



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) BR 102012001446-7 B1**



**(22) Data do Depósito: 23/01/2012**

**(45) Data de Concessão: 09/02/2021**

---

**(54) Título:** MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS DO ATRITO NA INTERFACE CAVACO-FERRAMENTA

**(51) Int.Cl.:** G01N 3/56; G01N 19/02.

**(52) CPC:** G01N 3/56; G01N 19/02.

**(73) Titular(es):** UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP.

**(72) Inventor(es):** REGINALDO TEIXEIRA COELHO; RICARDO ARAI; CLEITON LAZARO FAZOLO DE ASSIS.

**(57) Resumo:** MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS DO ATRITO NA INTERFACE CAVACO-FERRAMENTA A presente invenção refere-se a um método para avaliar o atrito e seus efeitos entre o cavaco e a ferramenta de corte no processo de formação de cavaco comum aos processos de usinagem mecânica. O setor técnico que irá utilizar este invento diretamente pode ser dividido em fabricantes de ferramentas de corte e pesquisadores da área de usinagem. O método da presente invenção simula de maneira controlada o atrito entre o cavaco e a ferramenta durante o processo de formação de cavaco. O método proposto viabiliza a obtenção de resultados consistentes e pode simular não somente o atrito na interface cavaco/ferramenta no processo de torneamento, mas também no processo de fresamento, cujo mecanismo de corte é intermitente.

**MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DOS EFEITOS DO ATRITO NA INTERFACE  
CAVACO-FERRAMENTA**

**CAMPO DA INVENÇÃO**

[0001] A invenção se insere no campo da Engenharia de Materiais, mais especificamente no campo da Tribologia, uma vez que se refere a um método para a avaliação dos efeitos do atrito na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta no processo de formação de cavaco, podendo a invenção contribuir para todo setor técnico que possui processos de usinagem em sua cadeia produtiva.

**DESCRIÇÃO DO ESTADO DA TÉCNICA**

[0002] Na indústria manufatureira há constante surgimento de novos produtos a serem fabricados em larga escala com geometrias cada vez mais complexas e com novos tipos de materiais. Para tanto, é necessário o desenvolvimento de novos processos e ferramentas para atender essa demanda. As empresas que fabricam ferramentas de corte têm buscado continuamente o melhoramento do desempenho de seus produtos alinhando menores custos com maior produtividade para seus clientes. Este objetivo pode ser alcançado com o desenvolvimento de novas ferramentas com novos materiais e geometrias.

[0003] O desenvolvimento de novas ferramentas é um desafio e necessita de pesquisa e testes laboratoriais. Parte deste trabalho é realizada em centros de pesquisa da área de usinagem. A otimização do processo inicia-se com a investigação e detalhamento dos fenômenos relativos à formação de cavaco. Parte considerável da energia necessária para a formação de cavaco é dissipada pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta.

[0004] Pesquisas buscando a otimização do processo de formação de cavaco comprovam que grande parte da energia utilizada é dissipada em forma de calor, principalmente pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta. Essa energia dissipada não favorece o processo e é considerada como um desperdício do sistema. Assim, pesquisas que buscam entender os fenômenos do atrito proporcionam o desenvolvimento de melhores ferramentas e desempenho em processos de usinagem.

[0005] Alguns dos tópicos importantes no processo de formação de cavaco dizem respeito ao atrito, lubrificação e desgaste. Esses são os três principais assuntos que abrangem a ciência do contato, a tribologia. Este termo pode ser definido como ciência ou tecnologia que estuda a interação do movimento relativo entre superfícies. Muitas vezes, a tribologia aplicada em processos de usinagem se resume apenas no estudo da minimização do desgaste da ferramenta de corte.

[0006] O processo de formação de cavaco é comum a todo processo de usinagem mecânica e consiste na remoção de uma porção de material da peça, denominada cavaco, por uma dada ferramenta. A formação do cavaco inicia-se com a penetração da cunha cortante da ferramenta no material da peça. O aumento da pressão da ferramenta sobre a peça contribui para deformações elásticas e posteriormente plásticas até o estado de tensões provocarem a ruptura. Com a continuação do engajamento da ferramenta, haverá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento. A última etapa do processo compreende a saída do cavaco pelo escorregamento do material deformado e/ou cisalhado sobre a superfície de saída da ferramenta. Este processo de corte ocorre em pequenas áreas que não ultrapassam valores superiores a  $6\text{mm}^2$ , sendo

que valores inferiores a  $1\text{mm}^2$  são mais comuns. Nessa pequena área há uma grande tensão que pode ultrapassar 3GPa.

[0007] Ou seja, no processo de formação de cavaco severas deformações ocorrem em uma pequena área composta pela profundidade de corte e avanço da ferramenta. O comportamento do atrito entre o cavaco e a ferramenta é crítica devido ao seu efeito direto no desempenho do processo de corte. Há uma grande dificuldade em avaliar experimentalmente a interface do cavaco com a ferramenta devido às altas temperaturas, altas tensões e deformações ocorrendo em uma pequena área.

[0008] O estudo do atrito aplicado no processo de corte em usinagem ocorre basicamente de forma teórica ou experimental. A forma teórica consiste em análises baseadas em modelos analíticos/matemáticos que tentam descrever através de equacionamentos o comportamento real do processo. Geralmente, estes modelos são simulados com auxílio de computadores para a realização dos cálculos. A utilização de modelagens computacionais evita o desperdício na execução de testes experimentais, além de possibilitar o estudo de mais variáveis.

[0009] Porém, a tentativa de reproduzir as informações dos fenômenos experimentais a partir do método teórico, muitas vezes, apresenta inconsistências devido às aproximações e simplificações necessárias nesses tipos de modelos. Além disso, existe uma limitação de aplicação para uma dada condição, ou seja, ainda não há um modelo universal.

[0010] Um exemplo atual do estudo teórico consiste na utilização de programas de simulação em elementos finitos. Estes programas são capazes de demonstrar virtualmente as situações e comportamentos encontrados experimentalmente ou

vice-e-versa no processo de formação de cavaco.

[0011] Devido à falta de precisão e confiabilidade dos dados encontrados nos modelos teóricos, sejam puramente modelos analíticos ou através de simulações em elementos finitos, torna-se necessário a quantificação do atrito por métodos experimentais. Desta forma, é possível realizar medições diretas dos componentes de forças e entender os fenômenos do processo, além de serem necessários para a comprovação dos modelos teóricos.

