

EFEITO DA REFRIGERAÇÃO CRIOGÊNICA NO DESGASTE DE FERRAMENTA DURANTE O TORNEAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX

Leonardo Lima ¹; Éd Claudio Bordinassi ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Esse trabalho teve como objetivo estudar e analisar o efeito da criogenia no desgaste de uma pastilha de torneamento de um aço inoxidável super duplex (ASTM A890 – Gr 6A). O estudo foi feito visando melhorar a produção, evitando que a vida útil da pastilha seja muito curta. Para a análise, foram comparados o tempo de desgaste do inserto em usinagem a seco, com óleos lubrificantes e com o uso de nitrogênio líquido e, também, em todas as experiências foram medidas a rugosidade superficial. Já os parâmetros foram constantes, para que de forma rápida se tivesse um resultado dos benefícios e dos prejuízos do uso de nitrogênio líquido no processo em relação a outras formas de resfriamento. Chegou-se à conclusão de que o principal fator de desgaste de uma ferramenta de usinagem é a alta temperatura de trabalho, e em qual resfriamento mais eficiente prolonga a vida útil em relação a desbaste a seco. Porém, como a temperatura não é o único fator de desgaste, nesse trabalho a criogenia teve desempenho somente inferior à aplicação óleo sintético, onde outros trabalhos já feitos, visando o acabamento, apenas mostram os benefícios da criogenia.*

Introdução

No fornecimento de produtos de qualidade em uma produção e em um curto período de tempo é necessário que a usinagem seja feita da forma a aumentar a produtividade, sendo uma opção o aumento da velocidade de corte. Entretanto, devido à alta velocidade o calor de trabalho aumenta consideravelmente, diminuindo a vida útil da ferramenta usada.

O problema apresentado se agrava quando é usinado um metal com característica de baixa usinabilidade, dificuldade que um aço apresenta para ser usinado, como é o caso do aço inoxidável super duplex ASTM A890 – Gr 6^a, sendo o aço que será utilizado por todo esse trabalho.

Em qualquer processo de usinagem, o calor é gerado pelo resultado da deformação plástica da camada que está sendo retirada e pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco, sendo que a deformação do cavaco em materiais dúcteis se torna muito difícil, pois apresenta grande zona plástica.

Segundo Sunil et al (2014) para reduzir a temperatura do processo e assim aumentar a vida útil da pastilha, usa-se água ou líquidos lubrificantes, entretanto o método mais usado e mais eficaz é o uso dos últimos, que são compostos por óleos tanto mineral quanto artificial onde geram problemas ambientais.

Estudos recentes analisam os benefícios do uso de criogenia na usinagem, mostrando que não prejudica o meio ambiente e também podem ter melhorias na vida útil da ferramenta.

Estrutura e propriedades mecânicas do duplex

Saeid et al (2008) caracteriza o aço inoxidável super duplex, contendo tanto uma fase ferrítica (α) quanto uma austenítica (γ). Esse material apresenta uma boa combinação entre essas microestruturas, cada uma apresenta cerca da metade da proporção total do material. Essa relação contribui com boas propriedades mecânicas e uma forte resistência à corrosão. O fato

de apresentar tais fases, a liga de aço inoxidável super duplex, tem alto limite de escoamento e alta resistência à corrosão oriundas da fase ferrítica, já a ductilidade e uniformidade da corrosão, da fase austenítica.

Bordinassi (2006) ressalta que, o aço inoxidável super duplex (ASTM A890 – Gr 6A), o qual será trabalhado, é uma liga que apresenta uma baixa usinabilidade, e consequentemente alta taxa de desgaste nos insertos. A redução da duração da ferramenta é devido a algumas propriedades desta liga, tais como:

- ✓ Alta taxa de encruamento, o que leva a instabilidade da formação do cavaco e de vibração;
- ✓ Baixa condutividade térmica, desta forma o calor que iria se propagar para o material de trabalho e para o cavaco, se concentra nas arestas de corte da ferramenta;
- ✓ Resistência à fratura, a qual resulta no aumento do calor, na difícil quebra do cavaco e na má qualidade superficial;
- ✓ Alto coeficiente de dilatação térmica, o que dificulta a precisão de boas tolerâncias, aumentando o esforço e o calor gerado;
- ✓ Elevados valores de resistência mecânica e ductilidade, facilitando a formação de aresta postiça de corte.

