

FERNANDO SABINO FONTEQUE RIBEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA-FERRAMENTA PARA ESTUDO DE
FORMAÇÃO DE CAVACO EM CORTE ORTOGONAL**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” (UNESP), Unidade Bauru.

Supervisor: Prof. Dr. Luiz Eduardo de
Angelo Sanchez

PROGRAMA DE PÓS-DOCTORADO DA UNESP

Bauru

2026

RESUMO

A crescente demanda industrial exige cada vez mais eficiência nos processos de fabricação. A usinagem, em especial, concentra grandes dificuldades acerca da geração e gestão dos resíduos, uma vez que a formação de cavaco é a característica intrínseca desse processo. A interação entre ferramenta de corte e peça de trabalho promove intensa geração de calor, provindo das deformações obtidas na zona de deformação primária e das deformações e atrito ocorridas na zona de deformação secundária. O calor, por sua vez, é o grande responsável pelo desgaste e redução da vida da ferramenta de corte. O controle paliativo do calor na usinagem tradicionalmente é tratado com emprego de fluidos de corte, produzindo ainda mais resíduos e danos ocupacionais e ambientais. Visto que o fluido de corte é ineficiente em atuar nas regiões de deslizamento e principalmente nas regiões de aderência, modificações geométricas na superfície de saída da ferramenta de corte, como a texturização e o emprego de nanotubos de carbono, têm sido propostas. Tais alterações melhoram as condições de contato entre cavaco e ferramenta, permitindo a melhor aplicação de fluidos de corte ou até mesmo o corte a seco. Entretanto, a interação entre cavaco e ferramenta de corte modificadas ainda não é compreendida, haja vista que fenômenos como o corte derivativo tem sido relatado como problema atrelado a presença de microrranhuras na interface de contato. Desta forma, a realização de ensaios experimentais, como procedimentos de medição de forças e filmagens diretas durante a usinagem, faz-se necessária para uma melhor compreensão dos fenômenos de contato. Isto posto, o presente relatório tem como objetivo projetar e fabricar uma máquina-ferramenta específica para a realização de corte ortogonal. Como resultado, foi elaborada uma máquina-ferramenta com estrutura modular e relativamente compacta, facilitando futuras alterações e criações de novos *setups* de usinagem. Ademais, seu desenvolvimento contou com a simulação de esforços em ambiente virtual, sendo assim possível determinar sua viabilidade para aplicações de pesquisa.

Palavras chaves: Corte ortogonal, Formação de cavaco, Máquina-ferramenta.

1. INTRODUÇÃO	4
2. OBJETIVOS.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	16
4. RESULTADOS	18
5. DISCUSSÃO.....	28
6. ORIENTAÇÕES	29
7. CONCLUSÕES.....	29
8. REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial cada vez mais exige alta produtividade nos processos de fabricação. Para usinagem, isso se reflete no uso de maiores velocidades de corte. Consequentemente, os aumentos das velocidades de corte causam aumento na temperatura durante a formação do cavaco, tornando-se necessária uma melhor compreensão de como são formados os cavacos. Grandes avanços nos processos de usinagem são devidos ao aperfeiçoamento da geometria das ferramentas de corte, como perfil da aresta de corte, quebra-cavacos cada vez mais eficientes, novos e mais eficazes materiais para ferramentas com a possibilidade de usinar várias ligas metálicas (Machado et al., 2009). A formação do cavaco ocorre periodicamente em altíssimas velocidades de deformação e cisalhamento (Ferraresi, 1970), sobre a superfície de saída da ferramenta.

A vida da ferramenta está ligada aos processos ocorrentes na interface cavaco-ferramenta, como por exemplo o calor gerado durante o corte (Machado et al., 2009). Na área de contato entre cavaco e ferramenta, há zonas distintas de contato. Segundo Machado et al. (2009), foram definidas as zonas de aderência (*sticking*) e escorregamento (*sliding*), como pode ser visto na Figura 1. Tais regiões são diretamente responsáveis pela eficácia dos meios de lubrificação, sendo em grande parte dos casos, de difícil acesso ao lubrificante.

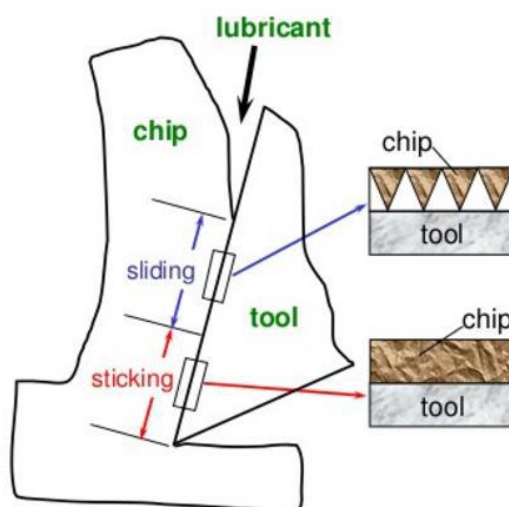


Figura 1 - Zonas de aderência e escorregamento (adaptado de Koshy e Tovey, 2011).

É assumido que tensão normal é máxima na extremidade da aresta de corte e decresce até o momento em que o cavaco perde o contato com a ferramenta. A tensão de cisalhamento é constante na zona de aderência, atingindo o limite de resistência ao cisalhamento do material, sendo que ela decresce na zona de escorregamento até o ponto onde o cavaco perde contato com a ferramenta (Machado et al., 2009). Na zona de aderência, o contato é total entre o cavaco e a ferramenta, já na zona de deslizamento, o contato dá-se pelos picos das superfícies (Diniz, et al., 2006), como também é mostrado na Figura 1.

As altas tensões normais na zona de aderência são um dos responsáveis pelos mecanismos de desgaste nas ferramentas de corte, como a formação de arestas postiças, desgaste por cratera e elevadas temperaturas de corte (Machado et al., 2009).

A fim de minimizar os impactos negativos ocorrentes na interface cavaco-ferramenta, são aplicados os fluidos de corte. Uma das primeiras experiências relatadas foi em 1894, onde F. W. Taylor aplicou grande quantidade de água na região peça-ferramenta-cavaco, conseguindo aumentar em 33% a velocidade de corte no processo (Ferraresi, 1970). Sendo amplamente pesquisados e aplicados desde então, os fluídos de corte estão fortemente presentes nos processos de usinagem.

Agindo como lubrificante, o fluido de corte age para reduzir o atrito na interface cavaco-ferramenta sendo sua eficiência depende da capacidade de penetrar nas áreas de contato no curto período de tempo disponível e formar um filme de lubrificante, já como refrigerante, o fluido de corte proporciona maior transferência de calor da região de corte, reduzindo assim a temperatura da ferramenta e da peça, ainda que a temperatura na área de contato cavaco-ferramenta não seja significativamente alterada (Machado et al., 2009). É de conhecimento de que as tensões normais elevadas na vizinhança da aresta de corte impedem a penetração do lubrificante na interface cavaco-ferramenta e que a infiltração do lubrificante ocorre através de mecanismos de ação capilar, sendo este restringido pelo fluxo de cavacos que tende a remover o fluido do local (Koshy e Tovey, 2011).

Devido à dificuldade de atingir diretamente a interface cavaco-ferramenta, o método de resfriamento mais comum na usinagem é ainda a inundação da

área de corte com grandes quantidades de fluido de corte, porém considera-se que esse é um método não produtivo, uma vez que a maior parte do fluido não penetra na zona de corte eficazmente nem tem qualquer efeito sobre a temperatura (Dahlman, 2002). Apesar dos benefícios que o uso do fluido traz aos processos de usinagem, como aumento da vida da ferramenta, redução das forças de usinagem, melhoria do acabamento superficial, facilidade de remoção dos cavacos da região de corte, entre outros, o grande volume de fluidos de corte acarreta custos associados à sua aquisição, armazenamento, preparo, controle na aplicação, além dos impactos ambientais provenientes do descarte inadequado do mesmo (Machado et al., 2009).