[0012] Os métodos experimentais para o estudo do atrito podem ser geralmente divididos em método de quantificação direta ou independente. A quantificação direta utiliza medições das tensões do processo real com auxílio de algum dispositivo, como por exemplo, um dinamômetro. A quantificação independente é uma forma indireta de determinar o atrito entre duas superfícies utilizando equipamentos apropriados. Estes equipamentos são conhecidos como tribômetros ou máquinas de ensaios tribológicos.

[0013] Um exemplo de medição direta é o processo de torneamento ortogonal, no qual as forças de cortes são medidas diretamente com auxílio de um dinamômetro acoplado no suporte de ferramenta. O coeficiente de atrito é resultado da razão da força tangencial pela força normal.

[0014] As máquinas de ensaios tribológicos para medição do atrito independente devem recriar as características pertinentes do processo em estudo. No caso do estudo do atrito entre o cavaco e a ferramenta, as principais características de entrada do processo são a velocidade do cavaco, área de contato e pressão de contato. Lubrificantes, camadas externas, poeira, elementos sólidos em geral, um

líquido, gás ou mistura deles, podem existir como elementos interfaciais.

[0015] A norma DIN 50320 define que um sistema tribológico seja composto por um corpo sólido, um contracorpo, elemento interfacial e o meio. O contracorpo pode ser sólido, líquido ou gasoso, ou ainda uma mistura deles. A ação dos elementos ou a interação entre eles varia amplamente dependendo da estrutura do sistema tribológico. Podem ocorrer entre esses elementos interações físicas e químicas, resultando em destacamento de material da superfície do contracorpo e/ou da superfície do corpo sólido. A formação desses detritos de desgaste é função dos mecanismos de desgaste atuantes.

[0016] Um sistema tribológico amplamente utilizado para o estudo do atrito entre dois materiais é descrito na norma ASTM G99-95 que estabelece o procedimento padrão para os testes do pino sobre disco. Este teste é utilizado por pesquisadores para investigar o atrito e desgaste envolvidos no processo de formação de cavaco. Porém, há a necessidade de fazer algumas modificações e adaptações para reproduzir os fenômenos encontrados nesse processo.

[0017] A máquina de ensaios do tipo pino sobre disco utiliza um pino de secção circular ou ponta esférica que desliza sobre uma superfície plana de um disco em rotação. O diâmetro do pino e a espessura do disco dependem do caso em estudo.

[0018] A aplicação do sistema pino sobre disco, no estudo do atrito entre o cavaco e a ferramenta, é feita geralmente utilizando um pino do mesmo material da ferramenta e o disco do material a ser usinado. O pino é comprimido sobre a

superfície do disco que está girando com uma velocidade próxima à velocidade de escorregamento do cavaco. O coeficiente de atrito é obtido medindo-se a força normal aplicada e a força tangencial sobre o pino com um dinamômetro.

[0019] Existe uma metodologia de estudo do atrito em usinagem na qual um pino é posicionado após a ferramenta de corte durante o processo ortogonal, assim o pino estará atritando sobre uma superfície renovada a cada revolução da peça. Este sistema não consegue apresentar uma alta pressão encontrada no processo devida a baixa rigidez e a possibilidade de o pino usinar a peça.

[0020] A norma americana designada como G99-05 descreve a padronização de um método para avaliar o desgaste causado pelo deslizamento de um pino sobre disco, conforme demonstrado na figura 1A. Diversas variações deste método foram utilizadas por outros pesquisadores para investigar o atrito no processo de formação de cavaco. A variação deste tipo de ensaio é o mais amplamente utilizado por pesquisadores da área para reproduzir as condições de atrito no processo de formação de cavaco. Esta norma detalha um procedimento para a realização do teste pino sobre disco. O procedimento descrito na norma ASTM G99-05 não consegue reproduzir o atrito do processo de formação de cavaco de forma adequada. O objetivo principal do teste consiste em avaliar o desgaste entre dois materiais (pino sobre disco). De acordo com (GRZESIK, et al., 2002), o sistema de pino sobre disco não consegue simular as condições de temperatura, pressão e mecanismo de desgaste.

[0021] A norma americana designada como G77-05 descreve

a padronização de um método para avaliar a resistência de materiais e desgaste causados pelo deslizamento de um bloco sobre anel, conforme demonstrado na figura 1B. Nessa norma, utilizam-se corpos de prova com dimensões pré-definidas. Tanto o anel quanto o bloco necessitam ter as dimensões propostas na norma. O método difere do objeto da invenção principalmente na forma como o teste é realizado. O proposto invento trata da utilização de um centro de usinagem para a realização dos testes. As condições dos testes são as encontradas no processo de formação de cavaco. A norma G77-05 propõe o procedimento de realização do teste bloco sobre anel, mas não detalha o equipamento onde é realizado o teste.

[0022] Olsson et al. (1989) propuseram uma configuração para avaliação do atrito posicionando um pino logo após à ferramenta de corte, conforme demonstrado na figura 1C. Neste sistema, o pino sempre está atritando em uma superfície recém-formada com uma pressão de aproximadamente 15 Mpa. Hedenquist e Olsson (1991) propuseram uma nova configuração onde um cilindro é atritado contra outro cilindro, conforme demonstrado na figura 1D.

[0023] Quanto aos documentos representativos do estado da técnica, podemos mencionar os documentos: WO 2011042575, US3129580, US3129580, CA2462630.

[0024] O documento WO2011042575 refere-se a um tribonômetro linear, este equipamento pode ser utilizado para medir o atrito e desgaste por deslizamento entre materiais submetidos por um movimento linear relativo entre os dois corpos, tipo pino sobre plano. As principais diferenças em relação ao objeto da invenção estão no fato de que o documento WO2011042575 apresenta um tribonômetro onde



um cabeçote desliza sobre uma bancada em um movimento linear, onde a duração do teste fica limitada pelo comprimento da bancada, não havendo referência de aplicação para testar o atrito entre a ferramenta e cavaco, sendo a principal indicação a avaliação do atrito entre dois corpos com movimento retilíneo entre si, não havendo indicação para avaliar casos mais específicos como o atrito no processo de formação de cavaco.

[0025] Já o documento WO2006072760, refere-se a um método e aparelho tribológico capaz de avaliar o atrito e preferivelmente o desgaste entre duas superfícies com ou sem lubrificante como elemento interfacial. Ou seja, o objetivo deste sistema é avaliar o desempenho de lubrificantes através da avaliação de atrito que ocorre entre um pino e um disco giratório, do tipo pino no anel.