Materiais e métodos

Para realização dos experimentos neste trabalho foram utilizados os seguintes métodos e equipamentos:

- ✓ Torno TORMAX 30B: Velocidade máxima litada a 1400 rpm e potência de 7,5 cv. Distância do barramento de 660 mm e distância entre pontas de 2.250 mm.
- ✓ Nos experimentos foram utilizados parâmetros constantes na usinagem do aço inoxidável super duplex (ASTM A890), profundidade de corte (a_p) = 2 mm, velocidade de corte (v_c) = 110 m.min⁻¹ e avanço (f) = 0,25 mm.rev⁻¹. As constantes estabelecidas para esse experimento foram de certa forma extrapolados, porém no limite estabelecido pelas normas, para que os resultados fossem obtidos de forma rápida.
- ✓ Tarugos de aço inoxidável super duplex fundido ASTM A890 GR 6A, na Tabela 1 tem-se a composição do mesmo. O aço tem comprimento inicial de 327,5 mm e diâmetro de 72,60 mm. A cada tarugo usado foi uniformizado para diminuir as vibrações ao máximo, minimizando esta variável de forma a despreza-la.

Tabela 1 – Composição do aço inoxidável super duplex Gr 6A

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	W	N
%	0,03	1	1	0,01	0,03	0,025	7	25	3	1	1

- ✓ Pastilha: GC2025 (M25. P35). A GC2025, consiste de uma pastilha com cobertura CVD com uma camada de 5,5 µm de TiCN-Al₂O₃-TiN, para então aumentar a resistência ao desgaste. Oferece também, boa resistência a choques térmicos e mecânicos e à deformação plástica em altas temperaturas, reduzindo o atrito e consequentemente a formação de aresta postiça. (Sandvik Coromant, 2002).

O processo de cobertura CVD, Deposição por Vapor Químico, consiste na deposição de microestruturas em uma combinação para melhoria do desempenho da ferramenta. A cobertura CVD tem aplicação onde o desgaste é muito alto, como no desbaste de um aço inoxidável.

O óxido de alumínio (Al₂O₃) por ser um material cerâmico refratário garante a estabilidade térmica e a resistência ao desgaste por abrasão, entretanto, apresenta pequena resistência a choques térmicos e mecânicos com pouca afinidade com o metal duro. Já o TiN é usado para percepção e melhoria do desgaste.

O carbonitreto de titânio (TiCN) possui grande afinidade físico-químico com o metal duro, afim de conseguir uma forte adesão com o núcleo, sendo a primeira camada em contato com o metal duro no processo CVD. O TiCN apresenta grande resistência ao desgaste por abrasão, baixa tendência à formação de aresta postiça, mas para evitar desgaste difusivo (transferência de átomos de um material para outro) é utilizada uma cobertura de óxido de alumínio (Al_2O_3).

Para efeito de estudo e comparação foram usados os seguintes lubrificantes:

- ✓ Nitrogênio líquido (NL2), apresentando densidade $0,807 \text{ g.mL}^{-1}$ e ponto de ebulição a -196°C .
- ✓ Óleo lubrificante Alocton S 390, que é um fluido de base sintética conforme a Tabela 2, composto de aditivos de alta capacidade de lubrificação, também proporcionando grande proteção. A concentração de óleo foi de 10% em água.

Tabela 2 – Características do fluido de corte Alocton s 390

Cor	Amarelo fluorescente
Densidade a $20/4^\circ\text{C}$	$1,080 - 1,100$
Corrosão de cavacos a 5%	MAC 011 Passa
pH solução a 5,0%	$9,0 - 9,6$
Caráter	Sintético

- ✓ Óleo lubrificante B-cool 755 que é um fluido mineral conforme a Tabela 3 foi desenvolvido especialmente para usinagem de ligas de alumínio, titânio e de níquel. Possui grande proteção a corrosão de ferro, estabilidade de emulsão e baixo consumo. A concentração de óleo foi de 5% em água.

Tabela 3 – Características do fluido de corte B-cool 755

Cor	Amarelo
Conteúdo de óleo mineral	52%
Densidade a 20°C	$0,96 \text{ g.cm}^{-3}$
Viscosidade a 40°C	$133 \text{ mm}^2.\text{s}^{-1}$
pH solução	$8,8 - 9,8$

- ✓ Rugosímetro: Mitutoyo sj-201.

