Estudo das técnicas de usinagem na confecção de moldes e matrizes

Aline Aparecida Dutra da Silva (FIEL – Faculdades Integradas Einstein de Limeira) alinedutra@hotmail.com
Nayara Soares Picinin (FIEL – Faculdades Integradas Einstein de Limeira) nayara.silva@trw.com
Márcio A. G. Machado (FIEL – Faculdades Integradas Einstein de Limeira) marcioagmachado74@gmail.com

Resumo:
Atualmente, é indispensável que as organizações busquem olhar de forma estratégica seus processos, verificando onde estão os gargalos, os pontos críticos quanto à custo, as possibilidades de padronização, redução dos desperdícios que impactam no tempo de produção total e entre outros fatores. E em meio a este cenário, no qual é crucial desenvolver novos métodos e traçar novas sistemáticas que possam trazer ganhos significativos a um determinado processo, o presente artigo busca realizar uma pesquisa-ação que objetiva aplicar estratégias de corte na usinagem de um blank de alumínio (cuja geometria é a representação da Máscara do homem de ferro) que atinjam resultados na qualidade superficial da peça considerados de baixo rugosidade. A técnica High Speed Machine será uma das estratégias adotadas para que os resultados no acabamento da superfície sejam alcançados. Outro objetivo será validar se estas estratégias são capazes de otimizar o processo de fabricação de moldes e matrizes, que atualmente demandam um bom tempo de usinagem e acabamento.
Palavras chave: Moldes, Matrizes, HSM, Acabamento.

Study of machining techniques in the manufacture of molds and dies

Abstract
Nowadays, it is imperative that organizations seek to strategically look at their processes, verifying where bottlenecks are, critical points about cost, possibilities for standardization of processes and products, reduction of wastes that impact total production time and among others factors. And in the midst of this scenario, in which it is crucial to develop new methods and to trace new systematics that can bring significant gains to a given process, this article seeks to conduct an action research that aims to apply cutting strategies in the machining of an aluminum blank (whose geometry is the representation of the Iron Man's Mask) that reach results in the superficial quality of the piece considered of low roughness. The High Speed Machine technique will be one of the strategies adopted so that the results in the surface finishing are achieved. Another objective will be to validate if these strategies are able to optimize the process of manufacturing molds and dies, which currently demand a good time of machining and finishing.
Key-words: Molds, Dies, HSM, Machining.

1. Introdução

Desde a antiguidade o ser humano tem evoluído no desenvolvimento de utensílios que auxiliem no seu dia a dia. Independente do material, desde pedra e madeira à cerâmica e metais, essas ferramentas permitiram que o trabalho humano fosse cada vez mais desempenhado com menor esforço físico, e à medida que as necessidades humanas se tornaram cada vez mais complexas estes materiais de ferramentas foram sendo modificados e trabalhados em suas propriedades.

Atualmente, a competitividade entre as empresas, devido ao mercado consumidor incisivo quanto à qualidade, tem contribuído na busca pela diferenciação de produtos e melhoria nos

processos, visando a redução de custos (CORRER & ADAME, 2014). Dentre as diferentes organizações e suas áreas de atuação, às que trabalham com processos de usinagem são exemplos do quanto é importante e necessário o investimento em novas tecnologias e melhorias em suas linhas produtivas, pois sendo este mercado altamente competitivo e de âmbito internacional, torna-se vital ter produtividade com menor tempo e menor custo.

Em consideração à este cenário, em que as organizações buscam a melhoria contínua para se manterem competitivas no mercado, o presente artigo utiliza a tecnologia denominada de altas velocidades, o High Speed Machine (HSM), os softwares CAD/CAM, e estratégias de corte como os parâmetros tradicionais do fresamento trocoidal, com o objetivo de obter baixos resultados de rugosidade, otimizando o processo convencional de confecção de moldes e matrizes.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Fresamento

O fresamento conceitua-se como uma das principais operações na usinagem e destaca-se pela capacidade multifuncional na produção de peças com complexas geometrias, e também garante maior extração de material devido à fresa possuir inúmeros dentes (arestas de corte). Neste processo, a ferramenta fica parada em uma única posição e realiza um movimento rotacional, ao mesmo tempo em que a mesa (onde a peça é fixada) realiza os movimentos denominados longitudinal e transversal que darão origem à forma da peça desejada. Há apenas alguns casos específicos em que a ferramenta pode se movimentar e a peça ficar imóvel (ABRÃO et al., 2009).

Conforme Costa (2003), devido à fresa ser capaz de se apresentar com vários gumes de corte, foi possível sincronizar o aumento produtivo à qualidade final da superfície fresada, obtendo melhores resultados no acabamento, pois admitiu-se aumentar a velocidade de avanço, porém com um avanço por faca menor.

Compreendendo, portanto a importância deste processo para a usinagem, temos Ferraresi (2013) destacando-o como uma operação capaz de atender as múltiplas complexidades geométricas das superfícies desejadas, e Diniz et al. (2010) cita que atualmente o mercado de produção mecânico depende muito do processo de fresamento, pois grande fatia dos produtos/peças só são factíveis graças a esta operação.

