



## MEDIÇÃO E ANÁLISE DE FORÇAS NA USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO DE MATERIAIS DE COMPORTAMENTO DURO E FRÁGIL

**Rolf Bertrand Schroeter**

Universidade Federal de Santa Catarina  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP  
Caixa Postal - 476 - EMC  
Campus Universitário - Trindade  
88.040-970 - Florianópolis - SC  
Fone: (048) 331 9395 ou 234 5277  
Fax: (048) 234 1519  
e-mail: rolf@lmp.ufsc.br

***Resumo.** A usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante monocristalino é um processo de fabricação com importância crescente, principalmente na produção de peças com extrema qualidade superficial, de forma e dimensional em materiais metálicos e poliméricos para as áreas óptica, eletrônica e mecânica. Entretanto, para a aplicação desta tecnologia também na fabricação de peças em materiais de comportamento duro e frágil, como os cristais infravermelhos, é necessário um profundo conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante a usinagem destes materiais. Uma ferramenta útil na compreensão destes fenômenos é, entre outras, a análise das forças de usinagem. Este artigo apresenta e discute as principais características de um sistema desenvolvido para medição de forças na usinagem de ultraprecisão e alguns dos resultados obtidos na medição de forças durante a usinagem com diamante monocristalino dos cristais infravermelhos sulfeto de zinco, Cleartran® e germânio.*

***Palavras-chave:** Usinagem de ultraprecisão, Forças de usinagem, Cristais infravermelhos.*

### 1. INTRODUÇÃO

A usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante monocristalino teve, nos últimos anos, um desenvolvimento rápido e uma aplicação cada vez mais intensa nas indústrias eletro-eletrônica, óptica, optoeletrônica, micromecânica e de mecânica de precisão. Enquanto atualmente esta tecnologia encontra-se estabilizada para a produção de elementos ópticos em metais não-ferrosos, principalmente ligas de cobre e alumínio, aumenta cada vez mais o interesse de sua aplicação para a produção de elementos ópticos transmissivos em materiais duros e frágeis. Pesquisas intensas nos últimos anos possibilitaram o emprego deste processo de fabricação de precisão para uma série de materiais que há poucos anos ainda

tenham como única opção de trabalho a seqüência clássica de fabricação de elementos ópticos transmissivos, qual seja, a retificação, a lapidação e o polimento.

A tecnologia de usinagem com diamante monocristalino em máquinas de ultraprecisão comandadas numericamente revolucionou a fabricação de peças de altíssima precisão, principalmente para a produção de elementos ópticos anesféricos. Este processo de fabricação, caracterizado mais pela qualidade do que pela quantidade dos elementos produzidos, tem garantido um lugar de destaque na tecnologia de fabricação do futuro. O emprego de superfícies anesféricas no projeto de sistemas ópticos permite, além de um incremento na qualidade das características ópticas, uma redução do número de elementos ópticos. Assim são também reduzidos os custos com material, o peso e o volume necessário para a montagem do sistema completo.

Para algumas aplicações uma solução somente é viável através do uso de elementos anesféricos. Principalmente para os materiais assim chamados de "infravermelhos", por serem transmissivos em regiões do espectro infravermelho, os custos com material são bastante elevados e não podem ser desprezados. Elementos ópticos usinados otimamente por diamante freqüentemente não necessitam de um polimento de acabamento, de forma que os custos e tempos de fabricação por este processo podem resultar menores que através de processos convencionais (Schroeter, 1997).

Os materiais infravermelhos são materiais semi-condutores, cristalinos e que tem características frágeis, o que exerce uma grande influência sobre a usinabilidade e sobre a qualidade possível de se obter. Tais materiais têm aplicação em sistemas LASER, telescópios infravermelhos, câmeras térmicas, aparelhos para visão noturna e sistemas de mira, entre outras aplicações, de modo que se faz necessário encontrar alternativas para produção de elementos ópticos nestes materiais com qualidade cada vez maior sem que os custos decorrentes do processo de fabricação sejam demasiados.

