



**República Federativa do Brasil**  
Ministério da Indústria, Comércio Exterior  
e Serviços  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) PI 0405764-3 B1**

**(22) Data do Depósito:** 17/12/2004

**(45) Data de Concessão:** 25/07/2017



**(54) Título:** EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NA USINAGEM DOS MATERIAIS

**(51) Int.Cl.:** G01L 5/00; G01L 3/00

**(73) Titular(es):** UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**(72) Inventor(es):** REGINALDO TEIXEIRA COELHO; ALESSANDRO ROGER RODRIGUES

## **“EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NA USINAGEM DOS MATERIAIS”**

[001] O invento abaixo descrito refere-se a uma máquina pendular instrumentada e ao respectivo método de ensaio destinado à medida da energia específica de corte, grandeza importante no cenário das pesquisas em usinagem dos materiais.

[002] O invento, em linhas gerais, é formado por um aparato mecânico, hardware para aquisição eletrônica de dados e software para aquisição e tratamento dos sinais. O aparato mecânico é constituído das seguintes partes: estrutura principal em ferro fundido; eixo de giração; haste pendular; suportes das ferramentas de corte; dinamômetro piezoelétrico; encoder incremental angular. Além do aparato mecânico estrutural, o equipamento é formado pelo hardware, que é um circuito eletrônico para alimentação do encoder incremental angular e conversão DA do sinal, e software de aquisição e pós-processamento dos sinais de força e ângulo.

### **Descrição das etapas do invento**

[003] Construção Mecânica: Basicamente trata-se da estrutura física da máquina. Em resumo, constitui-se de uma estrutura principal de ferro fundido (base e “U” invertido), um eixo, denominado “eixo de giração”, montado em mancais de rolamento na parte superior, uma haste pendular fixa ao eixo de giração e, por fim, um conjunto mecânico regulável, assim denominado “suportes de ferramentas”, rigidamente fixado na base de ferro fundido e no dinamômetro piezoelétrico. A instrumentação da máquina utiliza um dinamômetro piezoelétrico e um ecoder incremental angular.

[004] A Figura 1 apresenta de forma ampla a parte mecânica

do invento. É possível visualizar, além da estrutura rígida do equipamento, a haste pendular com a massa concentrada em uma das extremidades e o alojamento do corpo-de-prova. A haste pendular é formada por chapas metálicas com 12 mm de espessura soldadas. Na parte superior contém um prisma bipartido com furo e rasgo de chaveta para fixação do pêndulo ao eixo de rotação da máquina. Na sua parte inferior foi soldado um cilindro com abas simetricamente dispostas para concentra a massa do pêndulo. Por fim, no centro de massa da haste pendular, o corpo-de-prova é alojado devidamente e alinhado em um dispositivo retificado por meio de uma cunha de aperto.

[005] A Figura 1 ainda traz uma visão aproximada dos suportes das ferramentas. Cada subconjunto, lado direito e esquerdo da trajetória pendular, apresenta regulagem manual nos três eixos ortogonais x, y e z para ajustes e posicionamentos da ponta da ferramenta. O deslocamento total em cada direção é de 20 mm com ajuste fino de até 8,25 mm. Uma regulagem para variar o ângulo de saída da ferramenta também foi implementada. Parafusos de encosto com contra-porca permitem uma rotação dos mancais entre  $-15^\circ$  (ângulo de saída negativo) a  $34^\circ$  (ângulo de saída positivo).

[006] Após a montagem mecânica finalizada, o equipamento foi submetido a diversos testes e normalizações para avaliação de seu desempenho, os quais são citados abaixo:

1. análise de erro experimental do conjunto;
2. determinação da rigidez estática dos suportes das ferramentas;
3. medição experimental, numérica e analítica da posição do centro de massa da haste pendular (NORMA ASTM E-23/91);

4. cálculo da energia consumida devido ao atrito entre os mancais de rolamento do eixo de rotação e ao atrito do pêndulo com o ar (NORTMA ASTM 1236/91);
5. calibração do dinamômetro piezoelétrico e do encoder incremental angular;
6. desenvolvimento da expressão matemática de recorrência, baseada na conservação da energia mecânica, que fornece o valor da energia responsável por promover uma unidade de volume de cavaco.