[0026] Quanto ao documento CA2462630, este se refere a um tribonômetro compacto para o teste de propriedades de desgaste e lubrificação de materiais em condições mais realísticas, como por exemplo, para testar materiais em contato de partes mecânicas internas de compressores, através de um pino que é pressionado entre dois blocos para a geração de atrito dentro de um vaso selado hermeticamente onde condições sobre pressão, lubrificação e temperatura podem ser simuladas, sendo específico para avaliar o atrito entre materiais sob pressão, lubrificação e temperatura específicos, como encontrados, por exemplo, em um vaso de pressão. A técnica apresentada não se aplica aos processos de usinagem. Não há referência sobre a pressão interna de um vaso de pressão influenciar as condições tribológicas no processo de atrito.

[0027] Já o documento US3129580 se refere a um aparato para medir atrito e deslizamento de contato entre superfícies lubrificadas metálicas, mais especificamente investiga os diferentes efeitos de lubrificantes e aditivos de lubrificante em diversas condições como velocidade, carregamento, geometria, etc., sendo o carregamento do tipo esfera sobre anel. O atrito é dado por uma esfera sobre anel/cilindro.

[0028] O invento ora proposto tem como objetivo geral a criação de um método para medir o atrito de forma independente na interface do cavaco com a ferramenta de corte em processos de usinagem.

[0029] Além disso, como objetivos mais específicos podem ser citados: simular as condições encontradas no processo de formação de cavaco; determinar o coeficiente de atrito entre o material a ser usinado e a ferramenta de corte; estudar as influências de revestimentos de ferramentas; verificar a taxa de desgaste de ferramentas; e verificar a geração de calor no processo.

[0030] Esse método pode ser adaptado em qualquer máquina que possua um eixo rotativo variável e controle de posicionamento, como por exemplo, um centro de usinagem. A máquina deve apresentar rigidez suficiente para pressionar o corpo de prova contra a superfície plana da ferramenta sem grandes deformações.

[0031] Este método apresenta as seguintes vantagens: adaptação em centros de usinagem; simplicidade do processo; e flexibilidade de variação de parâmetros.

[0032] A invenção consegue simplificar o processo de medição de atrito, visando à aplicação dos resultados no

projeto de ferramentas de corte e revestimentos, e melhoria dos processos de usinagem. A determinação do coeficiente de atrito nos processos de usinagem possui complicações que inviabilizam uma medição precisa e realista, capaz de prover informações que venham a favorecer a otimização do processo. O método proposto não só viabiliza a obtenção de resultados consistentes, como também se mostra de fácil aplicação, e comparativamente a outras técnicas apresentadas, pode simular não somente o atrito na interface cavaco/ferramenta no processo de torneamento, mas também no processo de fresamento, cujo mecanismo de corte é intermitente.

#### **BREVE DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO**

[0033] A presente invenção refere-se a um método para avaliar o atrito e seus efeitos entre o cavaco e a ferramenta de corte no processo de formação de cavaco comum aos processos de usinagem mecânica. O setor técnico que irá utilizar este invento diretamente pode ser dividido em fabricantes de ferramentas de corte e pesquisadores da área de usinagem.

[0034] O método da presente invenção simula de maneira controlada o atrito entre o cavaco e a ferramenta durante o processo de formação de cavaco.

[0035] O método proposto viabiliza a obtenção de resultados consistentes, e pode simular não somente o atrito na interface cavaco/ferramenta no processo de torneamento, mas também no processo de fresamento, cujo mecanismo de corte é intermitente.

#### **BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS**

[0036] A figura 1A representa esquematicamente um método presente no estado da técnica para avaliar o desgaste causado

pelo deslizamento de um pino sobre disco.

[0037] A figura 1B representa esquematicamente um método presente no estado da técnica de avaliar a resistência de materiais e desgaste causados pelo deslizamento de um bloco sobre anel.

[0038] A figura 1C representa esquematicamente um método presente no estado da técnica para avaliação do atrito posicionando um pino logo após à ferramenta de corte.

[0039] A figura 1D representa esquematicamente um método presente no estado da técnica para avaliar a resistência de materiais e desgaste de atrito onde um cilindro é atritado contra outro cilindro.

[0040] A figura 2 representa esquematicamente o princípio utilizado neste invento para a geração de atrito.

[0041] A figura 3A representa esquematicamente a vista em perspectiva mostrando o método de atrito da presente invenção.

[0042] A figura 3B representa esquematicamente a vista lateral mostrando o processo de atrito da presente invenção.

[0043] A Figura 4 representa esquematicamente as dimensões principais do corpo de prova (9) ou contra corpo (3) montado no suporte (12).

[0044] A figura 5 representa esquematicamente o resultado de um teste realizado com a utilização da invenção.

#### **DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO**

[0045] A presente invenção refere-se a um método para avaliar o atrito e seus efeitos entre o cavaco e a ferramenta de corte no processo de formação de cavaco comum aos processos de usinagem mecânica.

[0046] Um sistema tribológico é constituído por quatro

elementos: meio (1), elementos interfaciais (2), contra corpo (3) e corpo sólido (4), conforme demonstrado na figura 2. O atrito ocorre devido ao movimento relativo no contato entre o contra corpo (3) e o corpo sólido (4). Entre esses dois corpos podem existir elementos interfaciais como óleos ou lubrificantes se necessário. O meio (1) engloba todo o sistema tribológico e geralmente é composto pela atmosfera. Em alguns casos, o meio pode ser substituído por algum tipo de fluido protetor.

[0047] Neste invento o sistema tribológico é composto por um corpo de prova (9) feito do material que se deseja avaliar e da superfície plana de uma ferramenta de corte (10), respectivamente contra corpo (3) e corpo sólido (4). O meio (1) recomendado para este invento é o ar atmosférico sem o uso de elementos interfaciais.

[0048] O atrito ocorre quando o corpo de prova (9) é pressionado contra a ferramenta de corte (10) e simultaneamente tem-se o movimento de rotação do corpo de prova (9). A figura 2 mostra o princípio de geração de atrito utilizada para este invento. Geralmente o corpo sólido (4) permanece estático, enquanto o contra corpo (3) realiza o movimento que provoca o deslizamento relativo.