A cada passe que foi dado no tarugo de aço inoxidável super duplex, foi medida a rugosidade superficial. O procedimento foi feito para se conhecer quais parâmetros obtiveram a melhor qualidade superficial, apesar do estudo ser focado no desbaste do material, na qual a rugosidade não é um fator determinante.

- ✓ Suporte: DCLNR 2020K 12, Sandvik-coromant.
- ✓ Lupa de aumento, Sandvik-coromant.

A lupa usada não é o instrumento mais adequado para medir o desgaste da pastilha, mas a mesma foi usada para otimizar análise evitando o uso de microscópio. A cada passe, o desgaste da ferramenta foi anotado, no qual o limite máximo era de 0,5 mm que se ultrapassado o uso da pastilha se torna inviável.

- ✓ M.Q.L. (minimum quantity lubrication), Nebulizador IV Tapmatic, tem função de mandar em forma de jato uma pequena quantidade de líquido lubrificante para o local de resfriamento, com a finalidade de ter um melhor desempenho e também podendo economizar até 50% do fluido.

Foram preparadas 8 amostras dos cavacos de cada procedimento para análise metalográfica, tendo como objetivo saber se houve alguma alteração na microestrutura do aço usado e se houve precipitação. Para esta análise metalográfica a sequência de preparação foi:

- ✓ Embutimento: realizados em uma resina termofixa de cura a quente (baquelite);
- ✓ Lixamento: realizado com uma máquina rotativa sendo usada água como fluido refrigerante, e usado uma sequência de lixas a prova d'água granuladas de #220, #320, #400 e #600 mesh;
- ✓ Polimento: foi usado uma politriz rotativa utilizando álcool etílico. Foi utilizada pasta de diamante de 1µm.
- ✓ Ataque: Behara modificado, com imersão em solução que consiste em 5 partes de H₂O para 1 de HCl, com adição de 0,3g de metabisulfito de potássio para cada 100ml de solução.

Resultados e discussões

Foram estudados quatro métodos de usinagem, o processo terminou quando o desgaste ultrapassou 0,5 mm, sendo determinado o tempo necessário para tal desgaste. As Tabelas de 4 a 7 mostram os resultados obtidos nas experiências.

Tabela 4 - Usinagem com aplicação constante de óleo (Alocton S390)

Passadas	Diâmetro (mm)	Desgaste da ferramenta (mm)	Rugosidade (µm)	Tempo (min)
0	56,9	0,0	0	0,00
1	52,9	0,0	1,93	24,76
2	49	0,0	2,13	51,50
3	45	0,1	2,26	80,61
4	40,9	0,1	2,16	112,64
5	36,9	0,1	2,36	148,14
6	33,1	0,1	1,92	187,72
7	29	0,2	1,99	232,89
8	25,6	0,2	2,05	284,06
9	38,2	0,5	2,04	318,35

Tabela 5 - Usinagem com óleo (B-Cool 755)

Passes	Diâmetro (mm)	Desgaste da ferramenta (mm)	Rugosidade (µm)	Tempo (min)
0	76,5	0,0	0	0,0
1	72,50	0,1	1,96	18,07
2	68,50	0,2	1,64	37,19
3	64,50	0,2	1,59	57,50
4	60,50	0,3	1,64	79,16
5	56,60	0,5	1,57	102,30

Tabela 6 – Usinagem com uso de nitrogênio líquido

Passes	Diâmetro (mm)	Desgaste (mm)	Rugosidade (µm)	Tempo (min)
0	44,0	0	0	0,00
1	40,0	0	2,42	32,75
2	36,0	0	2,36	69,14
3	32,0	0,1	2,34	110,08
4	28,3	0,2	2,41	156,37
5	24,8	0,2	2,48	209,19
6	78,0	0,3	3,58	225,98
7	74,0	0,5	4,26	243,69

Tabela 7 - Usinagem a seco

Passes	Diâmetro (mm)	Desgaste da ferramenta (mm)	Rugosidade (µm)	Tempo (min)
0	50	0,0	0	0,0
1	46,00	0,1	1,42	28,48
2	42,00	0,2	1,44	59,67
3	38,00	0,3	1,45	94,14
4	76,40	0,5	1,59	111,29

Segundo Xavier (2010), uma ferramenta será desgastada cedo ou tarde tendo a necessidade de ser substituída por uma nova, sendo um dos maiores motivos de atraso na produção. As falhas a surgirem na ferramenta são devido à fragilidade, a deformação ou ao desgaste. O motivo principal de tais fatores é a alta temperatura, sendo que ao se aplicar um bom fluido refrigerante aumenta a durabilidade da ferramenta.