[007] Desenvolvimento do Hardware: O circuito eletrônico projetado para compor o sistema de aquisição de sinais do ensaio de energia específica de corte na máquina pendular instrumentada está dividido em duas ramificações: a primeira trata da aquisição dos sinais provenientes do dinamômetro e a segunda dos pulsos emitidos pelo encoder angular incremental. A Figura 2 traz o circuito na sua forma esquemática.

[008] Pelo dinamômetro podem ser obtidas as forças nas direções ortogonais  $x$ ,  $y$  e  $z$ , as quais, nas denominações de usinagem, correspondem às forças de corte, de avanço e passiva.

[009] Uma das formas de obter a grandeza de interesse é pela integração numérica da força de corte no tempo em conjunto com a velocidade de corte.

[010] O encoder angular incremental destina-se à medição precisa do ângulo percorrido pela haste pendular, desde a posição de abandono até sua parada após a remoção de cavaco do corpo-de-prova. Com a diferença angular decorrente da perda de energia devido à geração de cavaco, pode-se determinar a energia específica de corte.

[011] Considerando o apresentado acima, o hardware desenvolvido promove a aquisição das três componentes

analógicas do sinal de força e do ângulo do encoder, sinal caracteristicamente digital. Basicamente, o circuito é constituído por duas fontes de tensão em corrente contínua, dois acopladores óticos e quatro resistências elétricas.

[012] As componentes das forças de usinagem não necessitam ser processadas pelo circuito eletrônico, uma vez que o sinal é analógico. Por outro lado, os sinais de encoder incremental angular precisam ser convertidos em analógico e sincronizados ao sinal de força. Esse é o motivo pelo qual o hardware foi desenvolvido.

[013] O encoder é alimentado com uma tensão de 5 V, conforme especificações do fabricante. Da mesma forma, os acopladores óticos recebem uma tensão de 1 V cada um. Os valores das resistências elétricas foram calculados para completar o circuito e não gerar corrente infinita.

[014] Desenvolvimento do Software: As rotinas computacionais necessárias ao ensaio de medida da energia específica de corte na máquina pendular são divididas na aquisição dos sinais e no pós-processamento dos resultados. As funções da rotina computacional de aquisição se dividem em duas partes distintas, porém sincronizadas entre as componentes de força e o deslocamento angular.

[015] Os sinais das forças de usinagem, provenientes do próprio módulo de aquisição do dinamômetro, já são convencionalmente analógicos. Neste caso, a rotina apenas promove a leitura dos canais  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ , aplica o fator de calibração, constrói os gráficos das forças no tempo e executa a gravação dos vetores de força.

[016] Para o sinal de ângulo, a rotina é mais complexa. Ela faz a leitura do sinal analógico já reproduzido pelo circuito

apresentado na Figura 2, calcula a quadratura, para aprimorar a resolução de encoder de 2.500 para 10.000 pontos por revolução, calcula o vetor da velocidade instantânea, constrói o gráfico ângulo vs tempo e, por fim, grava os vetores. Ao final de toda a aquisição e processamento, todos os resultados gráficos e numéricos são mostrados na tela e gravados em um arquivo “txt”, na forma de cinco colunas na ordem, a saber: tempo, ângulo,  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ .

[017] O trabalho de pós-processamento dos sinais inicia-se com a leitura da matriz de dados (tempo, ângulo,  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) originada pelo software de aquisição e através de uma janela de entrada de dados, fornece-se à rotina computacional os valores necessários ao cálculo da energia específica de corte e outros resultados igualmente importantes.

[018] Os dados constantes são: massa do pêndulo, aceleração da gravidade e raio de giração do pêndulo.

[019] Os outros não fixados são: massa específica do material ensaiado, número do ensaio, número de controle do corpo-de-prova e parâmetros de corte utilizados.

[020] Após essa etapa, o software efetua algumas correções necessárias no sinal, tais como janelamento, filtragem e correção de zero.

[021] Uma vez tendo sido definidos todos os parâmetros de entrada, a rotina computacional, de fato, calcula as variáveis de interesse e as torna disponível para análise gráfica e numérica, esta última na forma de um relatório de ensaio com todas as identificações possíveis destinadas ao controle efetivo do teste.

[022] Os resultados numéricos gerados são os seguintes: tempo de corte, velocidade de corte máxima, força  $F_x$  média e máxima, forças  $F_y$  e  $F_z$  máximas, energia dada pelos sinais de

encoder, energia dada pela integração do sinal de força  $F_x$  e, finalmente, a energia específica de corte. Graficamente a rotina dornece todas as componentes da força de usinagem, deslocamento angular e velocidade tangencial do centro de massa da haste pendular, todos em função do tempo de ensaio.