Os conhecimentos obtidos através de pesquisas no campo da usinagem de ultraprecisão de metais não-ferrosos, que tem um comportamento dúctil durante o processo de formação de cavacos, não podem ser integralmente aproveitados para a determinação do processo de usinagem dos materiais infravermelhos, que pelo seu comportamento frágil apresentam características próprias e uma série de dificuldades de fabricação. A formação de cavacos na usinagem de elementos ópticos transmissivos em cristais infravermelhos e os parâmetros ótimos de usinagem para que se tenha uma fabricação segura e reproduzível até o momento só foi estudada em profundidade, entretanto, para alguns poucos materiais. Um conhecimento profundo destas condições e um domínio do processo de trabalho é, entretanto, o que de mais importante há para a introdução de uma tecnologia de fabricação inovativa como um processo de fabricação amadurecido e economicamente viável.

A usinagem de ultraprecisão com ferramentas de diamante apresenta problemas que normalmente não são encontrados na usinagem convencional. O aumento exponencial das forças específicas em regiões onde a espessura de usinagem é muito pequena e a flutuação periódica no nível de forças é um fenômeno conhecido. Estas flutuações podem ser relacionadas mais ao mecanismo de formação de cavacos e às alterações na orientação cristalina dos materiais usinados do que propriamente a problemas decorrentes da máquina-ferramenta, visto serem estas normalmente mecanicamente muito rígidas e dimensionalmente estáveis (Schroeter, 1997, Lee, 1989).

A importância da medição de forças na usinagem já é reconhecida há muitos anos. No caso da usinagem convencional o comportamento das forças durante o processo de remoção de cavacos é um assunto extensamente estudado, e mesmo para a usinagem de ultraprecisão de metais não-ferrosos já foram realizadas diversas pesquisas sobre o comportamento das forças na usinagem. Entretanto, até o momento são poucos os trabalhos dedicados ao

problema de medição dos valores absolutos das forças e à análise de sua variação em função das variáveis de trabalho na usinagem de ultraprecisão de materiais de comportamento duro e frágil. Isto ocorre principalmente em função das grandes dificuldades metrológicas existentes. O nível de forças na usinagem de ultraprecisão destes materiais encontra-se normalmente em patamares muito baixos, caracteristicamente bem abaixo de 1 N, e a dinâmica dos sinais de força que usualmente ocorrem durante a usinagem de materiais frágeis é elevada. Nas condições reais de trabalho para que seja possível a usinagem dúctil de materiais frágeis, ou seja, onde os avanços e as profundidades de corte não ultrapassam os valores de alguns poucos micrometros, são freqüentes forças de corte e passivas com valores abaixo de 50 mN.

Com o intuito de resolver alguns dos diversos problemas relacionados à medição de forças na usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis e, principalmente, para conhecer melhor o comportamento de cristais infravermelhos durante a usinagem com diamante, foi projetado, construído e testado um sistema para medição de forças de usinagem ultrapequenas, para níveis de força até um limite inferior a 10 mN. Com uma análise detalhada destas forças procura-se com este trabalho contribuir para um maior conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante a usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, de modo a permitir a produção otimizada de elementos ópticos transmissivos no espectro infravermelho com o uso desta tecnologia.

## **2. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇAS NA USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO**

O projeto e construção de sistemas de medição de forças para a usinagem de ultraprecisão implica na análise e solução de problemas não-triviais. A dificuldade para a execução desta tarefa encontra-se principalmente no fato de que se por um lado é necessária uma grande sensibilidade no sistema para perceber níveis de força muito pequenos, o que significa ter um sistema de rigidez não muito elevada, por outro lado uma rigidez insuficiente do sistema de medição pode levar à ocorrência de vibrações e alterações de posição da ferramenta. Isto, por sua vez, pode resultar em erros nos resultados. Ao mesmo tempo em que se deseja uma elevada sensibilidade em um sistema de medição de força, deseja-se portanto também uma rigidez suficiente, o que leva à necessidade de se estabelecer um compromisso entre estas duas características opostas. No caso da usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, a medição de forças de usinagem é ainda mais crítica, visto que a maioria destes materiais, além de apresentarem forças de corte e passivas em níveis inferiores às que surgem na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos, apresentam um comportamento frágil durante o processo de remoção dos cavacos. Assim a dinâmica do sinal de força gerada é mais alta que no caso de materiais de comportamento dúctil e os problemas relacionados a ruídos de sinal, maiores (Schroeter, 1997).