2.1.1 Tipos de Fresamento

Abrão et al. (2009), destaca os principais tipos de fresamento, conforme a seguinte disposição:

a) Fresamento tangencial (concordante ou discordante).
b) Fresamento frontal.

O fresamento tangencial, pode apresentar-se de duas formas, sendo discordante ou concordante. Entretanto no geral, é chamado de tangencial devido à superfície da peça estar paralela ao eixo da fresa, e também por apresentar uma profundidade de corte (Ap) consideravelmente maior que a penetração (Ae) (DINIZ et al., 2010; CIMM, 2018). A diferença entre o fresamento concordante e o discordante está nas na comparação entre as velocidades de corte e de avanço. No concordante normalmente a velocidade de corte e de avanço são praticamente iguais, enquanto que no discordante diferem de forma a serem contrárias. Portanto no processo de remoção de material do fresamento concordante o cavaco admite seu maior tamanho no início do corte e sendo esmagado na saída da aresta, enquanto que no discordante contrariamente o cavaco é maior na saída da aresta e por isso o material é esmagado no início da entrada do

gume, não havendo corte, e isso faz com que haja um aumento nos esforços de corte o que pode ser prejudicial à ferramenta (DINIZ et al., 2010; CIMM, 2018).

No fresamento frontal, a superfície da peça fica de forma perpendicular ao eixo da fresa, e o que dá forma a peça é a aresta secundária. Nesta operação o movimento concordante e discordante ocorrem concomitantemente, e contrariamente ao fresamento periférico a penetração (Ae) é muito superior à profundidade de corte (Ap) (CIMM, 2018).

2.2 Materiais para ferramentas de usinagem

Muitos são os materiais utilizados para fabricação de ferramentas de corte, mas a lógica mais comum utilizada para escolha da ferramenta a ser empenhada em determinado processo é de que a ferramenta deve ter um material mais duro que a peça. Entretanto é necessário avaliar muito bem quais serão os procedimentos que serão realizados (desbaste, acabamento, corte), qual o material da peça e entre outros fatores (BARBOSA, 2014).

Abrão et al. (2009) apresentam as principais características que são inerentes às ferramentas de corte:

a) Dureza elevada;
b) Tenacidade capaz de suportar quebras;
c) Elevada capacidade de suportar o desgaste por abrasão;
d) Elevada capacidade de suportar ações compressivas;
e) Elevada capacidade de suportar ações de cisalhamento;
f) Estabilidade química;
g) Elevada capacidade de suportar impactos;
h) Características mecânicas que permitam bons resultados em altas temperaturas;
i) Elevada capacidade de suportar mudanças bruscas de temperatura.

Temos dentre os principais materiais para ferramentas de corte o Aço rápido, o Metal duro, as Cermets, as Cerâmicas e os materiais ultraduros (CBN – PCBN, PCD) e por último o diamante natural (BARBOSA, 2014).

A pesquisa em questão tem por material da peça a ser usinada o alumínio e conforme disposição a seguir, terá o metal duro como material da ferramenta de corte.

2.2.1 Metal duro

O desenvolvimento de uma ferramenta como o Metal duro trouxe grandes contribuições para o desempenho dos processos, pois permitiu à usinagem o aumento da velocidade de corte, que consequentemente trouxe mais produtividade, do que a já possível com o Aço rápido (JUNIOR, 1998). Com a busca por melhorias nas propriedades físicas e mecânicas desses grupos de classes convencionais, foram desenvolvidos elementos de liga ao metal duro. Os principais elementos que são adicionados como ligas são: Carboneto de Titânio (TiC), Carboneto de Tântalo (TaC), Carboneto de Nióbio (NbC) e Nitreto de Titânio (TiN), e cada um deles influenciam de forma particular nas propriedades do material (XAVIER, 2003). Tais tecnologias no desenvolvimento de pastilhas de metal duro com ligas que permitem a melhoria nas suas propriedades de usinagem proporcionou uma queda expressiva no desgaste da mesma, aumentando sua vida útil e consequentemente a produtividade.

A norma ISO 513-1975 classifica o metal duro convencional dividindo em três grupos de classe: P, M e K, conforme sua aplicação na usinagem. A classe P tem aplicabilidade em aços em geral, a classe M em aços inoxidáveis, e a classe K é utilizada para a usinagem do ferro fundido

comum e coquilhado, maleáveis de cavaco curto e o alumínio, material a ser usinado no presente trabalho (XAVIER, 2003).

2.3 Alumínio

O alumínio, é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, podendo ser utilizado para diversas finalidades e isto está relacionada com suas características físico-químicas, como por exemplo seu baixo peso comparado com outros metais de grande consumo, resistência à corrosão e alta condutividade elétrica/térmica (ABAL, 2018).

A importância do alumínio na indústria está ligada a diversos fatores:

a) Material facilmente transformado;

b) Material facilmente usinado;

c) Temperatura de usinagem baixa;

d) Podem ser utilizadas altas velocidades de corte.