[023] Outros resultados complementares são determinados para verificações, como área da seção de corte, ângulo e altura iniciais do pêndulo e ângulo e altura finais do pêndulo.

### **Estado da Técnica**

[024] Como é de conhecimento dos pesquisadores e usuários de equipamentos para ensaios de usinagem e testes mecânicos, não se tem no mercado um invento igual a este em pauta aqui apresentado. É bem verdade que a técnica assemelha-se ao ensaio mecânico destrutivo Charpy, desenvolvido por Augustin Georges Albert Charpy e divulgado em setembro de 1901 em Budapeste. No entanto, a paridade devido ao movimento pendular cessa quando, ao invés de fraturar um corpo-de-prova entalhado, o presente invento promove a remoção de cavaco, medindo precisamente a energia consumida por unidade de volume. Outros pesquisadores, valendo-se da mesma técnica pendular, procuraram propor testes de usinagem, dentre os quais citam-se W. Leyensetter em 1927, para avaliação de desgaste de ferramentas e M. Ehrenreich em 1958 para determinar a força de corte. Os casos extraídos da literatura acadêmica são distintos do presente invento. Entre tantas outras diferenças, o objetivo do ensaio é medir a energia específica, as ferramentas de corte são estacionárias, o corpo-de-prova é fixo na haste pendular, a haste pendular é modificada e a instrumentação da máquina é inovadora, com foco na precisão dos resultados. Dessa forma, o equipamento e o respectivo método de ensaio ora proposto vem

acrescentar ao rol de ensaios destinados às pesquisas em usinagem dos materiais.

#### Vantagens da Invenção

[025] Algumas vantagens acerca do equipamento e da aplicação do mérito de ensaio desenvolvido são detalhadas e discutidas a seguir.

- O equipamento completo, com o aparato mecânico instrumentado acrescido do sistema de aquisição e pós-processamento de sinais, apresenta um baixo custo em relação às máquinas-ferramentas CNC utilizadas nos dias atuais;
- A representatividade da dinâmica de formação de cavaco compactua com a de máquinas-ferramentas;
- A rigidez estrutural do equipamento condiz com a de máquinas ferramentas;
- A geometria prismática simplificada dos corpos-de-prova permite uma fabricação rápida, precisa e em grande número;
- A intercambiabilidade de corpos-de-prova e das ferramentas de corte é rápida e acessível;
- A fácil operação do equipamento possibilita que uma única pessoa realize um sem número de ensaios;
- A regulagem das condições de ensaio, tanto dos parâmetros de corte como do posicionamento das ferramentas de corte é flexível e rápida;
- O método de ensaio pode ser aplicado em testes com estudos sobre índices de usinabilidade de materiais metálicos comuns e novos materiais, incluindo ligas metálicas de alta resistência e materiais não-metálicos, como compósitos e polímeros.



- A área de testes na máquina, onde se dá a usinagem do corpo-de-prova, permite a captura do cavaco para análise metalográfica e microscópica;
- O desempenho de ferramentas de corte também pode ser avaliado, com enfoque na microgeometria da aresta de corte, geometria do quebra-cavaco, revestimento e substrato;
- O método de ensaio pode ser aplicado no estudo tecnológico ou acadêmico do comportamento dos parâmetros de corte em relação aos esforços de corte e energia específica de corte;
- A técnica pode ser empregada como sistema de garantia de qualidade, na expedição ou recebimento de produtos ou matérias-primas, tais como novos materiais ou ferramentas lançadas no mercado;
- Os parâmetros de ensaio são ajustados no equipamento, como profundidade de usinagem, ajustada por meio de um parafuso de rosca fina que faz movimentar ortogonalmente a extremidade do inserto em direção ao corpo-de-prova, ângulo de saída do suporte das ferramentas é ajustado através de um parafuso de encosto e contra-porca, montando na posição traseira dos mancais de rolamento verticais e velocidade de corte determinada pela posição de abandono do pêndulo, cuja faixa de trabalho vai de 0 a 330m/min.
- O software de aquisição de dados constrói as curvas características do teste e gera um arquivo de saída, destinado ao software de pós-processamento dos dados, que calcula, entre diversos resultados de interesse, a energia específica de corte.
- O volume de material removido pode ser obtido pela

massa de cavaco ou calculado matematicamente considerando a área e o comprimento de corte.