Com base nas experiências de Spenrath (1991), Pyra (1988) e Winzer (1985), foi projetado um sistema de medição de forças que permitisse a medição simultânea das três componentes da força de usinagem ( $F_c$ ,  $F_f$  e  $F_p$ ) durante o processo de usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos. Para isto foram empregados sensores piezelétricos de alta sensibilidade (aproximadamente 110 pC/N), do tipo 9205, do fabricante Kistler Instrumente AG.

A sensibilidade do sistema de medição pôde ser verificada experimentalmente através de testes com variação contínua do avanço ou da profundidade de corte, com uma análise posterior do sinal de força gerado e verificação dos limites onde ainda é possível perceber claramente a variação do sinal. Teoricamente sensores piezelétricos permitem a verificação de variações de sinal extremamente baixas, entretanto a existência de ruídos durante o processo de medição torna impossível a verificação das forças abaixo de um determinado limite. Testes de usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos com o sistema desenvolvido mostram

que é possível verificar com clareza variações de força até um limite inferior a 5 mN. Na “Figura 1” é mostrado um exemplo desta sensibilidade, onde as variações de avanço de 1  $\mu\text{m}$  são claramente percebidas no sinal de força medido.

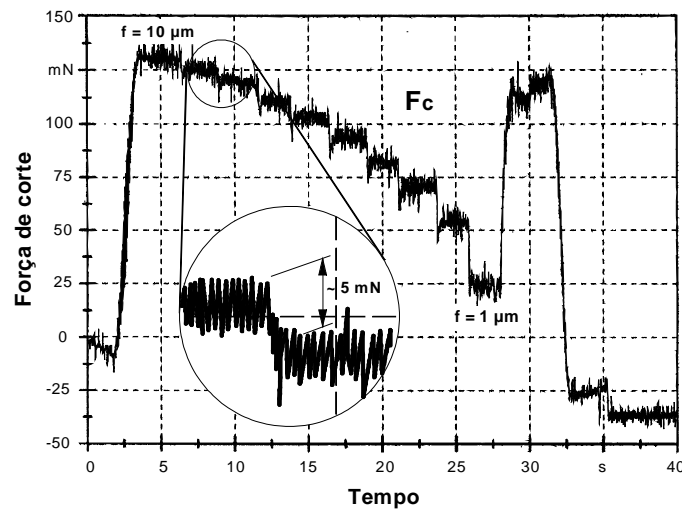


Figura 1 - Exemplo da sensibilidade do sistema de medição de forças

### 3. RESULTADOS E ANÁLISE DAS FORÇAS DE USINAGEM

Para a análise de forças na usinagem de ultraprecisão cristais infravermelhos foram realizados ensaios de torneamento com os cristais policristalinos sulfeto de zinco (ZnS), Cleartran® e germânio (Ge), em uma máquina-ferramenta de ultraprecisão MSG 325 do fabricante Rank Pneumo Precision. Esta máquina possui guias e mancais aerostáticos e comando numérico em dois eixos, com resolução de 10 nm. O controle de posição é efetuado através de um sistema interferométrico LASER. Para os ensaios foram empregadas ferramentas de diamante monocristalino do fabricante Winter, com diferentes geometrias de corte.

A seguir são descritas as influências sobre as componentes da força de usinagem dos parâmetros de usinagem e variáveis de processo analisados neste trabalho.