Tendo em vista os pontos citados, buscam-se maneiras de minimizar o uso do fluido de corte, ou até mesmo não o utilizar por meio de redução de atrito na interface cavaco-ferramenta. Novas técnicas, materiais e ferramentas demonstraram que a usinagem a seco é preferível ao uso de um fluido de corte, além de métodos de microrrefrigeração com misturas de óleo/ar e crioresfriamento também foram introduzidas como alternativa a lubrificação por inundação (Dahlman, 2002). Uma alternativa seria a usinagem assistida por jatos de alta pressão, HPC (*high pressure cooling*), como descreve Dahlman (2002). Neste trabalho, Dahlman apresenta uma vertente crescente na concepção de refrigeração, no qual se faz uso de baixas vazões de fluido e altas pressões. Em seu trabalho, são investigadas como a pressão e a vazão são parâmetros importantes ao processo de refrigeração com alta pressão, pressões essas que são variadas de 45 MPa até 270 MPa e vazões que variam de 1,5 l/min até 13,5 l/min. Apesar dos resultados positivos, como a redução de até 50 % da temperatura de corte no torneamento (Dahlman, 2002), há um grande custo de equipamentos englobado, tendo em vista de que são necessárias bombas de alta capacidade para atingir as pressões necessárias para a usinagem.

Seja em lubrificação por inundação, MQL (mínima quantidade de lubrificante) ou altas pressões, o uso do lubrificante ou fluido refrigerante correto é essencial para um bom desempenho do processo de usinagem. Um novo e recente material que apresenta diversas e promissoras aplicações, inclusive como lubrificante é o grafeno. Conforme aponta Berman et al. (2013), as propriedades tribológicas do grafeno são relativamente inexploradas e os poucos estudos são centrados principalmente nos aspectos de nano e microescala,

sendo que muito pouca informação está disponível sobre as propriedades tribológicas macro escala do grafeno. Em seu trabalho, Berman et al. (2013), criaram um revestimento de fina camada de grafeno por meio de solução com álcool e grafeno para a redução de atrito e desgaste em contatos deslizantes de aço. A concentração grafeno foi de 1 mg / L de álcool, na qual foram espalhadas por uma superfície altamente polida (R_q 20 nm) e evaporada em ambiente de nitrogênio seco para evitar oxidação do grafeno, sendo depositadas de 2 a 3 camadas. Para um ensaio em tribômetro, constatou-se uma redução do coeficiente de atrito. No contato entre aço x aço, obteve-se um coeficiente de atrito de 0,9. Para o contato entre aço com camada de solução processada de grafeno, SPG, obteve-se coeficiente de atrito de 0,2. No contato com fornecimento de SPG em gotas, obteve-se um coeficiente de 0,15, consequentemente reduzindo o desgaste na esfera. Segundo Berman et al. (2013), o grafeno constitui uma nova classe de lubrificante para superfícies de aço e possivelmente outras superfícies metálicas, sendo resistente à corrosão, menos tóxico e fácil de aplicar.

Contudo, além dos avanços nas maneiras de como aplicar os lubrificantes, bem como o emprego de novas classes de lubrificantes, há também métodos que visam diminuir a área de contato entre cavaco-ferramenta e que permitam maior eficácia dos lubrificantes. Novas e mais recentes pesquisas têm apontado que o uso de superfícies tribológicas nas ferramentas de corte, especialmente na superfície de saída, podem reduzir o atrito na interface cavaco-ferramenta, promovendo redução das forças de usinagem, diminuindo os mecanismos de adesão e desgaste da ferramenta (Koshy e Tovey, 2011; Enomoto e Sugihara, 2010; Kawasegi et al., 2009; Lei et al., 2009; Jiang et al., 2007).

Na usinagem de alumínio A5052, Enomoto e Sugihara (2010) criaram texturas em ferramentas de carboneto de tungstênio. Por intermédio de usinagem com laser femtosegundo, os autores fabricaram nano/micro ranhuras nas ferramentas previamente polidas (com rugosidade final de $0,04 \mu\text{m}$), como pode ser vista na Figura 2.

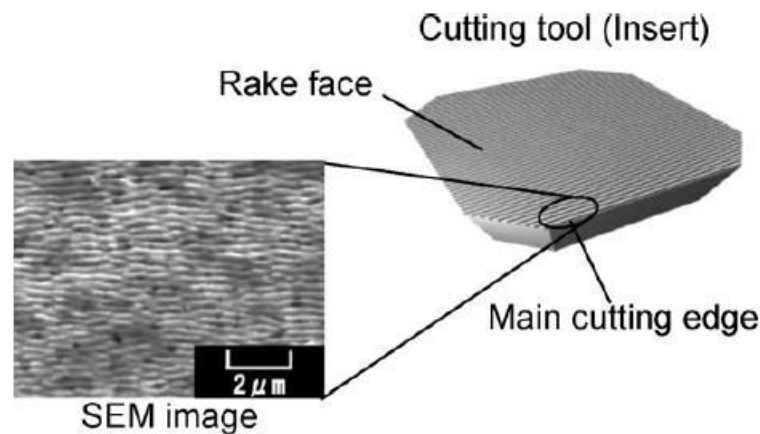


Figura 2- Ferramenta de corte texturizada. Adaptado de Enomoto e Sugihara (2010)

As microrranhuras, com dimensões de 150 μm x 150 μm e 0,8 μm de profundidade, espaçadas a 80 μm cada, apresentaram entupimento por resíduos de cavaco durante o fresamento com refrigeração comum. Já as nano-ranhuras regulares com 100 a 150 nm de profundidade e 700 nm de distância na face de saída da ferramenta com uma camada de revestimento de DLC (*diamond like carbon*), obtiveram os melhores resultados. Também foram comparadas como o sentido das ranhuras afetava o desempenho do corte. Foram comparadas ranhuras paralelas, ortogonais e em sentido cruzado em relação a aresta de corte. As ranhuras com melhor desempenho foram as ferramentas com nano ranhuras paralelas a aresta de corte, sendo que os cavacos entram em contato intermitentemente com a face de saída da ferramenta, evitando a aderência do cavaco e fornecendo fluido de corte a partir dos vales das ranhuras para a interface de cavaco-ferramenta, além disso, foram constatados menor adesão de material, menor coeficiente de atrito, maior ângulo de cisalhamento e que as superfícies com melhor desempenho não apresentaram arestas postiças de corte.

Outro experimento com o alumínio A5052, com torneamento, foi realizado por Kawasegi et al. (2009). Também utilizando o laser femtosegundo, fabricaram superfícies com microtexturas, com sulcos com 2,2 μm de largura e 1,3 μm de profundidade e superfícies nano-texturizadas de 150 nm de profundidade e 800 nm de largura com ondulações na profundidade de 1,5 μm. Semelhantemente ao experimento de Enomoto e Sugihara (2010), as texturas foram fabricadas de

modo perpendicular e paralelo ao fluxo de cavaco e em ambos os sentidos (cruzadas), como demonstrado na Figura 3.

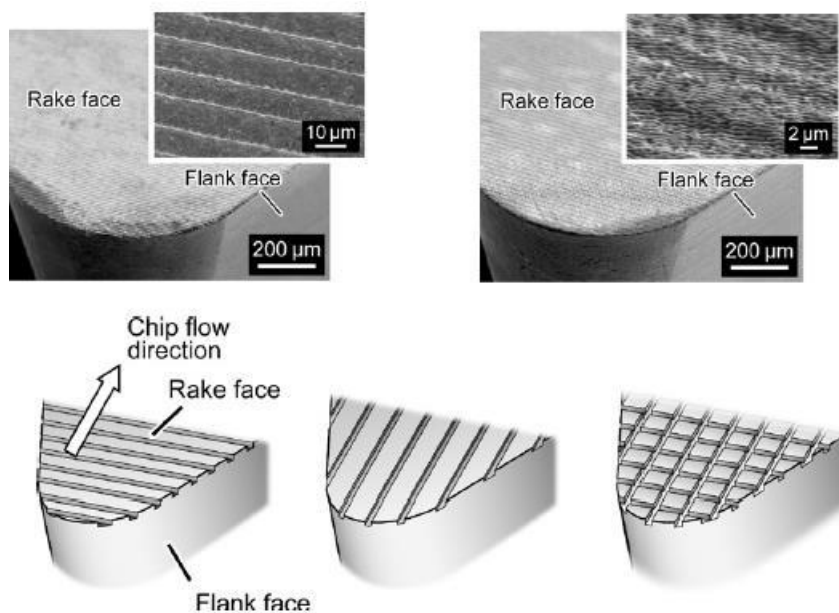


Figura 3 - Insertos texturizados. Adaptado de Kawasegi et al. (2009).