As diversas aplicações do alumínio, se permite através das suas características sendo que, as aplicações deste material excedem a de todos os outros, exceto ao aço. Atualmente observa-se a utilização do alumínio em diversas áreas, no ramo automotivo, em transportes como material estrutural (aviões, barcos), na construção civil, em bens de uso (utensílios de cozinha, ferramenta) (ABAL, 2018).

2.4 CAD/CAM

O desenho técnico sempre fez parte da organização produtiva, pois é o elo entre a engenharia e a produção, porem na década de 50, no Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), principiou-se a discussão da tecnologia CAD/CAM, tendo pela primeira vez o computador no auxílio da engenharia (BÉZIER, 1993 apud SOUZA & COELHO, 2003 p.1). Por décadas a utilização do sistema CAD/CAM ficou limitada, devido aos custos envolvidos, que englobam hardware, software, qualificação de mão de obra e outros, porém com o avanço tecnológico, tornou-se comum a utilização deste software e então tornando-se foco de grandes empresas. Desta forma as geometrias construídas pelo CAD atreladas as informações provenientes do CAM, tem fator significativo para as próximas etapas a serem executadas, através do HSM (SOUZA & COELHO, 2003).

O sistema CAD pode ser aplicado em diversas áreas, como por exemplo na área mecânica em projeto de maquinas, processos e layouts, na área elétrica com esquemas e diagramas de conexão entre outras. Devido a demanda por itens de complexidade geométricas e que possuem ciclos de vida cada vez mais reduzidos, este recurso tornou-se fundamental para que haja agilidade no desenvolvimento de projetos (MARQUES et al., 2013).

2.5 High Speed Machine

Com a evolução das ferramentas e maquinas a utilização de altas velocidades de corte, denominada HSM (High Speed Machine), iniciou-se fortemente a partir dos anos de 1980 e atualmente é sinônimo de destaque para empresas que procuram estar alinhadas com alta velocidade de produção e qualidade (MENZEN, 2014).

Atualmente os tempos de fabricação estão ficando cada vez menores, com processos mais robustos, automatizados e mão de obra mais qualificada. Em meio a este cenário a fabricação de moldes e matrizes está se expandindo cada vez mais (BAUCO, 2003 p. 111-121 apud MENZEN, 2014 p. 11).

2.5.1 Fresamento HSM

Polli (2005) p. 33 apud Menzen (2014) p.14, ressalta que o prazo para introdução de produtos no mercado com menores ciclos de vida e muitas variáveis tem feito as empresas procurarem novos processos para continuarem competitivas. Nesse contexto o HSM surge para melhorar a produtividade e qualidade dos seus produtos, reduzindo a quantidade de operações na fabricação de moldes e matrizes e produzindo acabamentos muito próximos da precisão desejada (FALLBÖHMER et al.2000 p. 104-115 apud MENZEN, 2014 p. 14).

Segundo Heleno & Schützer (2003) p. 49-56 apud Menzen (2014) p. 15, o HSM possibilitou diminuir o tempo de finalização da peça, pois utiliza-se ferramentas pequenas, mais precisas, que se encontram mais perto da geometria final da peça. Em publicações técnicas este processo vem sendo citado com muitas vantagens e é importante ressaltar altas taxas de remoção de material atrelado com uma melhor dissipação de calor, de menor vibração mecânica tendo uma melhor qualidade superficial na peça. Porem em contrapartida existe um maior desgaste da ferramenta, custo elevado com as maquinas e alto custo de manutenção, e custo mais elevado de peças das maquinas. (RODRIGUES, 2005 p. 10 apud MENZEN, 2014 p. 16).

2.6 Fresamento trocoidal

O fresamento trocoidal é definido pela Sandvik (2018), como um fresamento que simultaneamente realiza movimentos circulares e de avanço, e Bonetti (2008) ressalta que sua principal característica é que a ferramenta permanece muito mais tempo em contato com a peça durante o corte, o que proporciona melhores condições, reduzindo as vibrações e a força de corte.

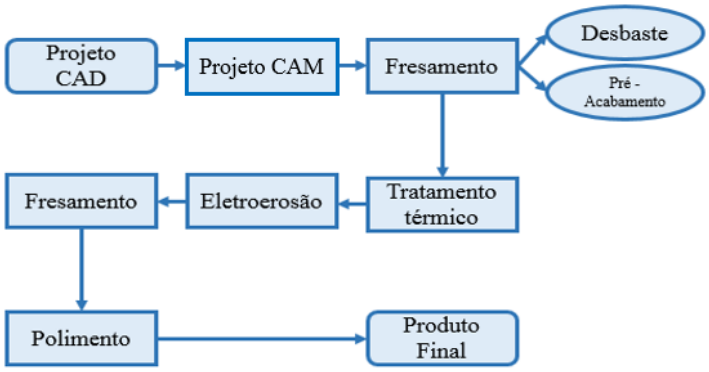
Os parâmetros comumente utilizados neste processo, sugerem o passo radial (w) baixo, profundidade de corte radial (Ae) baixo, porém, profundidade axial de corte (Ap) alta. Estes parâmetros garantem benefícios para o processo, pois ao permitir uma profundidade axial de corte alta, torna-se possível remover uma taxa maior de material em menor tempo. Outra importante vantagem é o aumento da vida útil da ferramenta devido a maior dissipação de calor e, também a qualidade no acabamento superficial (POLISHETTY et al., 2014) (SANDVIK, 2018).

