001-6160(89)90040-0.

HU, D., TANG, C. L., KANG, Y., *et al.* "An investigation on cutting quality by adding polymer in abrasive water jet", **Particulate Science and Technology**, v. 34, n. 3, p. 352–358, 2016. DOI: 10.1080/02726351.2015.1082522.

HUTCHINGS, I. M. "Mechanisms of wear in powder technology: A review", **Powder Technology**, v. 76, n. 1, p. 3–13, 1993. DOI: 10.1016/0032-5910(93)80035-9.

JIANGWEI, R., YAJIANG, L., TAO, F. "Microstructure characteristics in the interface zone of Ti/Al diffusion bonding", **Materials Letters**, v. 56, n. 5, p. 647–652, 2002. DOI: 10.1016/S0167-577X(02)00570-0.

JOHNSTON, C. E. "Waterjet/Abrasive Waterjet Machining", **Machining**, v. 16, p. 520–527, 2018. DOI: 10.31399/asm.hb.v16.a0002158.

KASHYAP, K., SRINIVAS, S. "Effect of Process Parameters on Depth of Penetration &

Surface Roughness in Abrasive Waterjet Cutting of Copper", **Applied Mechanics and Materials**, v. 895, p. 301–306, 2019. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.895.301.

KAZAKOV, N. F. **Diffusion Beading of Materials**. 1985.

KIM, J. J., YOUNG, Y. M. "Study on the passive film of type 316 stainless steel", **International Journal of Electrochemical Science**, v. 8, n. 10, p. 11847–11859, 2013.

KOVACEVIC, R. "Surface texture in abrasive waterjet cutting", **Journal of Manufacturing Systems**, v. 10, n. 1, p. 32–40, 1991. DOI: 10.1016/0278-6125(91)90045-4.

KRAJCARZ, D., BAŃKOWSKI, D., MŁYNARCZYK, P. "The Effect of Traverse Speed on Kerf Width in AWJ Cutting of Ceramic Tiles", **Procedia Engineering**, v. 192, p. 469–473, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.081. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.081>.

LÖSCHNER, P., JAROSZ, K., NIEŚLONY, P. "Investigation of the effect of cutting speed on surface quality in abrasive water jet cutting of 316L stainless steel", **Procedia Engineering**, v. 149, n. June, p. 276–282, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.667.

MOMBER, A. W., KOVACEVIC, R. **Principles of Abrasive Water Jet Machining**. 1998.

MORIDI FARIMANI, A. **Abrasive Jet Micromachining of Quartz Crystals**. 2010. University of New South Wales, 2010.

MUTAVGJIC, V., ZORAN JURKOVIC, FRANULOVIC, M., *et al.* "Experimental investigation of surface roughness obtained by abrasive water jet machining", n. September, p. 73–76, 2011.

NATARAJAN, Y., MURUGESAN, P. K., MOHAN, M., *et al.* "Abrasive Water Jet Machining process: A state of art of review", **Journal of Manufacturing Processes**, v. 49, n. November 2019, p. 271–322, 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.030. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.030>.

NIKNAM, S. A., ZEDAN, Y., SONGMENE, V. "Machining Burrs Formation & Deburring of Aluminium Alloys", **Light Metal Alloys Applications**, 2014. DOI: 10.5772/58361.

PECK, J. V. "Diffusion bonding Ti-6Al-4V for jet engine applications", **Proceedings of the ASME Turbo Expo**, v. 1A, p. 1–8, 1969. DOI: 10.1115/69-GT-46.

PEREC, A., PUDE, F., KAUFELD, M., *et al.* "Obtaining the selected surface roughness by means of mathematical model based parameter optimization in abrasive waterjet cutting", **Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering**, v. 63, n. 10, p. 606–613, 2017. DOI: 10.5545/sv-jme.2017.4463.

POPOV, V. L. **Contact Mechanics and Friction**. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2010. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-10803-7_21.

RAJYALAKSHMI, M., SURESH BABU, P. "Abrasive Water Jet Machining - A review on current development", **International Journal of Science Technology & Engineering**, v. 2, n. 12, p. 428–434, 2016. DOI: 10.9790/1684-12424452.

REZVANIAN, O., ZIKRY, M. A., BROWN, C., *et al.* "Surface roughness, asperity contact and gold RF MEMS switch behavior", **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 17, n. 10, p. 2006–2015, 2007. DOI: 10.1088/0960-1317/17/10/012.

ROSINSKI, G. "Comportamento Mecânico Do Núcleo De Um Trocador De Calor Unido Por Difusão", p. 149, 2018.

ROZARIO JEGARAJ, J. J., RAMESH BABU, N. "A soft computing approach for controlling the quality of cut with abrasive waterjet cutting system experiencing orifice and focusing tube wear", **Journal of Materials Processing Technology**, v. 185, n. 1–3, p. 217–227, 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.124.

RUSNALDY. "Diffusion bonding: an advanced of material process", **Rotasi**, v. 3, p. 23–27, 2001.

SELVAN, M. C. P., RAJU, N. M. S. "A Machinability Study of Stainless Steel Using Abrasive Waterjet Cutting Technology", 2012.

SHAH, R. K., SEKULI, D. P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. 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**, v. 31, n. 7, p. 609–618, 2001. DOI: 10.1002/sia.1088.

STACHOWIAK, G., BATCHELOR, A. **Engineering Tribology (Third Edition)**. 2005. v. Third. Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84882176267&partnerID=40&md5=9d442c18156945d76e0853ad8ba5822e>.

SUPRIYA, S. B., SRINIVAS, S. "Machinability Studies on Stainless steel by abrasive water jet -Review", **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p. 2871–2876, 2018. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.01.079. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.079>.

TAKADOUM, J. **Materials and Surface Engineering in Tribology**. 2010.

W. A. OWCZARSKI, W. H. KING, D. S. D. "Diffusion welding of the nickel base superalloys", **U.S. Patent 3**, v. 530, p. 569, 1970. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US3530568A/en>.

WANG, J., WONG, W. C. K. "A study of abrasive waterjet cutting of metallic coated sheet steels", **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 39, n. 6, p. 855–870, 1999. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00078-9.

WANG, Y. F., YANG, Z. G. "Finite element model of erosive wear on ductile and brittle

materials", **Wear**, v. 265, n. 5–6, p. 871–878, 2008. DOI: 10.1016/j.wear.2008.01.014.

ZHANG, J., LUO, G., WANG, Y., *et al.* "An investigation on diffusion bonding of aluminum and magnesium using a Ni interlayer", **Materials Letters**, v. 83, p. 189–191, 2012. DOI: 10.1016/j.matlet.2012.06.014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2012.06.014>.

ZIEGELHEIM, J., HIRAKI, S., OHSAWA, H. "Diffusion bondability of similar/dissimilar light metal sheets", **Journal of Materials Processing Technology**, v. 186, n. 1–3, p. 87–93, 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.020.

ZURUZI, A. S., LI, H., DONG, G. "Effects of surface roughness on the diffusion bonding of Al alloy 6061 in air", **Materials Science and Engineering A**, v. 270, n. 2, p. 244–248, 1999. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00188-4.