Como nos resultados de Enomoto e Sugihara (2010), ocorreram entupimentos nas microrranhuras, sendo que as nano-texturas obtiveram os melhores resultados. Com a aplicação de MQL, foram obtidas reduções nas forças de usinagem com as nano-ranhuras em sentido perpendicular ao fluxo de cavaco, assim como aumento no ângulo de cisalhamento, indicando diminuição no coeficiente de atrito na saída. Os autores também realizaram testes à seco, constatando que houve diminuição nas forças de corte com a aplicação de nano ranhuras de sentido perpendicular ao fluxo de cavaco em relação as ferramentas polidas, indicando que a redução nas forças também ocorre por conta da diminuição da área de contato. Outro parâmetro avaliado foi a velocidade de corte, indicando que em velocidades abaixo de 300 m/min ocorria aumento nas forças de corte e aumento no material de adesão.

No mesmo contexto da criação de superfícies com melhor desempenho tribológico, Lei et al. (2009), realizaram experimentos na usinagem do aço SAE 1045. Também com uso do laser femtosegundo, os autores criaram microfuros na superfície de saída de uma ferramenta de carboneto de tungstênio (Figura 4), a fim de que eles atuassem como microrreservatórios de fluido. O diâmetro de

cada furo é de cerca de 70 μm e 200 μm , sendo que a profundidade é estimada em algumas vezes o diâmetro do furo.

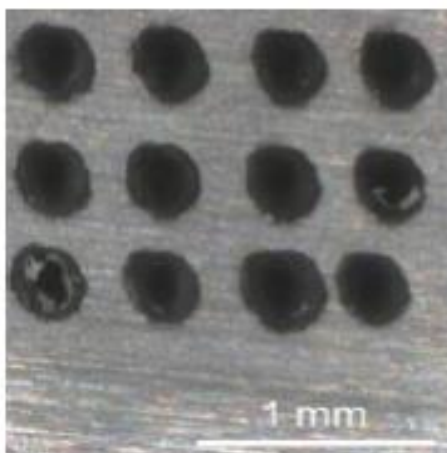


Figura 4-Microfuros usinados na superfície de saída da ferramenta. Adaptado de Lei et al. (2009).

Para os testes, foram aplicados fluido de corte emulsivo, óleo de corte e lubrificante em pó sólido de dissulfeto de tungstênio, comparando situações de lubrificação em abundância com aplicação de fluido diretamente nos microfuros por intermédio de uma seringa. As forças de corte apresentaram valores muito semelhantes na usinagem à seco e com lubrificação em abundância. O enchimento das micropoças com óleo ou lubrificante sólido mostraram resultados muito semelhante. Já para a comparação entre a lubrificação por micropoças e o resfriamento seco / abundante, ocorreu diminuição nas forças de corte, com uma redução de 16% no atrito, devido a uma redução na área de contato entre cavaco e ferramenta em 28%.

Em meio a vários tipos de texturização, Enomoto e Sugihara (2017) realizaram um teste comparativo afim de identificar quais as melhores configurações de textura e suas melhores aplicações. Os autores classificaram as texturas como “texturas abertas”, contemplando os padrões lineares, e como “texturas fechadas”, englobando os padrões e matrizes com pequenos furos. As ranhuras e furos foram usinadas em ferramentas de carboneto de tungstênio e aplicadas na usinagem de aço de médio teor de carbono (0,51-0,55%).

Segundo Enomoto e Sugihara (2017), os padrões em ziguezag tem pouca ou quase nenhuma influência sobre os resultados. Testes indicaram que a

ferramenta que teve melhores resultados foi a denominada DT-05, tendo o menor desgaste de cratera e as menores forças em corte lubrificado e à seco. Também se observou que ferramentas com área texturizada menor ou próximo de 20% obtiveram os piores resultados. Segundo Enomoto e Sugihara (2017), com uso do fluido de corte, os microfuros se comportam como depósitos de fluido e para condições secas, acabam se comportando como depósitos de resíduos.

Os autores também realizaram a comparação entre as texturas lineares (ranhuras de 5 μm de profundidade, 20 μm de largura e distância da aresta de corte de 100 μm de largura) com a textura com microfuros DT-05. Os experimentos mostram que as estruturas de microfuros e microrranhuras obtiveram resultados melhores ao se comparar com a ferramenta comum. Conforme cita Enomoto e Sugihara (2017), as microrranhuras facilitam a entrada do lubrificante, sendo melhor aplicáveis a lubrificação com quantidades corretas de fluido. Já as ferramentas com microfuros, são mais adequadas para a retenção de fluido, como no caso do lubrificante em pasta previamente inserido na peça de trabalho. Entretanto, para a condição seca, as microrranhuras criam depósitos de resíduos que podem atuar como microcortadores de cavaco (Ma et al., 2015), aumentando o atrito na interface cavaco-ferramenta.

Além dos padrões periódicos citados, como furos e ranhuras, podem ser observados outros padrões que tem uma característica isotrópica. Em sua pesquisa, Jiang et al. (2007) buscou desenvolver uma superfície biomimética para um melhor desempenho tribológico. A superfície estruturada tinha como foco se assemelhar a superfície de uma planta, a colocasia esculenta. A texturização da superfície se deu por pulverização eletrostática de CBN (nitreto de boro cúbico), controlando a dimensão das partículas, e por deposição de vapor químico de TiN (nitreto de titânio) em corpo de prova de carboneto de tungstênio com 6% de cobalto. A camada texturizada apresentou rugosidade de Ra de 2-3 μm .

Os autores classificaram essa camada como “camada dura”, que seria a camada responsável por suportar as altas cargas no processo. Além do citado, os autores criaram o que chamaram de “camada de lubrificante macia”, que foi realizada pela deposição de MoS_2 dispersos em PTFE e cura, com rugosidade final de $\text{Ra}=2 \mu\text{m}$. Foram realizados testes com tribômetro na configuração esfera em disco, utilizando aço SAE 52100 com dureza de 69 HRC para a esfera.

Foram comparadas a superfície proposta com um corpo de prova de carboneto de tungstênio comercial acrescido do revestimento de MoS₂-PTFE, indicando que o revestimento de camadas múltiplas tem um coeficiente de atrito relativamente menor (cerca de 0,17), em comparação com os revestimentos CBN-TiN (aproximadamente 0,32) e MoS₂-PTFE (em torno de 0,21) ao deslizar contras esferas de aço SAE 52100. Segundo Jiang et al., (2007) a área de deslizamento é lubrificada efetivamente pelos componentes lubrificantes de MoS₂ e PTFE continuamente liberados das bolsas na camada dura CBN-TiN, graças a morfologia superficial.

Outro método de texturização no qual se pode criar superfícies isotrópicas, segundo Koshy e Tovey (2011), é o processo da eletroerosão (*EDM – Electrical Discharge Machining*). Segundo Koshy e Tovey (2011), a natureza isotrópica das superfícies EDM é vantajosa, uma vez que torna o desempenho da textura independente da direção do fluxo de cavaco promovendo a entrada e retenção do fluido, sendo classificada como textura areal, ela apresentou uma rugosidade final de 12 µm Ra. Verificou-se experimentalmente a diminuição do ângulo de cisalhamento quando era aplicado o fluido, ao contrário do inserto comum, em que o ângulo de cisalhamento permanecia o mesmo. Em análise das forças de corte, ocorreram reduções na ordem de 30 % na força de avanço e 13% na força de corte. Altas velocidade: A eficácia da textura em reduzir a força de avanço diminui com o aumento da velocidade de corte e avanço (não há tempo para que o lubrificante penetre na zona de corte. Outro ponto importante analisado pelos autores é a distância de aplicação da textura em relação a aresta de corte. Ao aplicar a textura próximo a aresta, foi verificado que ela apresentava característica de arredondamento, acarretando assim no aumento das forças de corte.

Porém, conforme cita Sugihara et al. (2021), a aplicação de microrranhuras ou texturas em ferramentas de corte ainda é empírica, tendo em vista de que não existem trabalhos balizadores acerca do correto posicionamento das modificações superficiais. Além disso, pontos inviabilizadores acerca da texturização de ferramentas de corte têm sido observados, como o caso do corte derivativo. Duan et al. (2019) aponta que o corte derivativo é responsável pela inutilização das microrranhuras, uma vez que

o entupimento gerado pelo cavaco do corte derivativo preenche totalmente a textura, reestabelecendo a superfície de saída da ferramenta de corte.