#### 3.1. Influência do avanço (f) sobre as forças

Assim como na usinagem convencional e na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos, na usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos ensaiados o avanço mostra ter uma significativa influência sobre as componentes da força de usinagem. Esta influência mostra-se, de maneira geral, sob a forma de um crescimento não-proporcional no nível de forças para incrementos no avanço, que entretanto apresenta algumas particularidades para cada diferente material e para as diversas geometrias de ferramenta e demais grandezas de trabalho. Apesar destas particularidades no comportamento das forças em relação ao avanço para cada diferente condição de trabalho, algumas generalizações podem ser feitas. Verifica-se, por exemplo, que incrementos no avanço exercem uma influência mais marcante sobre a força de corte do que sobre a força passiva. Enquanto para pequenos avanços a força passiva tende a dominar, ou seja, apresenta valores absolutos mais elevados que a força de corte, com o aumento do avanço a força de corte tende a um crescimento constante, sendo que as forças passivas crescem de maneira mais suave. Pode-se inclusive verificar uma tendência de estagnação nos valores de força passiva acima de um determinado avanço, enquanto que as

forças de corte tendem a crescer continuamente, de um modo similar ao observado na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos “Fig. 2”.

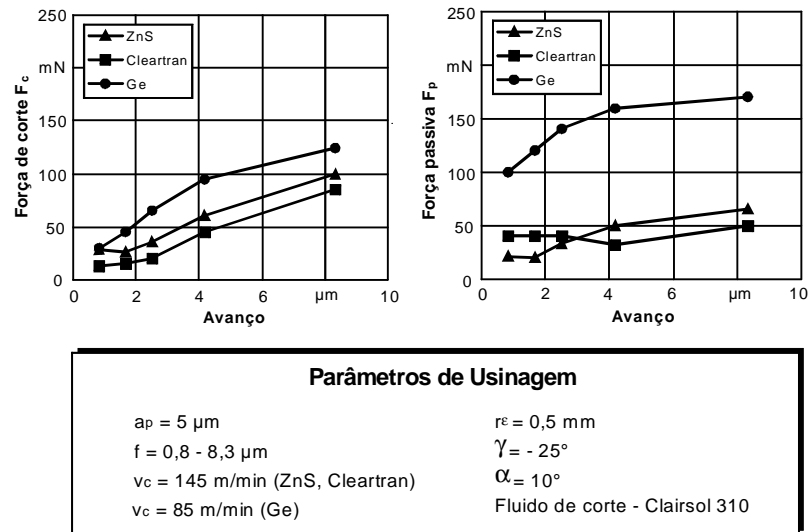


Figura 2 - Influência do avanço sobre as forças na usinagem

A análise das forças específicas de corte e passiva mostra que, para todos os materiais ensaiados e sob todas as condições de ensaio, é também possível verificar que, abaixo de um determinado valor de avanço, ocorre um crescimento hiperproporcional das componentes de força específica, ou seja, as forças por unidade de área tornam-se maiores. A região de avanço onde este fenômeno ocorre é principalmente dependente do material ensaiado, da profundidade de corte e do raio de quina da ferramenta, sem que se possa entretanto desconsiderar os efeitos que o ângulo de saída, raio de gume, fluido de corte, vibrações da máquina-ferramenta e demais variáveis de trabalho exercem sobre os resultados de força.

Com relação ao comportamento das forças específicas passivas na usinagem de ultraprecisão dos cristais infravermelhos ensaiados, verifica-se que o aumento hiperproporcional da força específica para diminuições de avanço ocorre para avanços mais baixos que para a força específica de corte, tendendo entretanto a um crescimento mais rápido “Fig. 3”. Semelhantemente ao que ocorre com as forças específicas de corte, também as forças específicas passivas sofrem influência, além do avanço, das demais grandezas de trabalho, como por exemplo das características geométricas da ferramenta. Alterações tanto do raio de quina quanto do ângulo de saída levam a um deslocamento do ponto onde se inicia um aumento hiperproporcional da força específica passiva. Como no caso das forças específicas de corte, as forças específicas passivas aumentam subitamente para maiores valores de avanço no caso de maiores raios de quina e ângulos de saída mais negativos.