2.7 Estratégias de usinagem

De modo geral, esta pesquisa aborda o processo de fabricação de moldes e matrizes e de como as técnicas do CAD/CAM aliadas ao High Speed Machine podem influenciar positivamente, melhorando os tempos de processos e principalmente na qualidade da superfície usinada.

Comumente, a produção de moldes e matrizes, principalmente as que contém geometria de alta complexidade, requerem um longo processamento e atividades extras como o polimento para que o material adquira a qualidade requisitada por sua aplicação (MONARO, 2011).

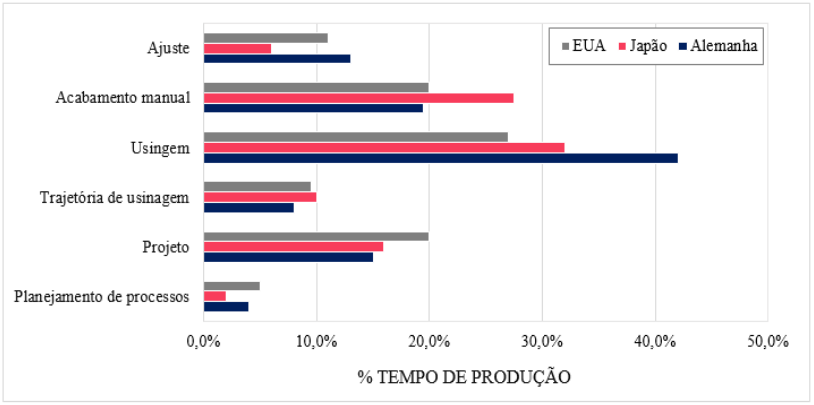
Segundo Bauco (2003) p. 111-124 apud Monaro (2011) p. 27, há uma lógica de processamento já empregada na produção de moldes e matrizes, que pode ser visualizada na Figura 1, porém algumas destas etapas são problemáticas, como o processo de acabamento por eletroerosão, que pode demandar nova etapa de fresamento para eliminar as falhas que o mesmo deixa. É possível, portanto, concluir que há espaço para a otimização de processos, eliminando etapas desnecessárias e ainda assim atingir o objetivo de qualidade na superfície.



Fonte: Adaptado de Bauco, 1998 p.111-124 apud Monaro, 2011 p. 27.

Figura 1 – Fabricação de molde e matrizes - Método tradicional

Conforme Figura 2 abaixo, é possível concluir que as etapas que demandam maior tempo na fabricação de moldes e matrizes é o próprio processo de usinagem, ou seja, o processo de fresamento, e o acabamento manual que denomina-se polimento como visto na Figura 1. Entretanto, é exequível a aplicação de estratégias para que este setor tenha maior eficiência, ganhando em produtividade e qualidade.



Fonte: Adaptado de Altan,1998 p. 309-332 apud Menzen, 2014 p.15.

Figura 2 – Tempos de fabricação de moldes e matrizes

Como já identificado na Figura 2, as operações de desbaste e semi acabamento que compõe o etapa fresamento são responsáveis pelo maior tempo despendido no fluxo de fabricação de moldes e matrizes, portanto, Bonetti (2008), reforça a importância da etapa de desbaste, pois é a etapa na qual concentra-se a maior taxa de remoção de material, e por isso torna-se crucial ter eficiência para que o tempo total de fabricação ganhe em competitividade. Segundo Bonetti (2008), as principais trajetórias utilizadas para o processo de desbaste são o contorno paralelo, zigue-zague, mergulho, por camada e o trocoidal.

O experimento em questão adotou os parâmetros tradicionais do fresamento trocoidal, a saber, profundidade de corte radial (Ae) baixo e profundidade axial de corte (Ap) alto, combinado à um outro método mais convencional que é o desbaste por camada, visando o ganho de tempo e performance nesta etapa do processo. Porém para que a ferramenta permanecesse durante mais tempo em contato com a peça, e assim pudesse remover uma taxa maior de material. O movimento típico desta técnica (trocoide) não foi aplicado.

De acordo com a Sandvik (1999) apud Costa (2003) p.3, o HSM tem sido um artifício empregado no setor de moldes e matrizes nas operações de acabamento, pois como as velocidades de corte são altíssimas nesta técnica e também por ser sua característica a baixa remoção de material, em comparação aos métodos tradicionais, a mesma torna-se inviável em operações de desbaste.

Contudo, ao utilizar o HSM na fase de acabamento, é possível obter resultados satisfatórios de qualidade, e portanto, com uma única estratégia eliminar 3 etapas do modelo tradicional de fabricação, a saber, tratamento térmico, eletroerosão e polimento, otimizando este fluxo (Dewes & Aspinwall, 1997 p. 1-17 apud Costa, 2003 p. 25).