Como apresentado, as microrranhuras podem ter funções promissoras frente aos processos de usinagem tradicionais, principalmente no que tange a possibilidade de aprimoramento da usinagem a seco. Ribeiro et al. (2024, 2025) comprovaram a viabilidade em remoção de calor da ferramenta de corte a seco pela implementação de ferramentas de corte texturizadas preenchidas com nanotubos de carbono (Figura 5). Dada a elevada condutividade dos nanotubos de carbono, os autores puderam observar reduções de até 50% na temperatura se comparadas as ferramentas convencionais no corte a seco. As microrranhuras foram projetas em ambiente virtual, através do software Comsol. Os autores compararam em ambiente de simulação diversas geometrias de microrranhuras, identificando que microrranhuras com 0,3 mm de largura e profundidades de 0,25 a 0,75 mm gerariam maior dissipação de calor da superfície de saída da ferramenta de corte.

Ribeiro et al. (2024, 2025) compararam experimentalmente em torneamento de aço SAE 1045 a seco e com fluido de corte, ferramentas com microfuros e microrranhuras provindas de outros autores as geometrias propostas, complementando as variáveis com ferramentas de corte texturizadas e preenchidas com nanotubos de carbono. As características lubrificantes e térmicas dos nanotubos de carbono permitiram que em dadas condições, as ferramentas com nanotubos de carbono apresentassem vida superior a ferramentas convencionais com fluidos de corte.

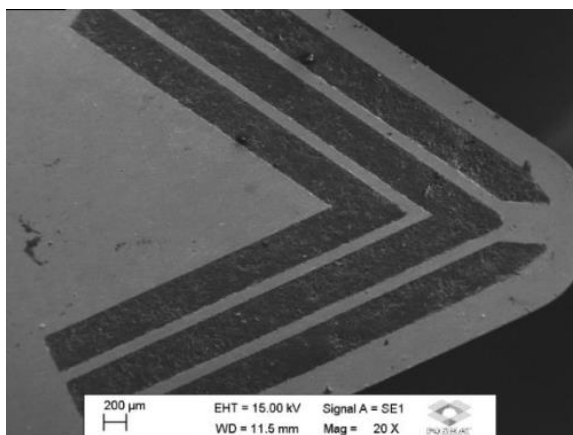


Figura 5 – Ferramenta de corte texturizada preenchida com nanotubos de carbono (RIBEIRO et al., 2024).

Visando identificar indícios mais concisos acerca da formação de cavaco em ferramentas com microrranhuras, bem como a sua relação com a presença de corte derivativo, Ribeiro (2024) realizou experimentos em corte ortogonal. Outrossim, a relação entre área de contato e forças de corte foi investigada, retomando o uso de ferramentas de contato restrito. Diversas citações sugerem que um dos mecanismos benéficos da texturização de ferramentas de corte é capacidade de redução da área de contato entre cavaco e ferramenta.

Para esta investigação, uma fresadora ferramentaeira foi configurada para permitir o corte ortogonal, sendo que o avanço da mesa coordenada permitiu uma velocidade de corte máxima de 1 m/min. Foram utilizadas duas configurações de ensaio, sendo a representada na Figura 6 a configuração para filmagem e a representada na Figura 7, a configuração para medição de forças.

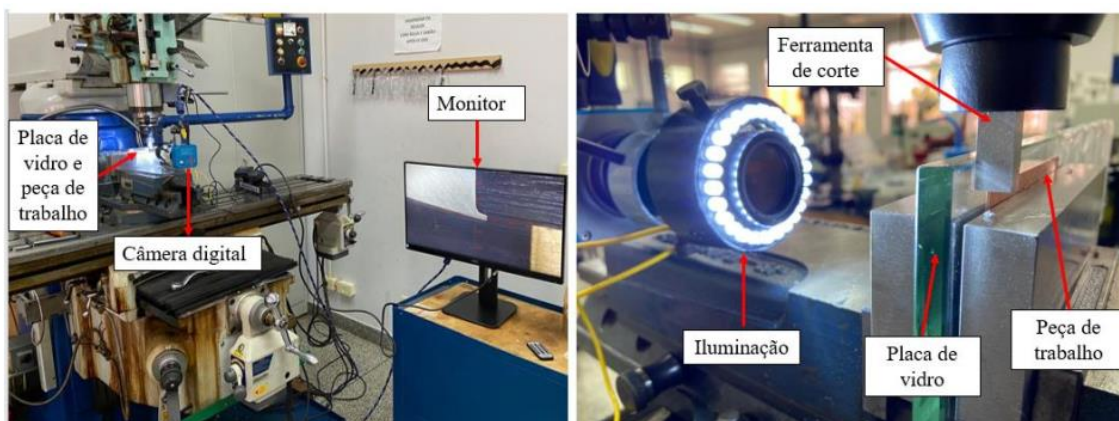


Figura 6 – Configuração para aquisição de imagens (Ribeiro, 2024).



Figura 7 – Configuração para aquisição de forças (Ribeiro, 2024).

Os resultados mostraram que a presença microrranhuras em diferentes posições afeta diretamente a formação do corte derivativo. Da mesma forma, a variação do comprimento de contato provido pelas ferramentas de contato restrito permite a redução das forças de corte. Isso posto, para que uma ferramenta com microrranhuras possa se comportar como ferramenta de contato restrito, é necessário minimizar ou abolir a presença do corte derivativo, governado diretamente pelo posicionamento da microrranhura.

No entanto, a aplicação de ferramentas de corte com microrranhuras carece de maior entendimento e compreensão acerca da formação de cavaco. São necessários maiores pontos de compreensão acerca da interação entre cavaco e ferramenta, e sobre o posicionamento das microrranhuras e as condições atreladas ao corte derivativo. Com essa maior compreensão, novas ferramentas de corte podem ser propostas, juntamente a aplicações mais eficientes de ferramentas de corte com microrranhuras preenchidas com material de elevada condutividade térmica.

2. OBJETIVOS

O presente projeto tem por objetivo desenvolver uma máquina-ferramenta dedicada a pesquisa em corte ortogonal. Para tanto, o objetivo específico é centrado no projeto e fabricação de uma máquina-ferramenta modular e relativamente compacta, de maneira a permitir futuros procedimentos como filmagem e aquisição de forças, sem que seja necessário a adaptação de máquinas-ferramentas convencionais.

Em andamento a pesquisa realizada no doutorado (Ribeiro, 2024), limitações quanto a profundidade de corte, velocidade de avanço e potência disponível na máquina-ferramenta aplicada, no caso uma fresadora, impediram testes em variadas condições de usinagem. Mesmo com tais limitações, os resultados foram promissores, justificando e motivando a sequência da pesquisa por meio da elaboração da máquina-ferramenta de corte ortogonal.

Em especial, a pesquisa recente avaliou a formação de cavaco em ferramentas de corte com microrranhuras, haja vista que o fenômeno de formação de cavaco com a aplicação de ferramentas de corte com microrranhura ou texturizadas ainda não é compreendido. Aplicando o corte ortogonal a tais

ferramentas e comparando-as com ferramentas de contato restrito, foi possível observar a formação de cavaco frente a condições de alteração no comprimento de contato e a presença do corte derivativo. Em especial, o corte ortogonal permitiu identificar os mecanismos relacionados a presença do corte derivativo, que impedem a funcionalidade da ferramenta de corte com microrranhura.

Além do apresentado, a aplicação de ferramentas de corte com microrranhura permite avanços nos processos de usinagem a seco, principalmente com emprego de microrranhuras preenchidas com materiais de alta condutividade térmica. Tais resultados foram observados no trabalho de mestrado de Ribeiro (2019) com a aplicação de nanotubos de carbono. Foi demonstrado que ferramentas de corte com microrranhuras preenchidas com nanotubos de carbono podem reduzir a temperatura do corte a seco em até 50 %, permitindo que a vida da ferramenta de corte seja equivalente a ferramentas de corte utilizadas com fluido de corte, em condições particulares.