Como pode-se ver na Figura 1, há uma melhoria considerável da vida útil da pastilha na usinagem quando há aplicação de um líquido refrigerante em relação à usinagem a seco, pois assim ocorre em temperaturas menores. Como Sunil et al (2014) ressalta, para diminuir o calor de trabalho da ferramenta, o resfriamento criogênico com nitrogênio líquido (NL2) é um bom método. O nitrogênio líquido tem a capacidade de absorver o calor envolvido no processo de usinagem sendo muitas vezes um resfriamento melhor do que os líquidos refrigerante convencionais, ainda mais por ser um gás incolor, não tóxico e inerte (não reage com outros materiais).

O artigo de Klayan; Choudhury (2008) também transmite em sua pesquisa que, na usinagem de ligas com alta dureza, como os aços inoxidáveis, a vida útil da ferramenta aumenta com o uso de fluidos refrigerantes convencionais. Já o resfriamento criogênico tem maior redução do desgaste das ferramentas na usinagem em alta velocidade, comparado com corte a seco e até mesmo com aplicação de fluidos refrigerante, pois tem um poder de resfriamento maior que os demais.

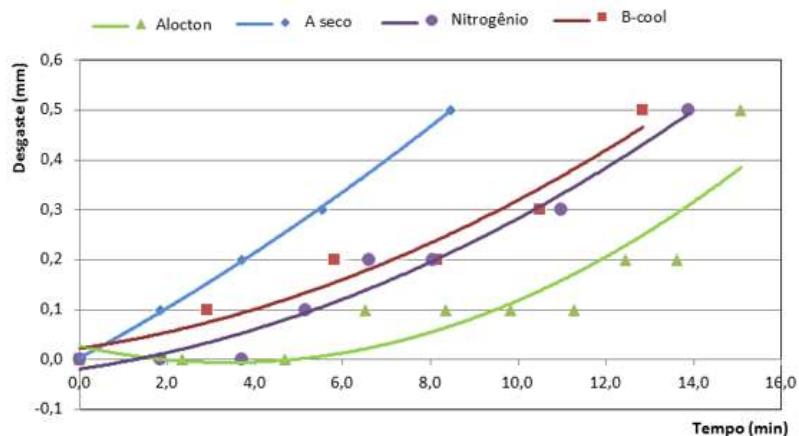


Figura 1- Desgaste da pastilha em relação com o tempo de operação.

O nitrogênio não é um fluido de fácil manuseio, pois sua fase líquida está a uma temperatura próxima de -190°C e ao entrar em contato com a temperatura ambiente, entra em ebulição. A criogenia na usinagem também apresenta outra dificuldade, quando aplica-se o nitrogênio na pastilha deve-se ter o cuidado para o líquido não entrar em contato com o cavaco, pois a retirada do mesmo se tornará mais difícil. Isso ocorre pelo fato da rápida queda de temperatura do material usinado, o deixando com uma dureza mais alta, tendo assim a necessidade de aumentar a força de corte de forma que o flanco da pastilha será rapidamente desgastado, piorando também a rugosidade superficial, como é visto na Figura 2 a rugosidade superficial é maior quando o tempo de usinagem aumenta.

Um estudo feito por Xavier (2010), indica que há vantagens no resfriamento por jato criogênico. A refrigeração não é desperdiçada em qualquer zona de temperatura e, portanto, a peça mantém quase uma temperatura constante, sendo que terá tanto uma melhor rugosidade superficial quanto uma tolerância geométrica. Este resfriamento, quando localizado na face da ferramenta tem uma maior redução de calor, aumentando a dureza da ferramenta, e assim reduzindo a sua taxa de desgaste.

Mas como é visto na Figura 2, a rugosidade superficial do aço aumenta pelo fato de que o resfriamento com uso de nitrogênio não deve resfriar o cavaco, pois o mesmo é endurecido e

devido ao choque térmico a inicio de vibrações. Para evitar ao máximo o término da vida útil do inserto, o procedimento deve ser combinado de forma harmônica, a redução da temperatura do inserto e o aquecimento do cavaco, para de certa forma amolece-lo facilitando a retirada e evitando vibrações.