Seguindo, portanto esta literatura de que o HSM pode ser diferencial no acabamento de superfícies, o mesmo foi adotado nesta pesquisa como a estratégia de finalização da máscara do homem de ferro, que no caso será o modelo de representação de um molde/matriz.

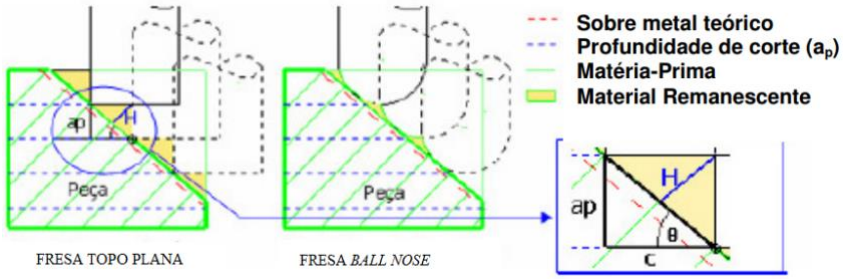
O guia de aplicação para fabricação de molde e matrizes da Sandvik (2018) destaca as fresas necessárias para a usinagem deste ferramental conforme a seguinte disposição:

a) Desbaste: Fresas com pastilhas redondas, fresas de topo com raios de canto grandes;

b) Semi acabamento: cortadores de inserção redondos, cortadores de toróides, fresas de topo esféricas;

c) Acabamento: Cortadores de inserção redondos (onde possível), fresas toroidais, fresas de topo esféricas (principalmente).

Conforme indicação acima, as fresas recomendadas para o fresamento de moldes e matrizes são as que possuem geometria arredondada. Bonetti (2008), também assinala para as mesmas ferramentas, evidenciando como as fresas *¨ball nose"* apresentam menor incidência de sobre metal quando comparadas às fresas de topo planas, ver Figura 3. Conforme revisão literária, este tipo de ferramenta foi utilizada neste projeto, nas operações de semi acabamento e acabamento, já para a operação de desbaste, também de acordo com indicação da Sandvik (2018) e Costa (2003), foi utilizado a fresa de topo toroidal.



Fonte: Adaptado de Souza, A. F, 2004 p. 171 apud Bonetti (2008) p. 37.

Figura 3 – Formação do sobremetal

3. Metodologia

O presente experimento foi realizado no Laboratório de usinagem das Faculdades Integradas Einstein de Limeira, e seu objetivo foi validar se as estratégias citadas, podem contribuir para a otimização do processo de manufatura de moldes e matrizes agregando em qualidade e redução de tempo de processamento.

O centro de usinagem utilizado é o Romi D600, que possui faixa de velocidade de 10 a 10.000 rpm, tendo como sistema de controle numérico o sistema Siemens 828D. O material do corpo

de prova utilizado é o Alumínio 7475, possuindo um dimensionamento de 157 x 236 x 130 mm. Foi utilizado dois tipos de fresas, a Toroidal para o desbaste do *blank* e duas fresas *Ball nose* para semi acabamento e acabamento, fez-se necessário também, para a fase de acabamento o uso de um fresa com menor diâmetro para atender à complexidade geométrica da peça e ter acesso às regiões com diâmetros inferiores à 3 mm, a Tabela 1 apresenta as informações das 3 ferramentas utilizadas no processo. Estas fresas foram projetadas pela coordenação de Engenharia mecânica das Faculdades Integradas Einstein de Limeira e desenvolvida em um fabricante externo.

Ferramenta 01	***Ferramenta 02***	***Ferramenta 03***
Toroidal	***Ball nose***	***Ball nose***
Ø 20 mm	Ø 8 mm	Ø 3 mm
Metal Duro	Metal Duro	Metal Duro
3 cortes	2 corte	2 cortes

Fonte: Os autores

Tabela 1 - Ferramentas utilizadas

Os softwares utilizados para projetar a peça e desennvolver as estratégias de corte foram o CAD/CAM e o Inventor HSM Ultimate. As estratégias e parâmetros de corte escolhidos para cada fase (Desbaste, semi acabamento e acabamento) estão dispostas na Tabela 2.

Estratégia 1	**Estratégia 2**	**Estratégia 3**
Desbaste	***Semi Acabamento e Acabamento***	***Acabamento dos raios inferiores a Ø 4 mm***
Comando Adaptive 2 - CAM	Comando Scaloop 1 - CAM	Comando Pencil - CAM
Fresa Toroidal Ø 20 mm	Fresa Ball Nose Ø 8 mm	Fresa Ball Nose Ø 3 mm
Trajetória Trocoidal	High Speed Machine	Trajetória Paralela
Sentido Concordante	Sentido Discordante / Concordante	Sentido Concordante
Vc = 314,0 m/s²	Vc = 226,0 m/s²	Vc = 85 m/s²
n = 5.000 RPM	n = 9.000 RPM	n = 9.000 RPM
Ap = 5,0 mm	Ap = 0,3 mm	Ap = 0,02 mm
Ae = 2,0 mm	Ae = 0,3 mm	Ae = 0, 05 mm
F = 1.000 mm/min	F = 3.600 mm/min	F = 3.600 mm/min
Fz = 0,2	Fz = 0,2	Fz = 0,2