Diante do exposto, o presente trabalho visa atender o objetivo de projeto e fabricação de uma máquina-ferramenta dedicada a pesquisa em corte ortogonal, permitindo a continuidade da linha de pesquisa com ferramentas de corte texturizada e formação de cavaco.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A execução deste trabalho contou com atividades realizadas nos laboratórios Tecnologia da Usinagem, na UNESP campus Bauru, São Paulo, e no laboratório de Processos de Fabricação do Instituto Federal do Paraná, Campus Jacarezinho, Paraná. Inicialmente, o projeto conceitual foi elaborado a partir de elementos de máquinas e componentes disponíveis de projetos anteriores.

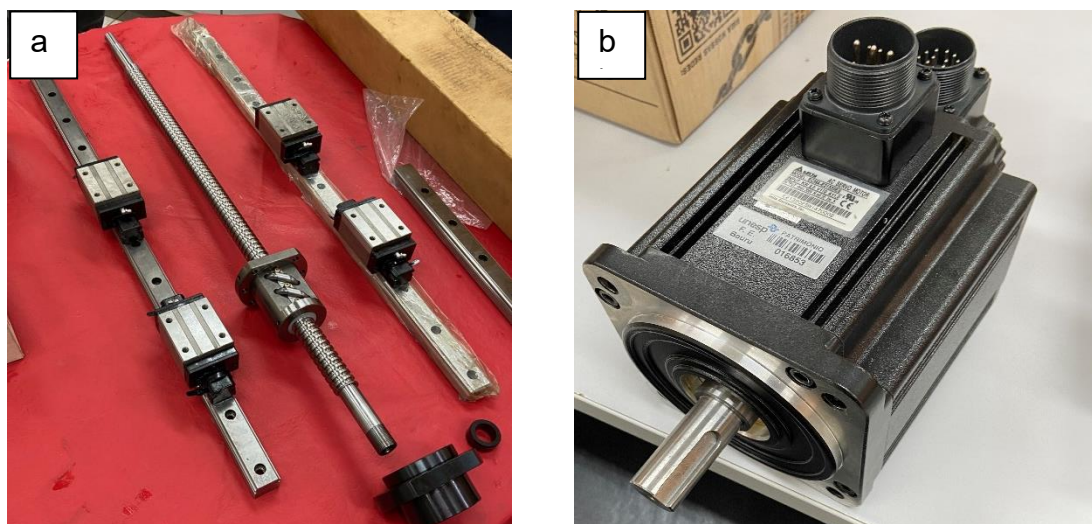


Figura 8 – Componentes e elementos de máquinas aplicados ao protótipo. a) Fuso, patins e trilho; b) Servo motor.

O sistema de mancais de deslizamento é do tipo patins, da marca NSK, modelo LH35AN, juntamente a trilhos do mesmo fabricante, com comprimento de 900 mm (Figura 8a). Juntamente, um fuso de esferas com diâmetro de 32 mm e passo de 7 mm, modelo W3207SA-6Z-C5Z, fornecido pela NSK foi aplicado (Figura 8a). Para apoio de extremidades desse fuso, mancais com flange de fixação, modelo WBK25DF 3198K1, também da NSK, foram aplicados. Juntamente aos componentes já citados, um servo motor da marca Delta, modelo ECMA-E21320ES e um controlador modelo ASD A2-2023M foram utilizados ao desenvolvimento do protótipo (Figura 8b). O motor, com 2 KW de potência, 9,55 N.m e controle de rotação de até 2000 rpm permitirá que seja realizado corte em diversos corpos de prova, controlando adequadamente a velocidade de corte por meio do software supervisor do motor e do controlador.

Segundo Budynas e Nisbeth (2016), utilizando a Equação 1, é possível determinar a força axial máxima que o conjunto de potência irá propiciar. Utilizando o passo de 7 mm do fuso (P), torque de 9,55 N.m fornecido pelo motor (τ) e o rendimento de 0,90 do fuso (η), determina-se a força axial (F) máxima de 7714 N. Considerado dados experimentais anteriores e da bibliografia, o motor permitirá condições superiores ao desejado para os ensaios, mesmo desconsiderando as perdas mecânicas do conjunto de deslizamento dos patins e dos mancais de apoio do fuso.

$$F = \frac{2\pi \cdot \tau \cdot \eta}{P} \quad (1)$$

Tendo sido determinada a aplicação destes componentes, foram iniciadas os esboços iniciais e a realização do projeto digital. Outrossim, a configuração deveria atender a necessidade de aplicação de um dinamômetro Kistler modelo 9257BA.

A realização do projeto virtual foi efetuada em software SolidWorks, bem como simulações de esforços. Para execução da fabricação, foram utilizados procedimentos de usinagem convencional, como torneamento, fresamento, furação, corte, rosqueamento, entre outros, além de processos de corte plasma com CNC.

4. RESULTADOS

A elaboração do projeto digital permitiu a determinação dos componentes necessários, bem como definir as etapas de fabricação individual. Os componentes foram divididos em subconjuntos, apresentados na Figura 9:

- 1 – Conjunto de potência;
- 2 – Estrutura superior;
- 3 – Conjunto móvel superior;
- 4 – Conjunto móvel inferior;
- 5 – Estrutura inferior.

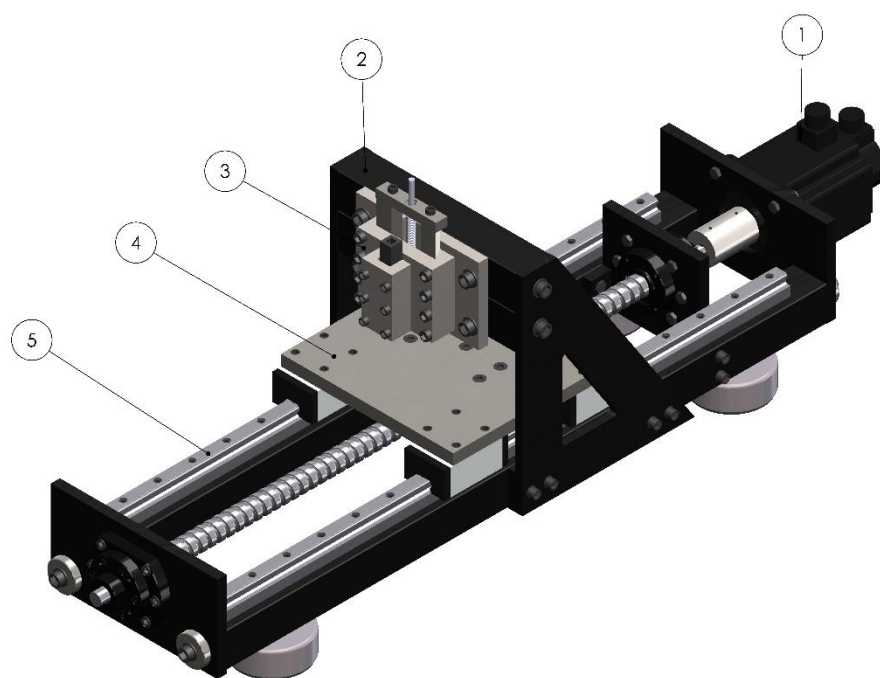


Figura 9 – Representação 3D e determinação dos subconjuntos.

O conjunto de potência, apresentado na Figura 10, contempla motor, fuso, castanha do fuso, acoplamento e chavetas. Este subconjunto demandou a fabricação de um mancal rígido para a união do fuso e do motor. Este mancal foi fabricado em ferro fundido nodular, seguindo os padrões de chaveta já existentes no motor.

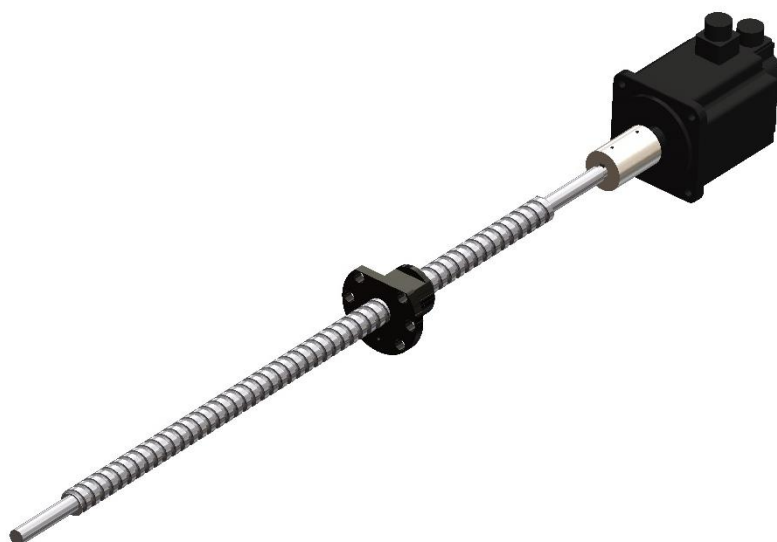


Figura 10 – Conjunto de potência.