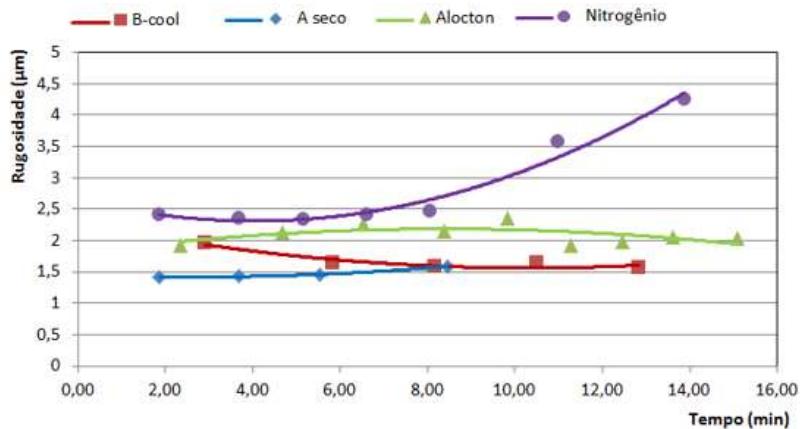


Figura 2 - Rugosidade na peça usinagem pelo tempo de usinagem.

Kaynak et al (2013) mensura que, a vida útil da ferramenta de corte é menor quando se aumentam a velocidade de corte e a profundidade do desbaste. Ressalta também que, as tolerâncias geométricas e a rugosidade superficial, da peça usinada, têm uma má qualidade devido ao desgaste que a ferramenta vai sofrendo no decorrer da usinagem. Percebe-se na Figura 3 que a rugosidade tem um grande aumento apenas quando usado a criogenia como parâmetro, isso ocorre pelo fato do nitrogênio não ser um bom lubrificante, ocasionando em um atrito maior entre a ponta da ferramenta e a peça comparado com os demais. Nota-se, também, que a rugosidade é agravada quando o desgaste da ferramenta é muito alto, pois quando o mesmo era menor que 0,1mm a rugosidade não sofreu alterações.

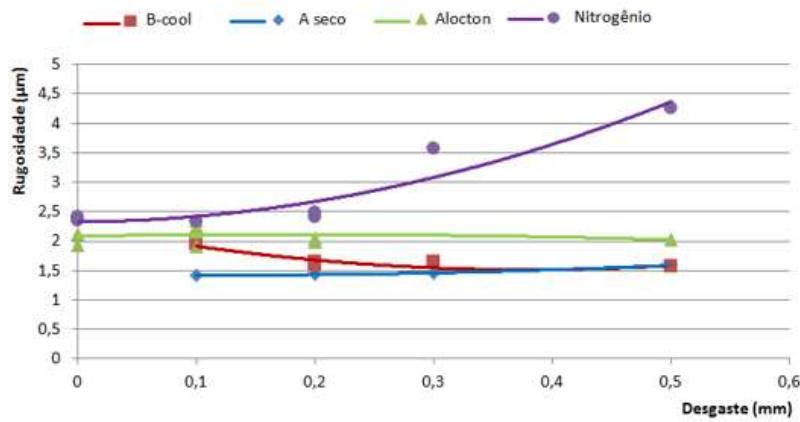


Figura 3 – Rugosidade superficial pelo desgaste em cada parâmetro.

Foram tiradas fotos para efeito de comparação, em um microscópio, entre as pastilhas usadas nos diferentes métodos de lubrificação, assim, podendo ter uma noção dos fenômenos ocorridos. Nos processos houveram diferenças do tamanho no desgaste pois antes de ter um desgaste de 0,5mm, o tamanho de desgaste estabelecido de parada, teve-se uma grande diferença na última passada devido ao desgaste não ser linear.

Na Figura 4, pode-se ver as pastilhas e seu respectivo desgaste, onde na Tabela 8 há a legenda das respectivas pastilhas, nas pastilhas de número 1 e 4 que são respectivamente, com uso de óleo Alocton (sintético) e com criogenia, apresentam desgaste de 0,5mm em um maior tempo devido apresentarem melhores propriedades lubrificante e por consequência tendo as

maiores vidas úteis. Por outro lado, nas pastilhas de número 2 e 3 que são respectivamente, aplicação de óleo mineral (B-Cool) e usinagem a seco, são desgastadas em um menor tempo dentre os métodos usados e portanto menores vidas úteis.