[0049] O método descrito no presente documento simula de maneira controlada o atrito entre o cavaco e a ferramenta durante o processo de formação de cavaco. O método apresentado na presente invenção é composto de três etapas principais, são elas:

- a) Preparação dos materiais a serem investigados;
- b) Montagem da bancada do sistema tribológico;
- c) Aplicação do carregamento e deslizamento do corpo de

prova contra a superfície da ferramenta; e

d) Aquisição de dados para estudo dos efeitos.

[0050] A preparação dos materiais a serem investigados consiste na fabricação de corpos de provas e dispositivos de fixação (se houver necessidade). O corpo de prova (9) consiste em um cilindro de revolução. Recomenda-se que utilize o processo de torneamento para a sua fabricação. A fixação do corpo de prova pode ser feita com um suporte de ferramenta da máquina (12), não necessitando ser confeccionado porque pode ser encontrado comercialmente. O corpo sólido (10) é a ferramenta que se deseja investigar o atrito. A ferramenta pode ser encontrada comercialmente em diversos fornecedores. O suporte de fixação da ferramenta (11) necessita confecção específica devido a grande variedade de geometrias encontradas para as ferramentas. Este suporte deve fixar a ferramenta sobre o dinamômetro (8) garantindo rigidez e precisão de posicionamento.

[0051] A montagem consiste em posicionar todos os elementos necessários para a execução do teste, ou seja, fixar o corpo de prova (9) no eixo rotativo da máquina com um sistema de fixação de ferramenta rotativa (12). Posicionar o suporte da ferramenta (corpo sólido) no dispositivo sobre o dinamômetro (8). Posicionar o dinamômetro (8) sobre a mesa da máquina. Conectar o sistema de aquisição de forças composto pelo dinamômetro (8), amplificador de sinal, placa de aquisição e computador. A bancada é composta pelos elementos: centro de usinagem, sistema de fixação do corpo de prova (12), corpo de prova (9), sistema de aquisição de forças (dinamômetro (8), suporte do corpo sólido (11), corpo sólido (ferramenta (10)).

[0052] Do desdobramento da etapa de montagem da bancada: Inicia-se com a fixação do corpo de prova em seu suporte específico e posterior fixação do conjunto no eixo árvore do centro de usinagem (eixo rotativo da máquina). Pode-se utilizar o sistema disponível da máquina de fixação de ferramentas composto por cone e pinça. O dinamômetro (8) deve ser montado sobre a mesa da máquina com seus eixos alinhados. Geralmente o dinamômetro (8) possui direções de medição de força (por exemplo, eixo X e eixo Y) e estas direções devem estar alinhadas com a movimentação da máquina. A fixação do dinamômetro (8) pode ser feita com auxílio de grampos. Preferencialmente, o computador deve ser posicionado fora da máquina. Sobre o dinamômetro (8) é montado o suporte do corpo sólido que foi confeccionado para esta aplicação. A fixação deste suporte sobre o dinamômetro (8) pode ser feita com parafusos. A aplicação do carregamento ocorre com a aproximação do corpo de prova contra a ferramenta.

[0053] Na aplicação do carregamento e deslizamento do corpo de prova (9) contra a superfície da ferramenta, o carregamento é dado pelo movimento linear relativo de translação do eixo rotativo da máquina contra a superfície do corpo sólido (ferramenta). Com o eixo em movimento rotativo, aproxima-se o corpo de prova até iniciar-se o contato com a superfície da ferramenta. Após este contato, continua-se o movimento linear do corpo de prova, neste momento, o sistema de aquisição de dados irá informar qual o carregamento no sistema. O movimento linear encerra quando se atinge o carregamento desejado.

[0054] Na aquisição de dados para estudo dos efeitos, o

sistema de aquisição de força é composto por um dinamômetro (8) que está acoplado a um amplificador de sinal e este conectado a uma placa de aquisição em um computador. Os esforços são captados pelo dinamômetro (8) como uma variação de potencial que é amplificado por um equipamento. Estes dados são capturados por uma placa de aquisição do computador onde um programa converge à variação de potencial em força.

[0055] Para a realização do método proposto, recomenda-se que o corpo de prova (9) seja confeccionado pelo processo de torneamento cilíndrico externo para minimizar os erros de batimento. Como dito anteriormente, é importante que seja do mesmo material que se deseja estudar o atrito, a espessura do disco (6) seja similar ao avanço de corte utilizado no processo.

[0056] O corpo de prova (9) é fixado na máquina com auxílio de um suporte de fixação (11) específico da máquina pelo diâmetro (5), sendo o diâmetro (5) um elemento característico do corpo de prova (9). A ferramenta de corte (10) deve ser fixada em um suporte próprio sobre o dinamômetro (8), conforme a figura 3 (A e B). Por sua vez, o dinamômetro (8) deve ser fixado sobre a mesa da máquina, neste caso, centro de usinagem. Um suporte para a ferramenta de corte (10) deve ser confeccionado ou adaptado para garantir a transmissão dos esforços do corpo de prova (9) para o dinamômetro (8).

[0057] A Figura 2 mostra esquematicamente o princípio que ocorre no processo da presente invenção para determinar o atrito entre o cavaco e a superfície da ferramenta. O cavaco é representado pelo contra corpo (3) de forma cilíndrica e a superfície da ferramenta é representada pelo corpo sólido



de forma plana (4). O atrito ocorre quando o contra corpo é pressionado contra o corpo sólido com uma dada rotação. Esta rotação é dada pela velocidade de deslizamento.

[0058] As figuras 3 A e 3B mostram esquematicamente como ocorre o processo da presente invenção. O dinamômetro (8) deve ser posicionado no interior da máquina, a ferramenta (10) é montada no suporte específico (11), o corpo de prova (9) é fixado no eixo árvore da máquina em um suporte (12). A máquina posiciona o corpo de prova (9) próxima à superfície da ferramenta de corte (10). O contato ocorre com a aproximação do corpo de prova (9) à ferramenta de corte (10) de forma linear e constante, este contato deve ser total.

[0059] O contato gera no sistema um carregamento normal que pode ser monitorado com o sistema de aquisição de forças. Deve-se cessar a aproximação do corpo de prova (9) até que se atinja o carregamento desejado. A rotação do corpo de prova (9) irá causar uma força de reação chamada força de atrito que atua perpendicularmente à força normal de carregamento. O coeficiente de atrito do sistema é a relação da força de atrito pela força normal de carregamento.