A estrutura superior, apresentada na Figura 11, foi configurada de maneira a permitir o posicionamento futuro de sistemas de filmagem, sem que o porta-ferramenta ou a estrutura de fixação lateral pudesse gerar dificuldades de filmagem. Foram realizados ensaios estáticos virtuais com força de 5000 N, visando observar o deslocamento dos componentes frente a carga, como apresentado na Figura 12. Tal valor de força aplicado é 5 vezes superior aos maiores esforços obtidos em pesquisas anteriores. Com esse resultado, a estrutura foi considerada apta a fabricação.

A estrutura conta com perfis laterais cortados à laser, com espessura de 5/8", fabricado em aço SAE 1020. Os perfis superiores foram fabricados em perfil estrutural de seção quadrada de 60 mm e espessura de 3 mm, fabricado em aço SAE 1020. A fixação superior é feita por parafusos de aço com 14 mm de diâmetro, e a fixação inferior é realizada por parafusos de aço com 10 mm de diâmetro. A estrutura recebeu acabamento em pintura eletrostática.



Figura 11 – Representação da estrutura superior.

Model name: estrutura superior
Study name: Static 1 (-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1

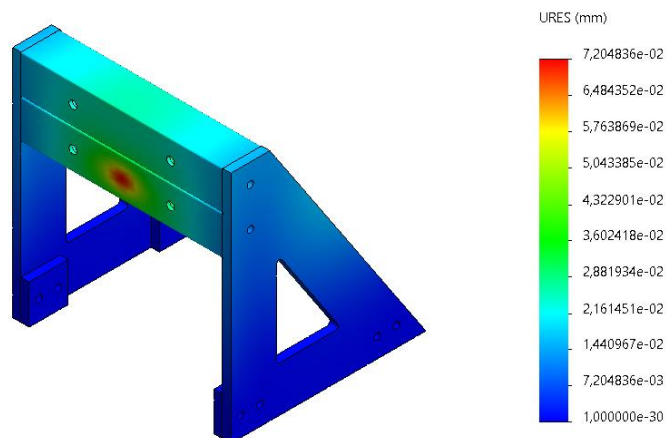


Figura 12 – Ensaio estático em ambiente virtual.

O conjunto móvel superior apresentado na Figura 13, foi elaborado visando permitir a movimentação da ferramenta de corte no sentido da profundidade de corte. A movimentação lateral para posicionamento é realizada através do posicionamento do conjunto completo através dos parafusos de 14 mm de diâmetro que fixa este conjunto na estrutura citada anteriormente.

Os perfis fresados são de aço SAE 1020, exceto os perfis fresados para o encaixe rabo-de-andorinha, sendo estes em aço SAE 1045. A fixação do porta-ferramenta de perfil quadrado (20 mm) permite que sejam aplicados porta-ferramentas convencionais ou especialmente desenvolvidos para tal aplicação. Para este conjunto, foram aplicados parafusos de 8 mm e 10 mm, em aço, visando a melhor fixação possível em cooperação ao espaço reduzido. Para sua fixação na estrutura superior, são utilizados parafusos de 14 mm.

O ajuste da profundidade de corte é realizado através de um fuso de esferas, com diâmetro de 100 mm. A castanha do fuso é fixada abaixo da mesa deslizante, de modo a permitir o ajuste adequado da profundidade de corte em valores reduzidos, com um curso útil de 15 mm, variando ao posicionamento do porta peças a ser elaborado ou do dinamômetro.

Sua resistência foi avaliada em simulação estática, permitindo determinar sua viabilidade. Foram consideradas duas situações para tal avaliação, sendo a primeira delas com o conjunto totalmente retraído e a segunda com o conjunto

avançado totalmente (Figura 14). Observou-se que em ambas as situações o mecanismo está apto ao uso.

Salienta-se que o conjunto móvel superior apresenta a necessidade de ajuste em sua folga, bem como necessita de fixação após a seleção da profundidade correta, realizada através de parafusos de fixação laterais.

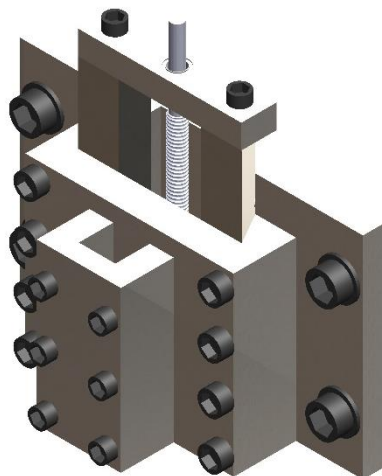


Figura 13 – Representação do conjunto móvel superior.

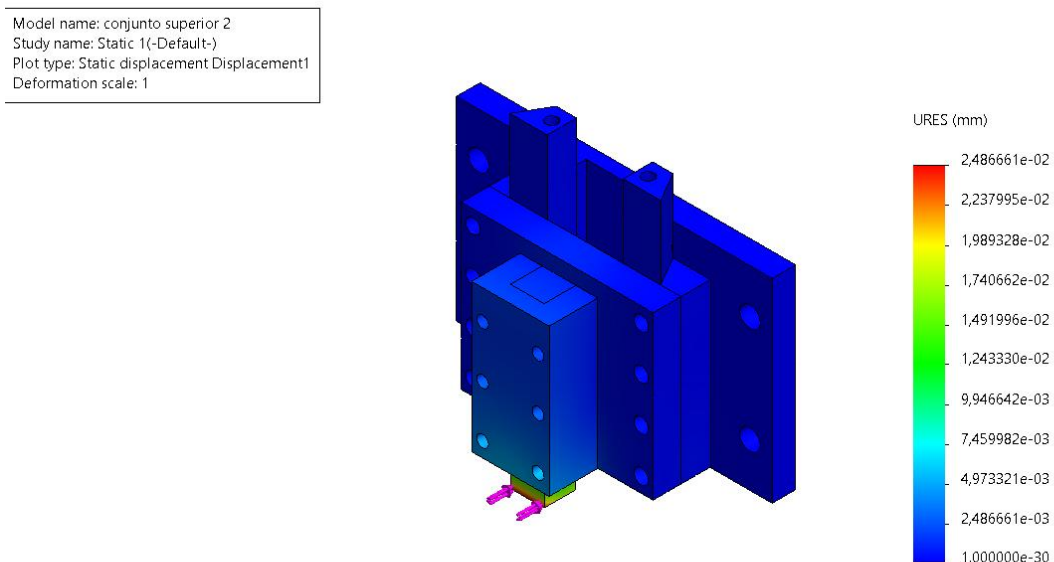


Figura 14 – Avaliação estática em ambiente virtual.

Em sequência, o conjunto móvel inferior foi elaborado. A mesa de trabalho permitirá que haja a fixação de sistemas de aquisição de dados, como um dinamômetro, juntamente a peça de trabalho. Em especial, as dimensões do conjunto visaram atender a fixação de um dinamômetro da marca Kistler, model 9257B existente no laboratório Tecnologia da Usinagem da UNESP, campus Bauru.

O conjunto móvel, representado na Figura 15, é composto por uma placa de aço SAE 1020, com dimensões finais de 300 mm x 300 mm e espessura de 18 mm, juntamente aos patins indicados anteriormente. Na face inferior a mesa de trabalho, um flange adaptador é fixado por parafusos, sendo tal componente posteriormente conectado a castanha do fuso de esferas.

A mesa de trabalho foi avaliada em ambiente virtual, como mostrado na Figura 16. Aplicando-se uma força de 2500 N, o componente mostra-se adequado a sua aplicação. Salienta-se que a força citada se refere a valores obtidos em ensaios anteriores, especificamente como a força tangente a superfície de saída da ferramenta de corte, ampliada em 5 vezes.



Figura 15 – Conjunto móvel inferior.