Fonte: Os autores

Tabela 2 - Estratégias de usinagem

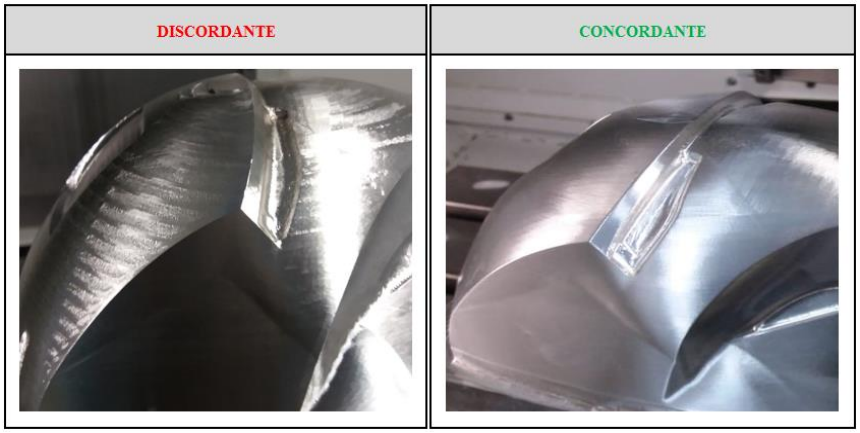
A estratégia 2 contou com dois sentidos de corte, inicialmente o discordante e após o concordante, cuja finalidade foi verificar/comprovar as definições da literatura, que enfatizam o sentido concordante como melhor opção

Adotou-se o passo lateral de 0,2 mm, sendo igual ao avanço por faca com objetivo de melhorar o acabamento da superfície criando uma "malha" perfeita através destes dois parâmetros.

Para mensurar a qualidade superficial da peça, foi utilizado o rugosímetro Medtec modelo SRT-6100. Dois pontos de contato foram escolhidos, o queixo e a lateral da peça os quais podem ser vistos na Figura 6. A escolha destes pontos deu-se devido a geometria da Máscara do homem de ferro que possui muitas regiões arredondadas, o que dificulta a estabilidade do instrumento, e estes dois pontos foram os que apresentaram melhor estabilidade tornando a medição mais assertiva. A posição da fresa em cada ponto também foi um fator para que as medições ocorressem nestes locais.

4. Resultados e Conclusões

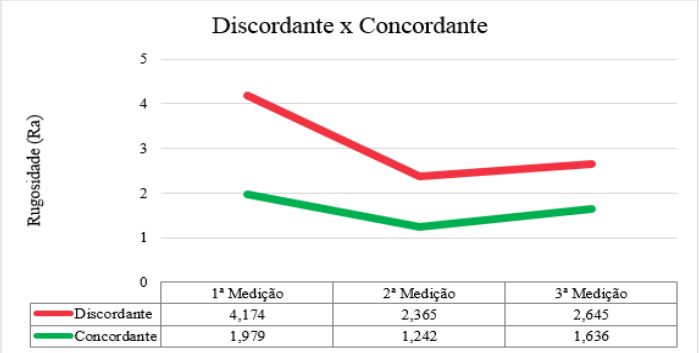
A título de comparação, observou-se que o sentido discordante, comprovando a literatura, apresenta resultados inferiores no acabamento da superfície em relação ao concordante. Constatou-se que o uso do sentido discordante é inviável, pois a diferença no acabamento da peça entre os dois sentidos é perceptível à olho nu, e podem ser comprovadas na Figura 4.



Fonte: Os autores

Figura 4 – Diferença entre o acabamento no sentido discordante e concordante

No discordante, é possível visualizar também, as marcas/ ranhuras deixadas pelo processo de corte e que comprometeram o acabamento da superfície. Contudo, para mensurar a rugosidade da peça em cada processamento e comprovar numericamente a Figura 4, foram realizadas 3 medições com o rugosímetro, tendo o queixo (Ponto 1 – Figura 6) do Homem de ferro como região de contato do aparelho. Os resultados comprovam a redução da rugosidade após a adoção do sentido concordante, conforme Figura 5.



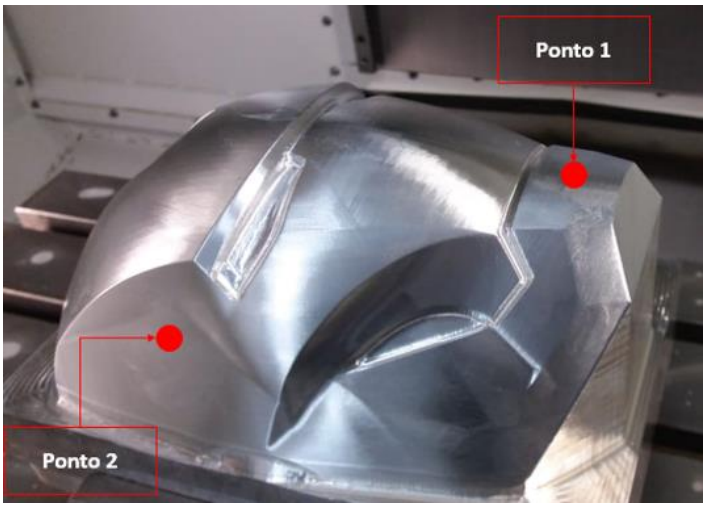
	1ª Medição	2ª Medição	3ª Medição
Discordante	4,174	2,365	2,645
Concordante	1,979	1,242	1,636