[026] Para que se tenha uma clara visão do invento, a Figura 1 traz um panorama geral do equipamento, através da qual é possível esclarecer as características diferenciais e inovatórias da máquina e do método de ensaio.

[027] Os dispositivos funcionais ou, equivalentemente, os sensores da instrumentação estão ampliados e são mostrados à direita da figura. Observa-se acima o encoder incremental angular fixado ao eixo de rotação da haste pendular. Não se tem notícia no meio científico e tecnológico de máquinas pendulares com encoder de alta precisão instalados em seu eixo de rotação.

[028] Logo abaixo, ainda à direita da imagem, vê-se o dinamômetro piezoelétrico montado na estrutura rígida do equipamento. Ainda é possível visualizar parte dos suportes das ferramentas de corte fixado ao dinamômetro.

[029] A mesma analogia inovatória pode ser atribuída para este caso, ou seja, a ideia diferencial reside no posicionamento das ferramentas de corte na base estrutural na máquina para facilitar a regulação, minimizar vibrações e otimizar o processo de formação de cavaco.

[030] Ao centro da figura, nota-se o equipamento completo, onde a haste pendular pode ser vista com o corpo-de-prova devidamente alojado na posição de ensaio. Ressalta-se que o desenvolvimento e construção do pêndulo estão fundamentados nas normas da ASTM mencionadas anteriormente, que estabelecem a posição correta do centro de massa da haste e determina métodos de estimativa das perdas aceitáveis de energia por atrito.

[031] Finalmente, à esquerda da figura encontra-se em

detalhe frontal todo o conjunto dos suportes das ferramentas de corte.

[032] Nota-se a ortogonalidade da montagem mecânica, os rasgos de regulação da posição dos insertos e os mancais de rolamento, montados em cada cilindro vertical. Da mesma forma, não há indicativos de um equipamento similar no mercado industrial ou no meio científico.

[033] Concluindo, a máquina pendular instrumentada para medida da energia específica de corte na usinagem dos materiais, bem como o método de ensaio proposto, apontam para uma técnica promissora pelas vantagens ora apresentadas, pela durabilidade do equipamento e pelo efeito técnico e acadêmico causado.

[034] O invento aqui demonstrado alcança as exigências necessárias ao objetivo preteado, pela funcionalidade, versatilidade e incorporação de aspectos inovatórios capazes de atender plenamente às necessidades dos usuários, garantindo durabilidade, favorável custo benefício e ampla faixa de aplicação.

[035] Por estas vantagens, ausência de estado da técnica e pelo efeito causado, o presente invento reúne as condições necessárias para alcançar o privilégio pleiteado.

## REIVINDICAÇÕES

**1. EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NA USINAGEM DOS MATERIAIS** composto por uma máquina para medição de energia dividida em: parte mecânica, hardware e software rotinas computacionais de aquisição e tratamento pós processamento dos sinais de força do dinamômetro e ângulo do encoder, além de circuito eletrônico para aquisição conversão de sinais digitais do encoder em analógicos e dinamômetro, caracterizado por ser o aparato mecânico constituído de estrutura principal em ferro fundido; eixo de rotação do pêndulo; haste pendular na qual é colocado e fixado o corpo-de-prova, do qual ocorre a remoção do material em forma de cavaco na posição mais baixa da trajetória pendular; suportes das ferramentas, nos quais são presas as ferramentas de corte que removem cavaco; dinamômetro piezolétrico, que mede força de corte; encoder incremental angular que mede ângulo percorrido pelo pêndulo, além de programa computacional de aquisição que promove a captura dos sinais de força de corte e deslocamento angular do pêndulo, sendo que tanto o corpo-de-prova como os cavacos removidos podem ser recolhidos após a remoção do material, identificados e armazenados para análise posterior do processo de formação do cavaco e da usinagem realizada no corpo-de-prova dos sinais de força e ângulo, por meio de ferramenta computacional de pós processamento.

**2. EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NA USINAGEM DOS MATERIAIS**, caracterizado por possibilitar a medição da

energia específica de corte por meio do movimento pendular, sendo a velocidade de corte determinada pela posição de abandono do pêndulo, cuja faixa de trabalho vai de 0 a 330 m/min.