O crescimento das forças específicas para avanços progressivamente menores, observado por diversos pesquisadores na usinagem de ultraprecisão e denominado de "size-effect", que domina o sistema de forças para espessuras de usinagem submicrométricas, pode ser explicado pelo empobrecimento de discordâncias com capacidade de movimentação ou por um bloqueio de discordâncias que ocorre com mais frequência à medida que diminuem as espessuras de usinagem (Spennath, 1991, Kim & Kim, 1994). Este efeito, verificado na usinagem com diamante de materiais metálicos, é verificado também na usinagem de ultraprecisão de materiais de comportamento frágil, como os cristais infravermelhos ensaiados, favorecendo inclusive a usinagem dúctil destes materiais. Para a usinagem dúctil de

materiais frágeis é necessário um estado de tensões de compressão elevado na região do gume da ferramenta, o que por sua vez é favorecido por forças específicas mais elevadas (König et al, 1989, Schroeter, 1997).

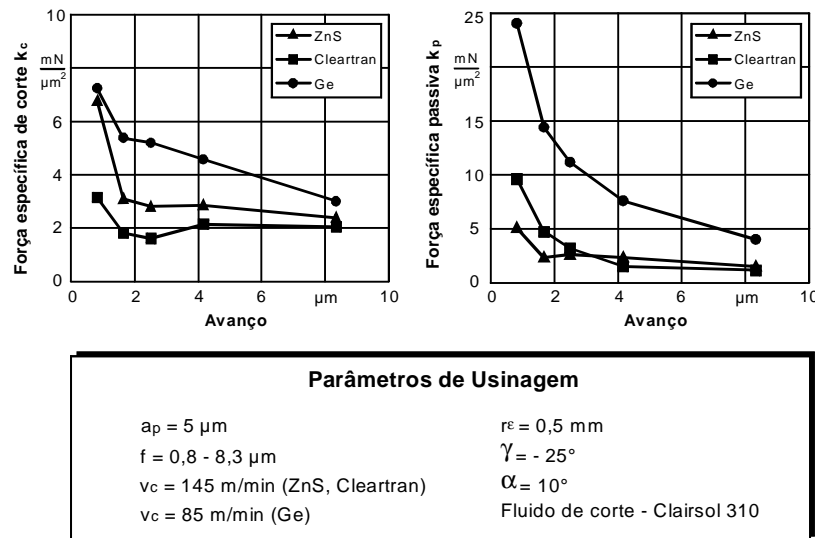


Figura 3 - Influência do avanço sobre as forças específicas

### 3.2. Influência da profundidade de corte ( $a_p$ ) sobre as forças

A análise sistemática das componentes de força na usinagem de ultraprecisão mostra que, de uma forma geral, tanto as forças de corte quanto as passivas apresentam um comportamento praticamente linear acima de um determinado valor de profundidade de corte, enquanto que abaixo de um certo limite as componentes de força apresentam uma variação não-linear. Assim, o comportamento das forças na usinagem de ultraprecisão para variações na profundidade de corte mostra uma grande analogia com o que se observa para variações de avanço, com a ressalva que, ao contrário do que ocorre para aumentos de avanços, as forças passivas tendem a crescer continuamente para aumentos na profundidade de corte.

Através dos ensaios de força realizados em cristais infravermelhos, é possível verificar que, da mesma forma que na usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos, a profundidade de corte tem uma influência marcante tanto sobre as forças de corte quanto sobre as forças passivas. O comportamento das forças mostra uma boa linearidade a partir de uma determinada profundidade de corte, que varia em função do material usinado, da geometria da ferramenta e das demais variáveis de processo.

O crescimento hiperproporcional das forças específicas para pequenas profundidades de corte ("size-effect") é também observado na usinagem dos materiais de comportamento frágil ensaiados, e de uma forma geral o comportamento das curvas de forças específicas para variação das profundidades de corte tem semelhança com as curvas de força específica ocorrida para uma variação dos avanços. O limite onde se inicia o "size-effect" varia fortemente com os parâmetros de trabalho, geometria da ferramenta e demais variáveis de processo, e é observado normalmente para profundidades de corte abaixo de  $5 \mu\text{m}$ , quando os avanços escolhidos encontram-se em valores usuais na usinagem de ultraprecisão de elementos ópticos transmissivos em materiais duros e frágeis.