Fonte: Os autores

Figura 5 - Rugosidade discordante x concordante

A primeira medição do sentido discordante apresentou uma rugosidade muito maior que os outros resultados (4,174 Ra), mas justifica-se pela ponta do aparelho possivelmente ter tocado uma destas ranhuras, visíveis na Figura 4.

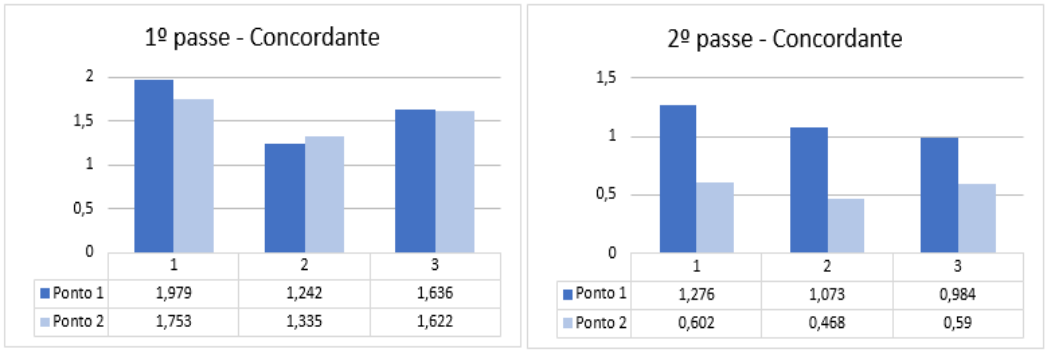
Após esta análise comparativa entre o sentido discordante e concordante, foi utilizado outra métrica para validar o que foi pré-estabelecido nas estratégias de usinagem, cujo objetivo era adquirir qualidade superficial através da técnica High Speed Machine que possibilitasse excluir 3 etapas do processo de fabricação tradicional de moldes e matrizes (Tratamento térmico, eletroerosão e polimento), e assim enxugar este fluxo. Portanto, em seguida ao processo no sentido discordante, foi realizado duas passadas no sentido concordante, utilizando os mesmos parâmetros, porém aplicando a técnica High Speed Machine, e ao final de cada passe, três medições com o rugosímetro em dois pontos distintos da peça foram coletados, ver Figura 6.



Fonte: Os autores.

Figura 6 - Pontos de medição da rugosidade

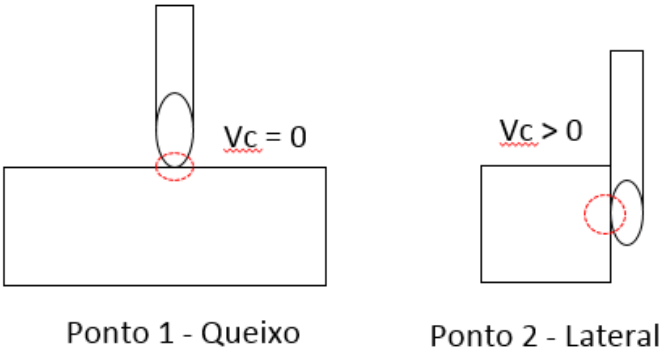
O segundo passe no sentido concordante deu-se, com o objetivo de melhorar ainda mais o acabamento, pois o primeiro passe deu-se na superfície ainda pouco uniforme devido o sentido discordante. Os resultados de rugosidade entre o primeiro passe e o segundo podem ser comparados na Figura 7, que mostra uma evolução no acabamento da superfície após o segundo passe.



Fonte: Os autores.

Figura 7 – Evolução do acabamento

O ponto 2, a lateral da máscara, apresentou uma redução bem significativa na rugosidade após o segundo passe e, portanto, comprovou que a técnica High Speed Machine é eficiente na aplicação de acabamento superficial. O ponto 1, o queixo, apresentou uma certa melhoria, entretanto quando comparada à lateral, essa melhoria torna-se não muito significativa. A figura 8, apresenta o porquê deste fato, pois no ponto 1 a ferramenta praticamente escorrega sobre a peça, pois o ponto zero da mesma é o que toca a peça, sendo assim a velocidade de corte nesta região é nula, o que consequentemente prejudica o acabamento no local. Já no ponto 2 a aresta cortante penetra normalmente a lateral da peça, tendo uma velocidade de corte maior que zero, o que justifica a diferença nos valores obtidos com o rugosímetro nestes dois pontos.