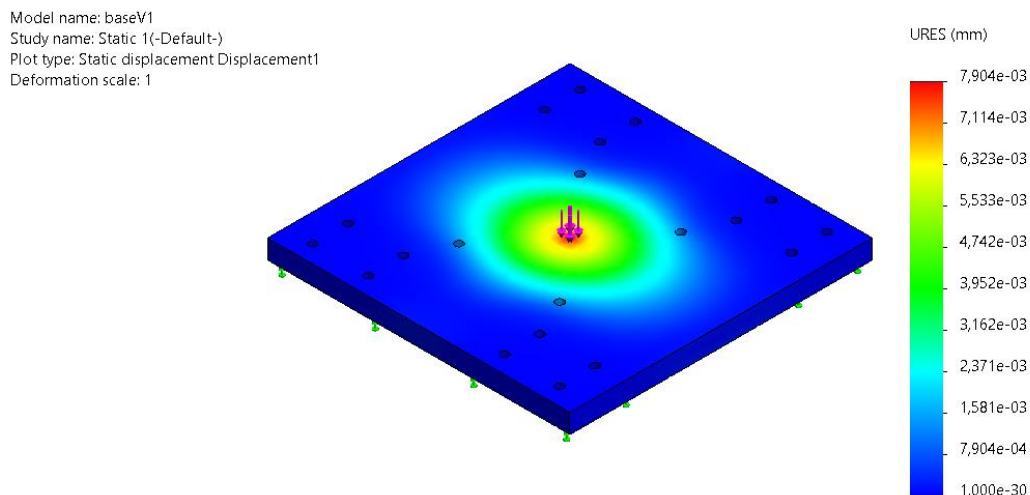


Figura 16 – Mesa de trabalho em avaliação estática.

Por fim, a Figura 17 representa a estrutura inferior da máquina de corte ortogonal desenvolvida. Esta estrutura é composta por longarinas fabricadas em perfil estrutural quadrado de 60 mm, com paredes de espessura de 4 mm, juntamente a placa frontal e intermediária e traseira, todas em aço SAE 1020. As placas apresentadas têm espessuras de 1/2", cortadas a laser e fixadas as longarinas por parafusos. As placas frontal e intermediária fixam os mancais do fuso, ao passo que placa traseira atua como sistema de fixação e posicionamento do motor. Todos estes componentes foram pintados com pintura eletrostática.



Figura 17 – Representação da estrutura inferior.

Junto as longarinas, foram parafusados os trilhos, permitindo um curso de trabalho compreendendo quase a totalidade do comprimento do fuso. Ademais, foram utilizados amortecedores do tipo vibra-stop nas longarinas, permitindo o posicionamento da máquina-ferramenta em seu futuro local de trabalho.

A estrutura inferior foi avaliada em detrimento a força tangencial a ferramenta de corte, ampliada em 5 vezes, utilizando uma carga concentrada ao centro das longarinas. (Figura 18). Apesar de uma deformação de 0,48 mm, as condições de ensaio resistência mecânica extra dos trilhos parafusados as longarinas. Com isso, a estrutura está adequada a sua função.

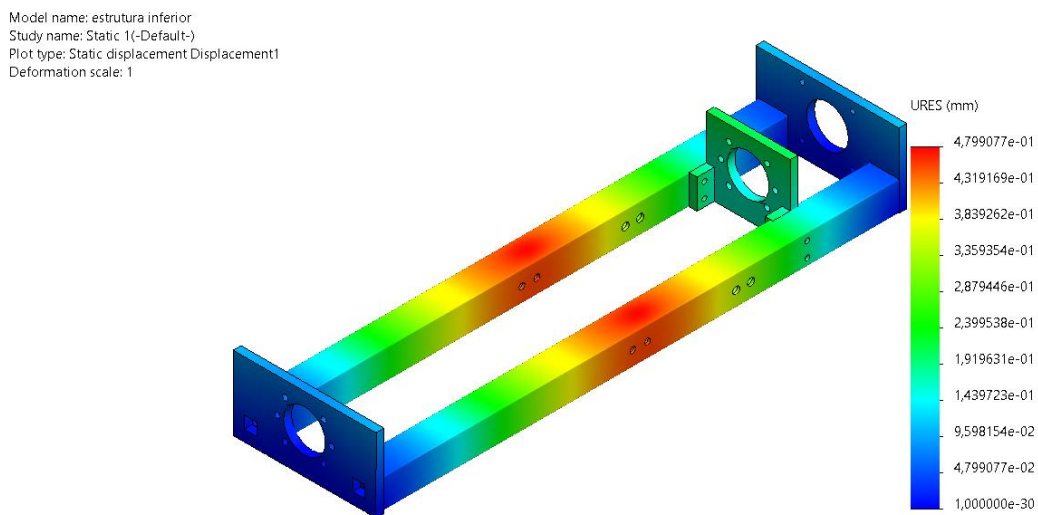


Figura 18 – Avaliação estática da estrutura inferior.

Considerando o passo de 7 mm do fuso e a rotação máxima de 2000 rpm do motor, o conjunto pode obter uma velocidade máxima de avanço 14 m/min. Dadas as condições futuras de trabalho, este parâmetro ainda deve ser aferido experimentalmente. Contudo, uma avaliação da rigidez da estrutura foi realizada, visando verificar se em alguma faixa de trabalho a estrutura estaria submetida a ressonância. Os resultados mostrados Tabela 1 mostram as 5 primeiras faixas de ressonância natural da estrutura, sendo possível identificar que todos eles estão abaixo da rotação máxima atingida pelo motor. Com isso, descarta-se a condição de ressonância da estrutura dada a rotação do motor.

Tabela 1 – Condições de ressonância na estrutura.

Frequência (Hertz)	Rotação (rpm)
156,99	9419,4
733,83	44029,8
847,97	50878,2
926,39	55583,4
963,02	57781,2

Findado projeto estrutural e fabricação, os componentes foram montados para a verificação de ajustes finais. As Figuras 19, 20 e 21 apresentam o resultado da máquina-ferramenta elaborada.

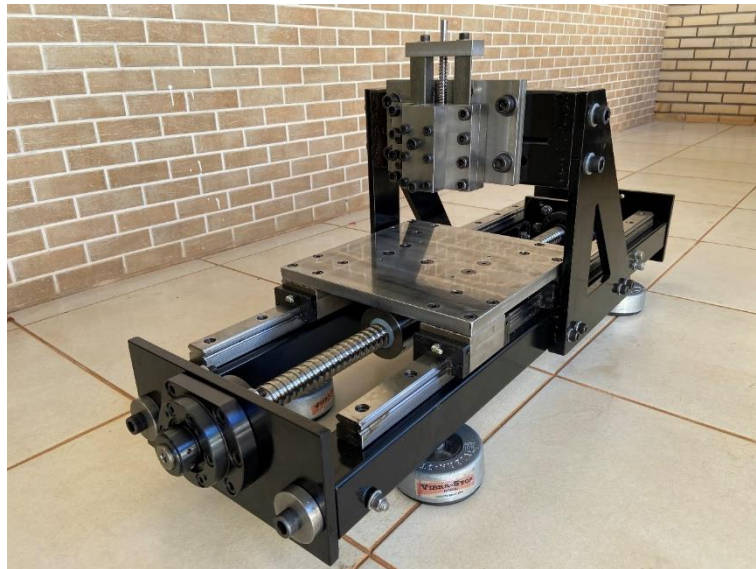


Figura 19 – Máquina de corte ortogonal em vista isométrica.

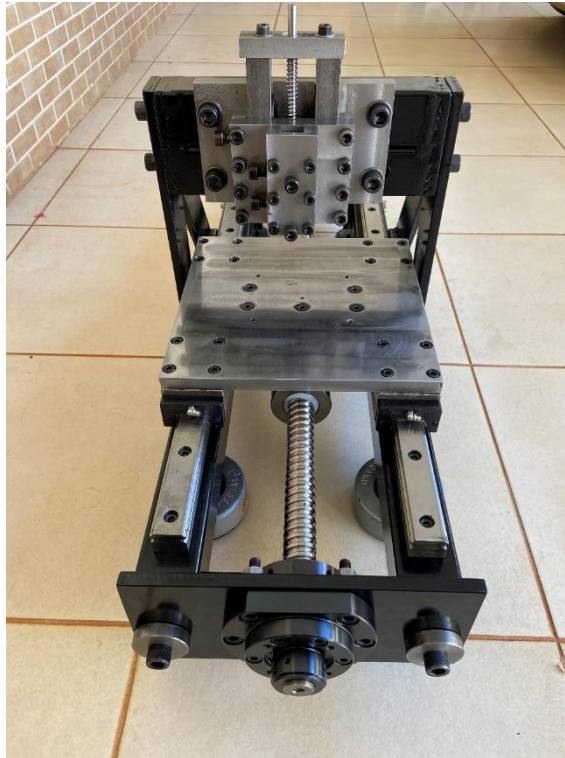


Figura 20 – Máquina de corte ortogonal em vista frontal.