[0060] Ou seja, a técnica consiste em atritar um corpo de prova (9) com geometria específica e rotação controlada contra a superfície plana de uma ferramenta de corte (10). O atrito é ocasionado pelo movimento linear de aproximação dado pelo corpo de prova, que deverá estar com uma rotação definida, até o contato com a superfície da ferramenta. O esforço normal é dado pelo pressionamento do corpo de prova (9) sobre a superfície da ferramenta de corte (10). O esforço tangencial é dado pelo atrito da rotação do corpo de prova (9) sobre a superfície da ferramenta de corte (10). O

coeficiente de atrito será dado pela relação da força tangencial pela força normal.

[0061] A rotação do corpo de prova (9) é definida pela velocidade tangencial a ser estudada. Para esta aplicação, recomenda-se aproximar a velocidade tangencial da velocidade média do cavaco. Esta velocidade é dada pela relação entre a velocidade de corte do processo pelo grau de recalque. O grau de recalque pode ser calculado dividindo-se a espessura média do cavaco pela espessura de corte.

[0062] Como dito anteriormente, esta técnica necessita ser realizada em uma máquina que possua movimento de rotação ajustável e posicionamento. Assim, recomenda-se o uso de um centro usinagem ou máquina similar. Porém necessita-se que todo o sistema tenha elevada rigidez. Como mencionado, outro equipamento necessário é um sistema de aquisição de forças, um dinamômetro (8), para registrar simultaneamente os esforços tangenciais e normais do processo.

[0063] Como explicado, o corpo de prova (9) é fixado no eixo árvore da máquina com auxílio de algum suporte (11). O corpo de prova (9) juntamente com o suporte (11) não pode apresentar grandes erros de batimento e circularidade. Uma ferramenta (10) com superfície plana é posicionada sobre o dinamômetro (8) com auxílio de um suporte. Este conjunto deve ser montado sobre o sistema de medição de força.

[0064] Para a realização do teste são necessários dois suportes: um para o corpo de prova (9) e outro para a ferramenta (10).

[0065] A fixação do corpo de prova (9) pode ser feita com o sistema de fixação disponível da própria máquina (12). Geralmente os centros de usinagem vêm equipados com um

sistema de fixação de ferramenta rotativa. Assim, para este invento é aproveitado o sistema de fixação de ferramenta rotativa do centro de usinagem para fixar o corpo de prova (9) pelo diâmetro (5).

[0066] Já o suporte da ferramenta (10) deve ser confeccionado para tal fim, devido a grande variedade de tipos geométricos de ferramentas. Este suporte deve garantir que uma superfície plana da ferramenta (10) fique posicionada para receber o carregamento do corpo de prova (9).

[0067] O corpo de prova (9) deve ser feito a partir do material a ser testado. A geometria do corpo de prova (9) apresenta três dimensões principais sendo: o diâmetro (5), o diâmetro do disco (6) e a espessura (7). O diâmetro (5) deve ter valor suficiente para atingir a velocidade tangencial necessária. A espessura (7) deve ser aproximada ao valor da largura de usinagem ou avanço, conforme figura 4.

[0068] Quanto às dimensões do corpo de prova, o diâmetro do disco (6) deve ter dimensão suficiente para satisfazer a condição da velocidade do cavaco. Este diâmetro do disco (6) deve ser de aproximadamente 4mm a 40mm, sendo preferível o diâmetro no intervalo de 16mm a 25mm. Recomenda-se que o diâmetro (5) deve compreender entre 10% a 25% menor que o diâmetro do disco (6). Recomenda-se que o diâmetro (5) tenha a dimensão do sistema de fixação de ferramenta rotativa (12). O diâmetro (5) deve ser grande o suficiente para que o carregamento não cause deformações significativas. Os efeitos da deformação proveniente do carregamento podem ser minimizados com a diminuição do comprimento do corpo de prova. A espessura do disco (7) tem faixa de valor entre

0,5mm a 6mm referente ao processo de formação de cavaco que se deseja simular. Espessuras muito pequenas podem causar a deformação indesejada do disco de toque. A espessura tem o valor aproximado da espessura dada pelo avanço ou profundidade de corte da ferramenta. É válido ressaltar que tanto o diâmetro do disco (6), quanto o diâmetro (5) são características do corpo de prova (9).

[0069] A ferramenta de corte (10) deve possuir uma superfície plana proporcionando um contato tangencial com o diâmetro (5) do corpo de prova (9). Esta superfície necessariamente deve ser maior que a espessura (7) do corpo de prova (9).

[0070] A técnica inicia-se após a montagem do corpo de prova (9) no suporte e da ferramenta sobre o dinamômetro (8) comercial. Posiciona-se o corpo de prova (9) a uma distância superior ao raio do diâmetro (5). O corpo de prova (9) começa a girar na rotação definida para o estudo. Inicia-se a aproximação do corpo de prova (9) contra a superfície da ferramenta. Com o contato, o processo de atrito tem início. A pressão de contato deve ser estabelecida e controlada através do posicionamento do corpo de prova (9). Os esforços do processo devem ser registrados com o sistema de monitoramento de forças.

[0071] O sistema de monitoramento de forças é composto pelo dinamômetro (8), amplificador de sinais, placa de aquisição, programa de tratamento de sinais e computador. O dinamômetro (8) possui um sensor que capta as forças e transforma a intensidade em variação potencial elétrica. O amplificador recebe e trata este sinal que é enviado a uma placa de aquisição acoplada em um computador. O computador

deve ter um programa específico capaz de interpretar estes sinais de força. Após o registro das informações pertinentes do processo, o corpo de prova (9) se afasta da ferramenta até perder o contato encerrando-se o teste.

[0072] Uma importante característica do método da presente invenção é o leque de possíveis aplicações. Com o sistema proposto é possível investigar de forma isolada o efeito do atrito no processo de formação de cavaco.

[0073] Para a realização da técnica, devem ser observados alguns parâmetros (parâmetros de realização da invenção) como, por exemplo, velocidade de deslizamento, carregamento, corpo de prova (contra corpo), ferramenta (corpo sólido), máquina para movimentação linear e rotação, sistema para aquisição de forças.