Fonte: Os autores

Figura 8 - Contato da ferramenta nos pontos 1 e 2

Como o fresamento foi realizado em uma máquina 3 eixos, não há possibilidade de inclinação da ferramenta para evitar que haja estes pontos em que o contato entre a fresa e a peça são nulos. Portanto, se a metodologia empregada neste experimento tivesse como centro de usinagem uma fresa de 5 eixos, certamente os resultados de rugosidade seriam mais próximos ao obtido no ponto 2 (Lateral) de forma uniforme em toda a peça.

Outro fator que contribuiu na qualidade superficial desta operação, foram os parâmetros estabelecido que geraram 0,3 mm de sobremetal da etapa de desbaste para o semi acabamento, tanto no sentido radial como no axial, e a utilização do avanço por faca (Fz) igual ao passo lateral (*steep over*), que permitiu a geração de uma "malha", como citado anteriormente, sobre a superfície.

Conclui-se, portanto, que este trabalho alcançou os objetivos de acabamento, já que a média total entre os dois pontos de medição após o segundo passe no sentido concordante foi de 0,83 Ra, e a média na lateral da peça (Ponto 2) foi de 0,55 Ra, sendo estes valores considerados pelos autores Diniz et al. (2010) de baixa rugosidade, assemelhando-se ao processo de retificação. Também é possível destacar que a metodologia empregada é capaz de substituir as etapas de tratamento térmico, eletroerosão e polimento que compõe o processo tradicional de moldes e matrizes, e portanto pode tornar este processo mais enxuto.

Futuros trabalhos podem comparar as diferentes estratégias que são sugeridas pelo software CAD/CAM no momento do desenvolvimento do projeto, para verificar quais apresentam melhor desempenho no tempo total de usinagem.

5. Referências

ABAL, Associação Brasileira do alumínio. *Vantagens do alumínio.*<Disponível em: http://abal.org.br/>. Acesso em: 29 de julho de 2018.

ABRÃO, Alexandre Mendes. MACHADO, Álisson Rocha. COELHO, Reginaldo Teixeira. SLVA, Márcio Bacci da. *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Edgard Blucher. 1º Edição, 2009.

BARBOSA, João Paulo. *Materiais para ferramentas de corte*. Instituto Federal Espírito Santo - Campus São Mateus – IFES. São Mateus – SP, 2014.

BONETTI, Ivandro. *Contribuições para desenvolver o conhecimento das operações de desbaste de moldes e matrizes com ênfase em fresamento no sentido axial*. Sociedade Educacional de Santa Catarina – SOCIESC. Joinville – SC, 2008.

CIMM, Centro de Informação Metal Mecânica. *Métodos de fresamento*. <Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4862-metodos-de-fresamento#.W1srczpKjIU>. Acesso em: 27 de julho de 2018.

CORRER, Ivan. ADAME, Welinkem Daniel. *Avaliação da confiabilidade do processo no uso de CBN para torneamento de ferro fundido cinzento, comparado à ferramenta de cerâmica.* Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, 2014.

COSTA, Alex Ribeiro. *Otimização do Processo de Fresamento de Cavidades com Fresas de Insertos Intercambiáveis.* Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas – SP, 2003.

DINIZ, Anselmo Eduardo. MARCONDES, Francisco Carlos. COPPINI, Nivaldo Lemos. *Tecnologia da usinagem dos materiais.* Editora Artliber. 7ª Edição, 2010.

FERRARESI, Dino. *Fundamentos da usinagem dos materiais*. Editora Edgard Blucher. 16º Edição, 2013.

JUNIOR, Aldo Braghini. *Investigação do desgaste de ferramentas de PCBN e metal duro no fresamento de topo de aços endurecidos.* Universidade de São Paulo – USP. São Carlos – SP, 1998.

MARQUES, Ângela Selau. WURZEL, Carlos. DUTRA, Alexandre. SCHAEFFER, Lírio. *A importância dos sistemas CAE/CAD/CAM na fabricação de matrizes para o forjamento a quente de um flange.* Conferência Internacional de Forjamento – Brasil. Porto Alegre – RS, 2013.

MENZEN, William. *Análise da qualidade superficial no fresamento com aplicação de mínimas quantidades de fluido lubrificante.* Universidade de Caxias do Sul – UCS. Caxias do Sul – RS, 2014.

MONARO, Renato Luis Garrido. *Desenvolvimento de um índice para avaliação dinâmica de estratégias de usinagem voltadas para a manufatura de superfícies complexas*. Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP. Santa Barbara d'Oeste – SP, 2011.

POLISHETTY, Ashwin. GOLDBERG, Moshe. LITTLEFAIR, Guy. PUTTARAJU, Mahesh. PATIL, Prasad. KALRA, Akshay. *A preliminary assessment of machinability of titanium alloy ti 6al 4v during thin wall machining using trochoidal milling*. Global Congress on Manufacturing and Management – GCMM. Elsevier, 2014.

SOUZA, Adriano Fagali de. COELHO, Reginaldo Teixeira. *Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril.* Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP, 2003.

XAVIER, Fábio Antônio. *Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal duro, cerâmica e CBN*. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis – SC, 2003.