### 3.3. Influência do fluido de corte sobre as forças

Diversos autores (Spennath, 1991, Pyra, 1988, Carrol, 1986) mostram que os níveis de força na usinagem de ultraprecisão são influenciados pelo emprego de fluido de corte. Para cortes a seco normalmente tem-se forças superiores às que surgem durante a usinagem com emprego de fluido de corte para as mesmas condições de corte, e em alguns casos esta diferença chega a ser de uma ordem de grandeza. Este fato deve ser observado criticamente, já que um aumento das forças pode trazer um aumento nas vibrações no sistema ferramenta-máquina-ferramenta e, com isto, ter conseqüências negativas sobre o resultado final de trabalho. Também a capacidade de remover os cavacos através do uso de fluido de corte deve ser considerada, já que principalmente em processos onde há uma tendência de formação de cavacos contínuos a não-retirada dos mesmos da região de corte pode causar uma piora da qualidade superficial da peça tanto pelo esmagamento de cavacos entre a ferramenta e a peça quanto através de aumentos súbitos nas forças decorrentes do desprendimento destes cavacos.

Assim como na usinagem com diamante de metais não-ferrosos, na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos verifica-se uma influência do uso de fluido de corte sobre o nível das componentes da força de usinagem. No caso da utilização de Clairsol 310® aplicado em forma de névoa, observa-se um decréscimo tanto na força passiva quanto na força de corte, em relação a ensaios realizados a seco. O Clairsol 310® é uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos, normalmente utilizado como solvente industrial e que mostra um excelente desempenho como fluido de corte em operações de usinagem de ultraprecisão de materiais metálicos e não-metálicos.

As diferenças no nível estático de forças são maiores, em termos percentuais, para avanços menores, visto que a componente de atrito, grandemente afetada pelo emprego de fluido de corte, tem maior peso para pequenos avanços. Também é possível verificar um aumento na diferença entre os picos máximos e mínimos de força durante a usinagem a seco de cristais infravermelhos, o que leva a supor uma dinâmica de processo maior, com possíveis conseqüências sobre a qualidade superficial da peça usinada.

### **3.4. Influência do raio de quina ( $r_\epsilon$ ) sobre as forças**

Em operações de usinagem nas quais o raio de quina tem uma dimensão significativamente maior que o avanço e a profundidade de corte, como é o caso da usinagem de ultraprecisão, o raio de quina mostra uma influência clara sobre as componentes de força de usinagem (Schroeter, 1997). Na usinagem de ultraprecisão de cristais infravermelhos a força de corte e a força passiva sofrem aumentos marcantes quando o raio de quina da ferramenta é aumentado, havendo também influência sobre as forças específicas. Observa-se, entretanto, que as variações que ocorrem nas componentes da força de usinagem para os diferentes raios de quina durante a usinagem dos materiais ensaiados são inferiores às observadas na usinagem de ultraprecisão de metais. Este fato pode ser creditado à diferença de propriedades físicas e mecânicas que existe entre materiais metálicos e cristais infravermelhos. Enquanto em materiais metálicos a formação de cavacos é baseada em mecanismos de deformação plástica, na usinagem de materiais de comportamento duro e frágil, como os cristais infravermelhos, dominam mecanismos de ruptura frágil na formação dos cavacos.

Uma análise da influência do raio de quina sobre as componentes de força específica mostra que estas, além de serem maiores para maiores raios de quina, tem o início do seu comportamento hiperproporcional ("size-effect") deslocado para maiores avanços, à medida que se aumentam os raios de quina.