#### **Determinação da velocidade de deslizamento**

[0074] A velocidade de deslizamento entre o corpo de prova (9) e a ferramenta depende das condições que se deseja investigar, sendo diretamente proporcional à velocidade de corte e inversamente proporcional ao grau de recalque. O grau de recalque pode ser aproximado pela relação da espessura de corte pela espessura do cavaco. Devido às deformações no processo de formação de cavaco esta relação sempre apresenta um valor maior que o unitário.

[0075] Assim, a velocidade de deslizamento que melhor representa o processo pode ser dada pela equação 1 composta pela velocidade de corte (equação 2) e o grau de recalque (equação 3):

$$V_{cav} = \frac{V_c}{R_c} \text{ [m/min]} \quad (1)$$

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (2)$$

$$R_c = \frac{h}{h} \quad (3)$$

[0076] Onde  $V_{cav}$  é a velocidade do cavaco,  $V_c$  é a velocidade de corte,  $d$  é o diâmetro do corpo de prova,  $n$  é a rotação do corpo de prova,  $h'$  é a espessura do cavaco e  $h$  é a espessura de corte.

[0077] De forma similar à equação 2, a rotação utilizada neste invento pode ser calculada pela equação 4:

$$n = \frac{V_{cav} \cdot 1000}{\pi \cdot d} \quad (4)$$

### **Determinação do carregamento**

[0078] Para que ocorra o atrito é necessário que exista uma força normal e movimento relativo entre o corpo de prova e a ferramenta. Esta força normal é chamada de carregamento e o movimento relativo será dado pela rotação do corpo de prova (equação 4). O carregamento é ocasionado pela pressão relativa entre o corpo de prova e a ferramenta. O carregamento pode ser realizado de duas formas, estático ou dinâmico. No carregamento estático, o corpo de prova (9) é pressionado contra a superfície da ferramenta (10) sem movimento rotacional até um valor predefinido. No carregamento dinâmico, o corpo de prova é pressionado com movimento rotacional. O valor do carregamento depende das forças de corte do processo que se deseja simular e se aproxima do valor da força normal à secção de corte.

### **Corpo de prova (9) - contra corpo(3)**

[0079] A Figura 4 mostra uma sugestão de modalidade possível de corpo de prova (9) com suas dimensões principais, o diâmetro do disco (6) e espessura (7). O material do corpo de prova (9) deve ser o mesmo utilizado no processo de usinagem que se deseja simular. A espessura do disco deve-se aproximar ao avanço de corte do processo. Deve-se tomar

cuidado para que o diâmetro (5) seja menor que o diâmetro do disco (6) para que não interfira na área de contato.

[0080] O corpo de prova (9) deve ser fixado com um suporte (11) próprio no eixo de rotação da máquina. Este suporte (11) deve garantir a transmissão da rotação da máquina sem folgas e escorregamentos.

#### **Ferramenta de corte (10) - corpo sólido (4)**

[0081] Uma vantagem deste método consiste na utilização de uma ferramenta de corte (10) com a função do corpo sólido (4), conforme demonstrado na figura 2 e na figura 3, servindo como uma superfície plana onde o corpo de prova (9) será friccionado. O material da ferramenta de corte (10) deve ser o mesmo utilizado no processo que se deseja simular. A ferramenta de corte (10) deve ter pelo menos uma superfície plana.

[0082] Recomenda-se a utilização de ferramentas de corte (10) do tipo pastilha já encontradas comercialmente. A superfície plana indicada para o uso da técnica é a superfície de folga da ferramenta de corte (10). Um suporte específico para a ferramenta deve ser confeccionado para garantir que a ferramenta não se desloque sob os esforços do carregamento.

#### **Máquina para movimentação linear e rotação**

[0083] Uma máquina que possua movimento linear e rotação é necessária para a realização dos testes de atrito desta invenção. As características fundamentais dessa máquina são precisão de movimentação na ordem de milésimos de milímetro e variação de rotação de algumas rotações por minuto até alguns milhares de rotações por minuto. Além disso, deve possuir rigidez suficiente para suportar o carregamento.

[0084] Um exemplo de máquina apropriada que pode ser utilizada é um centro de usinagem. De forma geral, uma máquina deste tipo apresenta os requisitos necessários para a realização desta técnica.

#### **Sistema de aquisição de forças**

[0085] Basicamente, o sistema de aquisição de forças é composto por um dinamômetro (8) e um sistema para gravação dos sinais de força. A escolha do dinamômetro (8) depende do processo de corte que se deseja simular. De forma geral, é desejável que o dinamômetro (8) tenha algumas características listadas a seguir: a resolução do dinamômetro (8) deve ser inferior a 1 newton; a rigidez elevada de pelo menos 500N/ $\mu$ m; deve possuir dois canais para leitura do carregamento e força de atrito.

[0086] O sistema de aquisição deve ser capaz de ler e gravar as informações do dinamômetro (8) de forma rápida e confiável. Esta tarefa pode ser feita com auxílio de um amplificador acoplado em um computador. O amplificador capta os sinais do dinamômetro (8) e envia para um computador previamente preparado para tal função.

#### **Exemplo de Realização da Invenção**

##### **Máquina Ferramenta**

[0087] O desenvolvimento da técnica foi realizado em um centro de usinagem vertical da fabricante HERMLE, modelo C800U, possuindo capacidade de deslocamento de 800mm no eixo X, 600mm no eixo Y e 500mm no eixo Z. O eixo árvore tem potência máxima de 15KW e rotação de 24.000rpm. A máquina é equipada com o CNC Siemens Sinumerik 840D.

#### **Sistema de aquisição de forças**

[0088] Para a aquisição de forças foi utilizado um



dinamômetro (8) do fabricante Kistler modelo 9257BA, possui 3 canais de forças (eixo X, eixo Y e eixo Z), faixas de trabalho  $F_x$  e  $F_y$  de -5KN a 5KN e  $F_z$  -5KN a 10KN. A frequência natural é 4 KHz e a rigidez é 1000 N/ $\mu$ m.

[0089] O dinamômetro (8) utilizado se baseia no princípio piezelétrico onde os esforços são convertidos em variação de tensão. Essa tensão foi amplificada por um amplificador de carga do fabricante Kistler modelo 5233A para três canais.

[0090] Os sinais gerados pelo dinamômetro (8) passam pelo amplificador de carga e são captados por uma placa de aquisição acoplada no computador. Neste, há um programa específico para o tratamento dos sinais e plotagem dos gráficos de força.