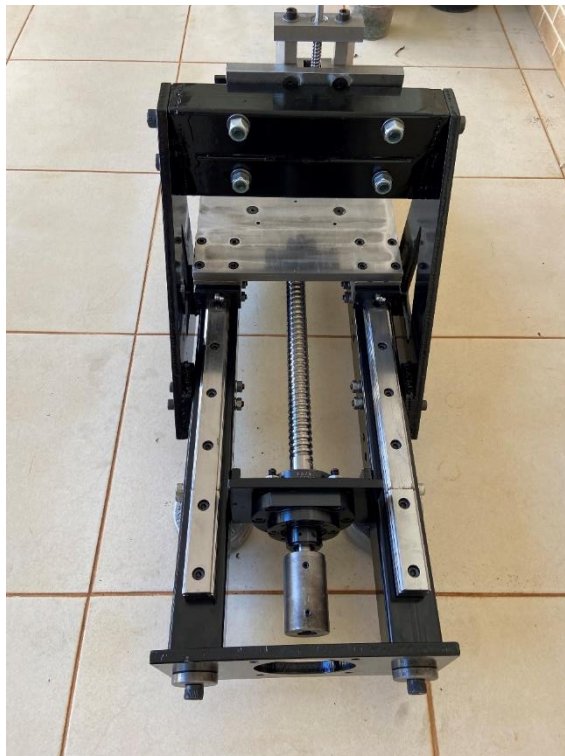


Figura 21 – Máquina de corte ortogonal em vista traseira.

5. DISCUSSÃO

O desenvolvimento da máquina-ferramenta dedicada ao corte ortogonal representa um avanço significativo para a linha de pesquisa em usinagem na UNESP, especialmente no Laboratório Tecnologia da Usinagem, superando limitações técnicas observadas em ensaios anteriores realizados em máquinas adaptadas. A utilização de uma fresadora ferramenteira em pesquisas prévias impunha restrições severas de profundidade de corte, velocidade de avanço e potência, o que limitava a exploração de variadas condições de usinagem. Junto a isso, a realização de corte ortogonal com auxílio de um torno mecânico, por exemplo, dificultaria aquisição de dados durante filmagem.

O projeto digital, validado por simulações em ambiente virtual, demonstrou que a estrutura modular é capaz de suportar esforços de até 5000 N, gerando um coeficiente de segurança necessário para a estabilidade durante a aquisição de dados. Além disso, a força axial máxima de 7714 N proporcionada pelo conjunto de potência assegura que o conjunto não apresente perdas significativas na velocidade de corte durante os ensaios.

A estrutura modular foi projetada para permitir a instalação de setups de pesquisa específicos. O distanciamento dos perfis laterais e a configuração da estrutura superior permitem o posicionamento de sistemas de filmagem direta para a observação da formação do cavaco. A compatibilidade com o dinamômetro Kistler 9257B no conjunto móvel inferior possibilita a medição simultânea das forças de corte e imagens.

Um dos pontos centrais que justificam a criação desta máquina é a necessidade de compreender a formação do cavaco e o fenômeno do corte derivativo. Como apontado pela literatura, o entupimento de microrranhuras por cavacos secundários pode inutilizar os benefícios da texturização. A nova máquina permitirá investigar de forma controlada como o posicionamento e a geometria das texturas influenciam a zona de aderência e o comprimento de contato, buscando condições que minimizem ou eliminem o corte derivativo.

Os resultados promissores obtidos anteriormente com o uso de nanotubos de carbono em ferramentas texturizadas sugerem que uma melhor remoção de calor pode ampliar as condições de corte a seco tão frente aos processos que

utilizam fluidos de corte, contribuindo para processos de fabricação mais sustentáveis e com menor impacto ambiental e ocupacional.

Por fim, o equipamento não apenas atende aos requisitos de projeto, mas abre novas possibilidades para o estudo aprofundado da interface cavaco-ferramenta, permitindo a transição de uma abordagem empírica para uma compreensão científica mais robusta do posicionamento de microrranhuras e do comportamento térmico em usinagem.

6. ORIENTAÇÕES

Coorientação de mestrado em andamento:

Discente Vitor Antonio Pigossi.

Título do projeto: Estudo sobre o comportamento do grau de recalque com a variação de parâmetros de usinagem.

7. CONCLUSÕES

Conforme apresentado, o presente trabalho teve como objetivo o projeto e construção de uma máquina-ferramenta dedicada ao corte ortogonal. Diante do exposto, foi possível executar projeto e fabricação dos componentes, obtendo uma máquina com estruturas modulares e relativamente compacta. Tal equipamento atenderá a demanda e facilitará a execução de testes em bancada sobre a formação de cavaco.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de testes experimentais e a realização da programação para efetivo uso do conjunto de potência, permitindo assim o uso do equipamento por vários pesquisadores em diferentes linhas de investigação científica dentro do tema relacionado.

8. REFERÊNCIAS

BERMAN, Diana; ERDEMIR, Ali; SUMANT, Anirudha V. Few layer graphene to reduce wear and friction on sliding steel surfaces. **Carbon**, v. 54, p. 454-459, 2013.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETH, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley-10ª Edição**. McGraw Hill Brasil, 2016.

DAHLMAN, P. A comparison of temperature reduction in high-pressure jet-assisted turning using high pressure versus high flowrate. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 216, n. 4, p. 467-473, 2002.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artliber, 2014.

DUAN, Ran et al. Effect of derivative cutting on machining performance of micro textured tools. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 45, p. 544-556, 2019.

ENOMOTO, T.; SUGIHARA, T. Improvement of anti-adhesive properties of cutting tool by nano/micro textures and its mechanism. **Procedia Engineering**, v. 19, p. 100-105, 2011.

FERRARESI, Dino. **Usinagem dos metais**. Editôra Edgard Blücher, 1970.

JIANG, Wenping; MALSHE, Ajay P.; WU, J-H. Bio-mimetic surface structuring of coating for tribological applications. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], v. 201, n. 18, p. 7889-7895, 2007.

KAWASEGI, Noritaka *et al.* Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. **Precision Engineering**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 248-254, 2009.

KOSHY, P.; TOVEY, J. Performance of electrical discharge textured cutting tools. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 153-156, 2011.

LEI, Shuting; DEVARAJAN, Sasikumar; CHANG, Zenghu. A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 209, n. 3, p. 1612-1620, 2009.

MA, Jianfeng *et al.* Assessment of microgrooved cutting tool in dry machining of AISI 1045 steel. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, [s. l.], v. 137, n. 3, p. 031001, 2015.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ. **Avaliação de ferramentas de corte texturizadas preenchidas com nanotubos de carbono**. 2019. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ *et al.* Machining behavior using micro-grooved cutting tools filled with carbon nanotubes. **Tribology International**, [s. l.], v. 192, p. 109297, 2024.

RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ *et al.* Sustainable improvement in dry turning using micro-grooved tools filled with carbon nanotubes: performance evaluation and environmental impacts. **Wear**, [s. l.], p. 206149, 2025.

RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ. **Efeito da posição e dimensões de uma microrranhura produzida na superfície de saída da ferramenta de corte sobre os mecanismos de formação do cavaco**. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2024.

SUGIHARA, Tatsuya; ENOMOTO, Toshiyuki. Performance of cutting tools with dimple textured surfaces: a comparative study of different texture patterns.

Precision Engineering, [s. l.], 2017.

SUGIHARA, Tatsuya; KOBAYASHI, Ryota; ENOMOTO, Toshiyuki. Direct observations of tribological behavior in cutting with textured cutting tools.

International Journal of Machine Tools and Manufacture, [s. l.], v. 168, p. 103726, 2021.