Um fenômeno presente que pode-se observar, é que nas pastilhas analisadas o tamanho do desgaste é proporcional ao calor do processo, pois nas pastilhas que apresenta menores vida útil tem-se marcas avermelhadas e esverdeadas que demonstram que houve altas temperaturas e acabaram gerando marcas de calor. As marcas roxas nas pastilhas são somente tinta para fazer a marcação das faces, não sendo alteradores da análise.

Em todas as usinagem e em todos os passes tiveram os mesmos avanços e parâmetros de corte, porém observa-se que nas pastilhas de número 2 e 3 tem maiores desgastes no flanco principal próximo ao raio da ponta, sendo caracterizado pelo aquecimento do aço usinado e pelo maior atrito devido à falta de um bom lubrificante, acarretando em uma maior dificuldade da retirada de material nesta seção. Já os métodos que apresentam uma boa lubrificação, principalmente no raio da ponta da pastilha, tem os desgaste predominante em uma distância de 4 mm, exatamente o avanço usado.

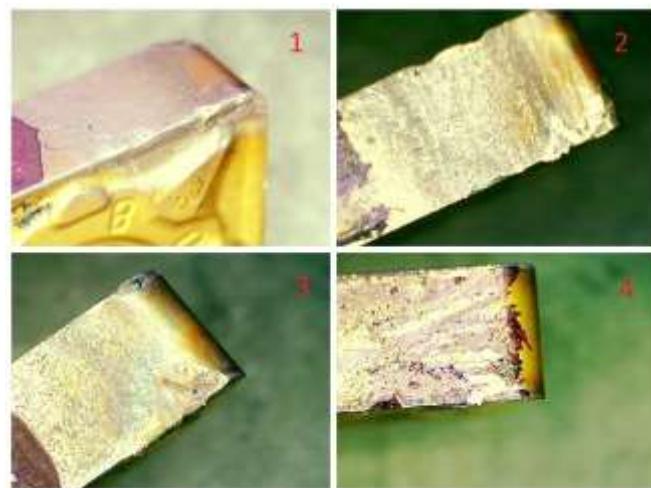


Figura 4 – Comparaçao entre as pastilhas usadas.

Tabela 8 – Legenda da Figura 4 e 5.

Número	Parâmetro
1	Alocton
2	B-cool
3	A seco
4	Criogênia

Klayan; Choudhury (2008) alegam que, os resfriamentos mais comuns em usinagem são através de óleos refrigerantes, mas ocorrem quebras químicas, devido ao calor, que resultam em produtos nocivos ao meio ambiente e também existem problemas na sua reciclagem. Alguns benefícios do nitrogênio é que evitamos esses problemas e também evitamos a limpeza, o seu descarte, e principalmente, não é um gás nocivo ao meio ambiente. Entretanto, deve-se tomar algumas medidas de segurança com a inalação desse gás, pois pode acarretar em asfixia. Outro problema encontrado no nitrogênio, além de ser um produto de difícil manuseio, é que pode provocar queimaduras devido à baixa temperatura.

Nos ensaios metalográficos foram analisados as microestruturas dos cavacos retirados no primeiro passe, em cada parâmetro utilizado no torneamento do aço inoxidável super duplex, para notar se cada método utilizado as modificou. Na Figura 5 apresenta-se o comparativo entre a metalografia dos cavacos, e conforme a Tabela 8 tem-se a legenda das mesmas, sendo que

nas imagens de número 1 e 3, que são as com uso de Alocton e a seco respectivamente, foram os métodos que apresentaram maior quantidade de fase secundária, onde são apontadas pela seta branca. Nas imagens de número 2 e 4, que são B-cool e criogenia respectivamente, apresentam encruamento devido à deformação plástica, apontadas pela seta preta, mas também apresentaram pouca fase secundária.

Segundo Zucato et al (2002) é muito comum a ocorrência de uma segunda fase em aços inoxidáveis e isso ocorre pelo aumento da temperatura, muitas vezes ocasionando a diminuição da resistência a corrosão, podendo chegar em até 8 vezes menor, e também há um aumento da dureza do material, sendo assim dificultando sua usinagem. Portanto nota-se que na utilização da criogenia evita-se a formação de uma segunda fase nos cavacos retirados, porém nesse trabalho não tinha o foco de saber qual era tais fases secundárias.