#### **Ferramenta**

[0091] A ferramenta utilizada como corpo sólido foi do tipo pastilha (inserto) quadrado com 12mm de lado, 4mm de espessura de metal duro. A ferramenta utilizada pertence a classe ISO K10-K20.

#### **Corpo de prova (9)**

[0092] O corpo de prova foi confeccionado a partir de uma barra de aço AISI 1045 laminada com diâmetro de aproximadamente 19,05mm. O diâmetro do disco tem 18,5mm, espessura inicial de 1,4mm e o diâmetro superior de 16mm.

#### **Resultado do Coeficiente de Atrito**

[0093] A figura 5 mostra o resultado de um teste realizado com as seguintes condições: diâmetro do disco (6): 18,5mm; espessura inicial: 1,4mm; rotação: 1290rpm; velocidade de deslizamento: 75m/min; carregamento dinâmico: 150N; tempo do teste: 30 segundos.

[0094] A figura 5 mostra três curvas, a força de atrito,

a força tangencial e o coeficiente de atrito. Nota-se que as curvas de força podem ser divididas em duas partes distintas, a primeira com uma inclinação mais elevada seguida de uma inclinação mais suave. A primeira parte representa o carregamento dinâmico, onde o corpo de prova estava girando ao ser pressionado contra a ferramenta. Com o cessar do carregamento há um aumento das forças de corte devido à geração de calor e dilatação do corpo de prova. Mesmo com o aumento das forças, o coeficiente de atrito se mantém estável no período do teste, em torno de 0,4.

[0095] Embora a versão preferida da invenção tenha sido ilustrada e descrita, deve ser compreendido que a invenção não é limitada. Diversas modificações, mudanças, variações, substituições e equivalentes poderão ocorrer, sem desviar do escopo da presente invenção.

### **REIVINDICAÇÕES**

1- Método de determinação dos efeitos do atrito na interface cavaco-ferramenta **caracterizado** pelo fato de compreender as etapas abaixo:

a) Preparação dos materiais a serem investigados consiste na fabricação de corpos de prova (9) e dispositivos de fixação;

b) Montagem da bancada do sistema tribológico que consiste no meio (1), contra corpo (3) e corpo sólido (4);

c) Aplicação do carregamento dinâmico ou estático e deslizamento do corpo de prova contra a superfície da ferramenta; e

d) Aquisição de dados para estudo dos efeitos por meio de um dinamômetro (8) e um sistema de gravação dos sinais de força que registram simultaneamente os esforços tangenciais e normais do processo.

2- Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "a", o corpo de prova (9) é do mesmo material que se deseja estudar o atrito.

3- Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** pelo fato de que o corpo de prova (9) possui três dimensões principais o diâmetro (5), o diâmetro do disco (6) e a espessura (7).

4- Método, de acordo com a reivindicação 3, **caracterizado** pelo fato de que o diâmetro (5) que varia de 3 a 36mm seja entre 10 a 25% menor que o diâmetro de disco (6).

5- Método, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado** pelo fato de que o diâmetro (5) varia preferencialmente de 16 a 25mm.

6- Método, de acordo com a reivindicação 3,

**caracterizado** pelo fato de que a espessura (7) varia de 0,5 a 6mm e deve ser aproximada ao valor da largura de usinagem ou avanço.

7- Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "a", o corpo de prova (9) é confeccionado preferencialmente pelo processo de torneamento cilíndrico externo.

8- Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "b", o sistema tribológico pode compreender adicionalmente elementos interfaciais (2).

9- Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "b", o meio (1) é preferencialmente ar atmosférico.

10- Método, de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "b", os elementos interfaciais (2) são preferencialmente óleos ou lubrificantes.

11- Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "b", o corpo de prova (9) é utilizado como contra corpo (3).

12- Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "b", a ferramenta de corte (10) é utilizada como corpo sólido (4).

13- Método, de acordo com a reivindicação 12, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "b", a ferramenta de corte (10) utilizada como corpo sólido (4) tem pelo menos uma superfície plana e funciona como superfície plana para a fricção do corpo de prova (9).

14- Método, de acordo com a reivindicação 1,

**caracterizado** pelo fato de que na etapa "b", o corpo de prova (9) é fixado a uma distância superior ao raio do diâmetro (5), no eixo árvore da máquina com auxílio de um suporte para fixação (11) específico da máquina (12) pelo diâmetro (5) e a ferramenta de corte (10) fixada por suporte próprio sobre um dinamômetro (8), que por sua vez é fixado sobre a mesa da máquina.

15- Método, de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "b", o suporte (11) confeccionado ou adaptado para a ferramenta de corte (10) garante a transmissão dos esforços do corpo de prova (9) para o dinamômetro (8).

16- Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "c", a máquina posiciona o corpo de prova (9) próxima à superfície da ferramenta de corte (10) ocorrendo o contato total de forma linear e constante.

17- Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que no carregamento estático o corpo de prova (9) é pressionado contra a ferramenta de corte (10) sem movimento rotacional até um valor pré-definido.

18- Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que no carregamento dinâmico o corpo de prova (9) é pressionado contra a ferramenta de corte (10) com movimento rotacional.

19- Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "c", o contato gera no sistema tribológico um carregamento normal monitorado por um sistema de aquisição de forças.

20- Método, de acordo com a reivindicação 16,

**caracterizado** pelo fato de que na etapa "c", a rotação do corpo de prova (9) com geometria específica ocorre com rotação controlada e avança linearmente sobre a superfície plana da ferramenta de corte (10) até o contato com a superfície plana da ferramenta de corte (10) e o registro do carregamento desejado.

21- Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "c", o contato deve ser cessado quando a aproximação do corpo de prova (9) atinge o carregamento desejado.

22- Método, de acordo com a reivindicação 21, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "c", a rotação do corpo de prova (9), após cessar a aproximação, causa uma força reacional de atrito que atua perpendicularmente à força normal de carregamento.

23- Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "c", o esforço normal é dado pelo pressionamento do corpo de prova (9) sobre a superfície da ferramenta de corte (10).

24- Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "c", o esforço tangencial é dado pelo atrito da rotação do corpo de prova (9) sobre a superfície da ferramenta de corte (10).

25- Método, de acordo com a reivindicação 23 e 24, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "c", o coeficiente de atrito é dado pela relação da força tangencial pela força normal.

26- Método, de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "c", a rotação do corpo de prova (9) é definida pela velocidade tangencial que

deve ser preferencialmente a velocidade tangencial da velocidade média do cavaco dada pela relação entre velocidade de corte do processo pelo grau de recalque.

27- Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de na etapa "d", o dinamômetro (8) possuir resolução inferior a 1 newton, rigidez elevada de pelo menos 500N/ $\mu$ m e possui dois canais para leitura do carregamento e força de atrito.

28- Método, de acordo com a reivindicação 27, **caracterizado** pelo fato de que na etapa "d", o sistema de aquisição lê e grava as informações do dinamômetro (8) preferencialmente com auxílio de amplificador acoplado a um computador.

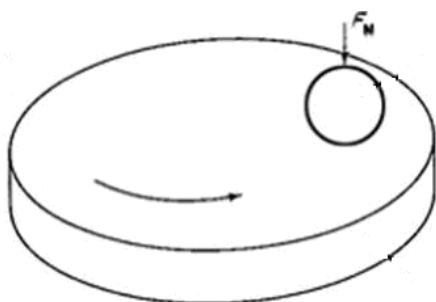


Figura 1A

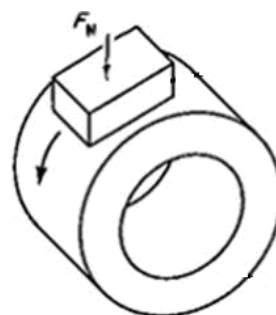


Figura 1B

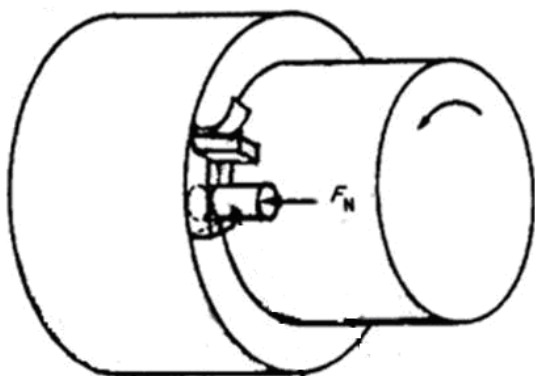


Figura 1C

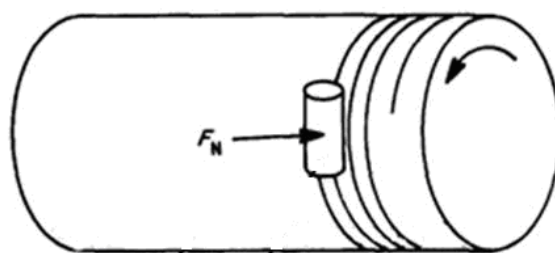


Figura 1D

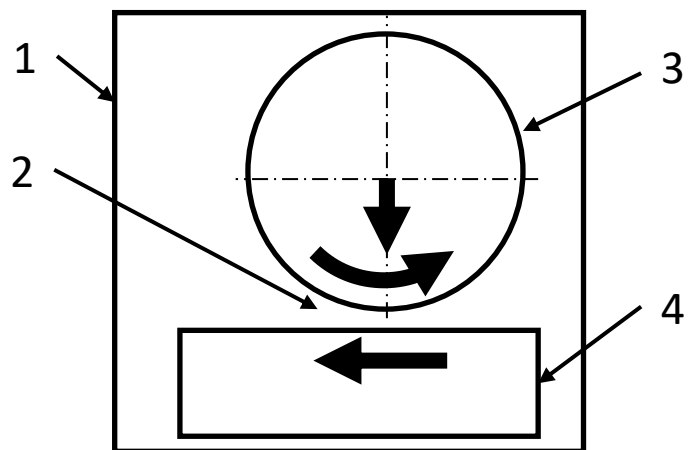
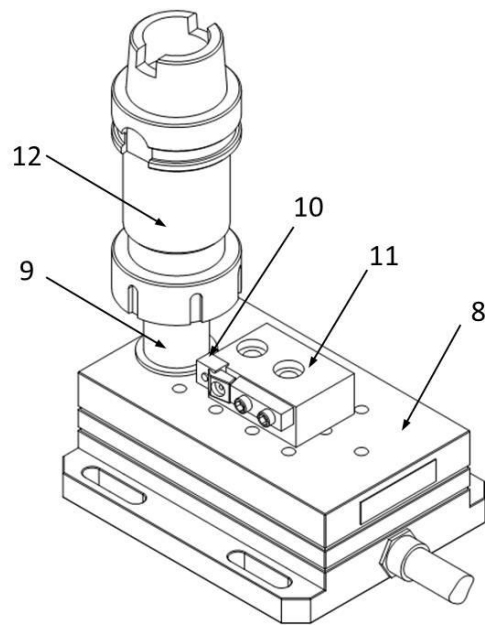
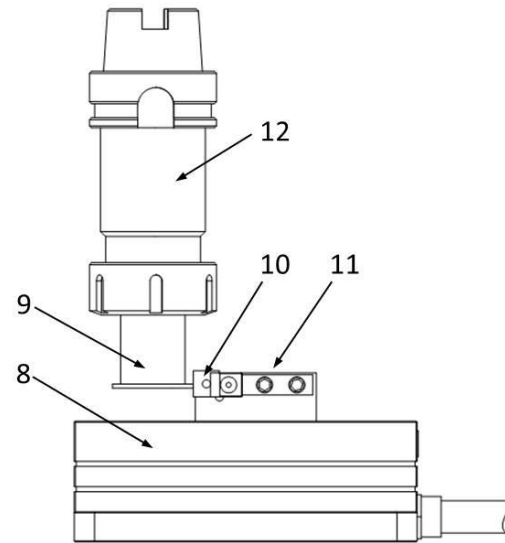


Figura 2

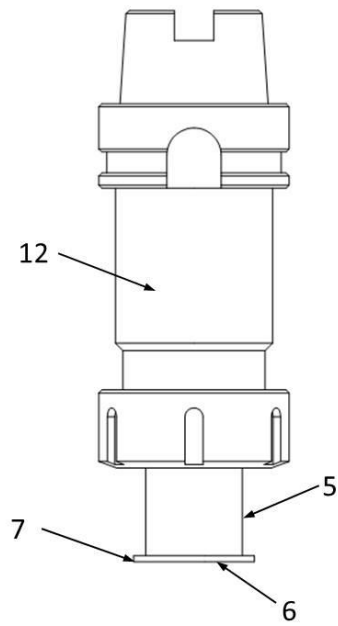




**Figura 3A**



**Figura 3B**



**Figura 4**