**3. EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NA USINAGEM DOS MATERIAIS, caracterizado por** possibilitar que o volume de material removido seja obtido pela massa de cavaco ou calculado matematicamente considerando a área transversal e o comprimento de corte.

**4. PROCESSO DE MEDIÇÃO DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NA USINAGEM DOS MATERIAIS,** utilizando equipamento definido nas reivindicações 1 a 3, **caracterizado por** compreender as etapas de:

- Colocar e Fixar o corpo-de-prova no alojamento da haste pendular;
- Fixar os insertos de corte nos suportes das ferramentas;
- Ajustar a profundidade de corte por meio de um parafuso de rosca fina que faz movimentar ortogonalmente a extremidade do inserto em direção ao corpo-de-prova;
- Ajustar o ângulo de saída do suporte das ferramentas através de um parafuso de encosto e contra-porca, montado na posição traseira dos mancais de rolamento verticais;
- Soltar a haste pendular da altura desejada para que o corpo-de-prova tenha material removido na forma de cavaco na posição mais baixa da trajetória pendular;

- Recolher, identificar e armazenar o corpo-de-prova e os cavacos para análise do processo de formação de cavaco e da usinagem realizada no corpo-de-prova;
- Analisar e calcular as variáveis desejadas por meio de programas computacionais de aquisição que constroem curvas características do teste e de pós-processamento de dados que calcula os resultados de interesse;
- Calcular a energia específica de corte por meio de rotina computacional de pós-processamento dos sinais de força do dinamômetro e de ângulo do encoder.

**FIGURA 1**

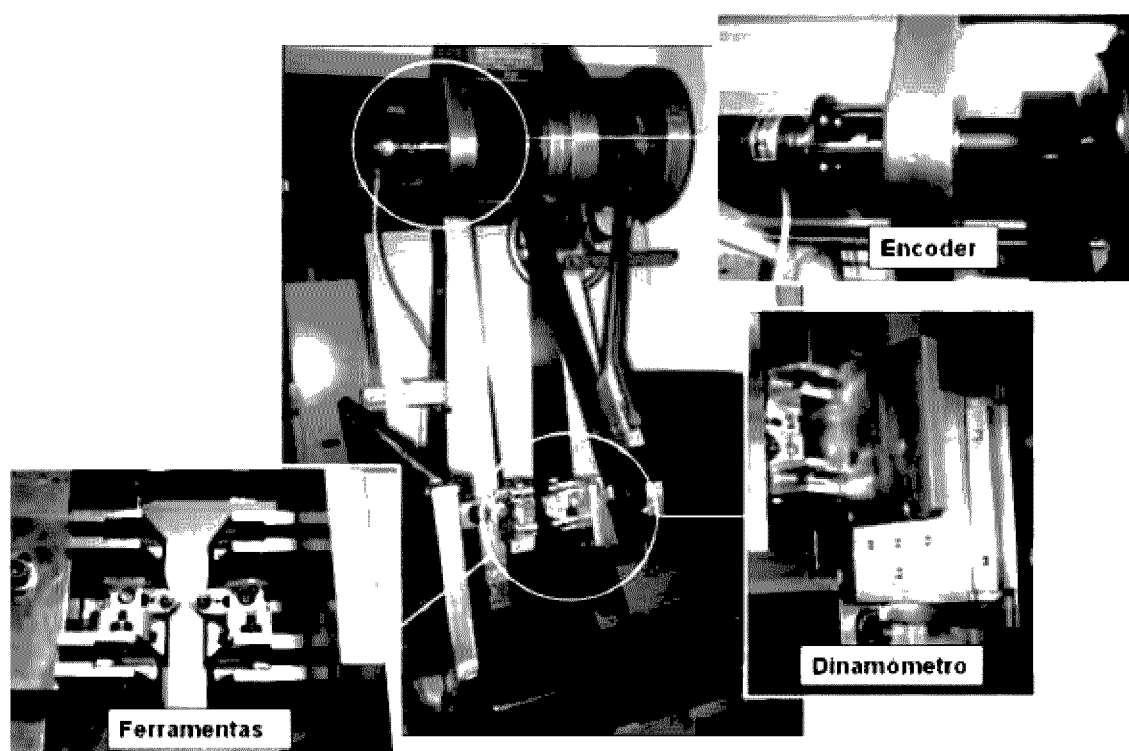


FIGURA 2