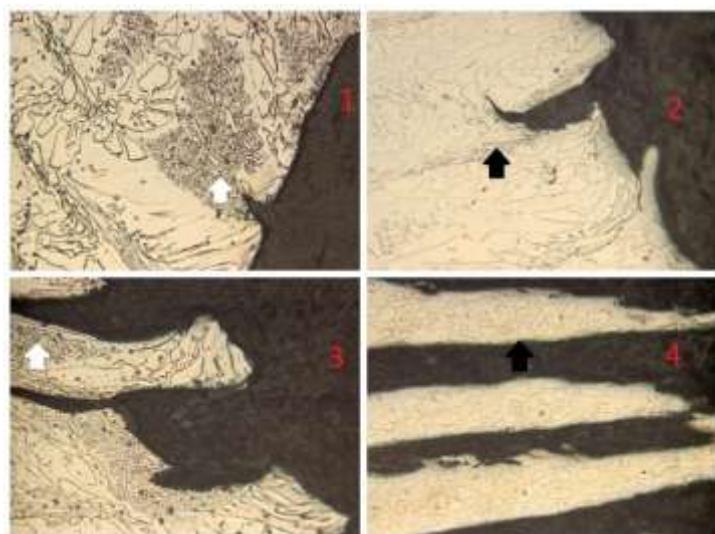


Figura 5 – Comparação metalográficas entre cavacos.

Conclusão

A pesquisa estuda o desgaste da ferramenta na usinagem do aço inoxidável super duplex, analisando em diferentes métodos de resfriamento em qual tem a maior vida útil, para que terá o menor atraso na linha de produção.

Os teste feitos demonstraram que, o nitrogênio apresentando grande qualidade de resfriamento, mas teve pior desempenho em relação ao resfriamento com óleo sintético lubrificante, pois o nitrogênio não consegue resfriar a ponta da ferramenta por um longo período e não tem a mesma qualidade de lubrificação de um óleo, entretanto a diferença entre os desempenhos são pequena justificando o uso da criogenia.

A criogenia na usinagem tem outra vantagem em relação ao uso de óleos, pois não há quebras químicas que irão agredir o meio ambiente, sendo assim o nitrogênio pode tornar-se mais favorável mesmo sendo um pouco menos produtivo.

Referência bibliográfica

Bordinassi, É.C. (2006) *Contribuição ao Estudo da Integridade Superficial de um Aço Inoxidável Super-Duplex Após Usinagem*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Kaynak, Y.; Karacab, H.E.; Noebec, R.D.; Jawahird, I.S. (2013) *Analysis of Tool-Wear and Cutting Force Components in Dry, Preheated, and Cryogenic Machining of NiTi Shape Memory Alloys*. Procedia CIRP, 8, 498-503.

Klayan, K.V.B.S.K.; Choulhury, S.K. (2008) *Investigation of Tool Wear and Cutting Force in Cryogenic Machining Using Design of Experiments*. Journal of Materials Processing Technology, **203**, 95 - 101.

Saeid, T.; Abdollah-Zadeh, A.; Assadi, H.; Malekghaini, F. (2008) *Effect of Friction Stir Welding Speed on the Microstructure and Mechanical Properties of a Duplex Stainless Steel*. Materials Science and Engineering A, **496**, 262-268.

Coromant, S. (2002). *Ferramentas para Torneamento*. 528 p.

Sunil, M.; Kumar, A.S.; Yoganath, V.G.; Srinivasa, C.K.; GuruMurthy, T. (2014) *Evaluation of Tool Life and Cutting Forces in Cryogenic Machining of Hardened Steel*. Procedia Materials Science, **5**, 2542-2549.

Xavier, S.E.D. (2010) *Análise de Efeitos de Criogenia na Usinagem de Anéis de Rolamentos*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Zucato, I.; Moreira, M.C.; Machado, I.F.; Lebrão, S.M.G. (2002). *Microstructural Characterization and the Effect of Phase Transformation on Toughness of the UNS S31803 Duplex Stainless Steel Aged Treated at 850 °C*. Materials Research, **v. 5, n. 3**, 385-389.