### 3.5. Influência do ângulo de saída ( $\gamma$ ) sobre as forças

A análise sistemática da influência do ângulo de saída sobre as componentes de força durante a usinagem foi realizada por diversos pesquisadores tanto na área de usinagem convencional quanto de ultraprecisão, com resultados bastante semelhantes. Resultados obtidos por König et al (1982) e outros pesquisadores na usinagem convencional com ferramentas de geometria definida mostram que para cada grau de alteração no ângulo de saída ocorre uma variação de aproximadamente 1,5% na força de corte e de aproximadamente 4% na força passiva. Para aumentos negativos no ângulo de saída ambas as componentes de força crescem, ou seja, em ferramentas onde o ângulo de saída é positivo as forças tanto de corte quanto passivas são menores que no caso de ferramentas com ângulos de saída negativos.

Na usinagem de ultraprecisão de materiais de comportamento duro e frágil são normalmente empregadas ferramentas com ângulos de saída fortemente negativos, já que com esta geometria a qualidade superficial obtida é freqüentemente melhor. Isto ocorre porque nestes materiais objetivam-se grandes pressões de compressão na região de corte, de modo a evitar as tensões de tração na superfície, que causam trincas e falhas superficiais e subsuperficiais.

O comportamento das forças na usinagem de cristais infravermelhos mostra que existe, assim como na usinagem convencional, uma dependência entre o ângulo de saída e as forças de corte e passiva. Esta relação mostra-se mais evidente para avanços maiores, onde as forças de corte e passivas para ferramentas com  $\gamma = -25^\circ$  chegam a ser mais de 100% maiores que para ferramentas com  $\gamma = 0^\circ$  “Fig. 4”. Isto representa variações na ordem de 4% tanto para a força de corte quanto para a força passiva por cada grau de variação no ângulo de saída. Enquanto os resultados de força passiva na usinagem de cristais infravermelhos mostram uma boa semelhança com os que ocorrem na usinagem convencional e de ultraprecisão de materiais metálicos, a influência do ângulo de saída sobre as forças de corte na usinagem com diamante dos materiais frágeis ensaiados mostra-se maior que na microusinagem de materiais dúcteis. Motivo para isto pode ser a maior parcela de comportamento dúctil que ocorre na usinagem de materiais frágeis à medida que o ângulo de saída torna-se mais negativo.

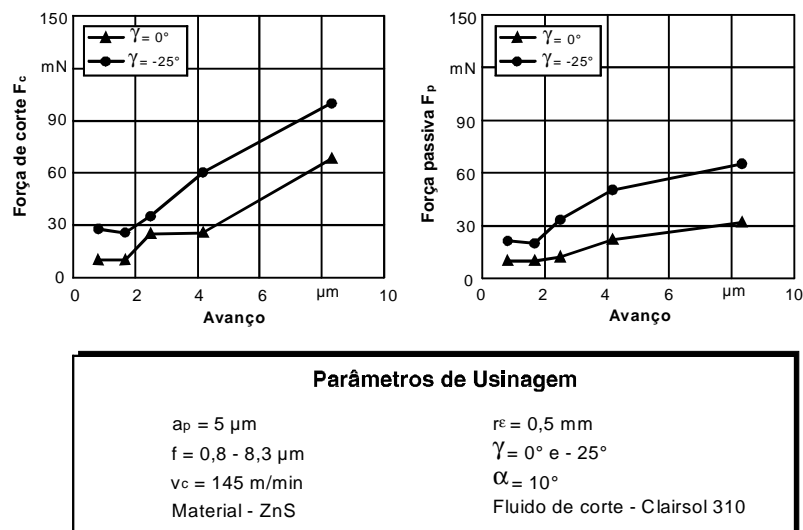


Figura 4 - Influência do ângulo de saída sobre as forças na usinagem



Para avanços progressivamente menores verifica-se que a diferença que existe entre a força de corte e passiva para ângulos de saída diferentes torna-se cada vez menor, a ponto de em alguns casos deixar de existir a partir de uma certa região de avanço. Isto pode ser explicado pelo fato de que, em condições onde o raio de gume ( $\rho$ ) da ferramenta assume valores na mesma ordem de grandeza que a espessura de corte  $h_{cu}$ , o ângulo de saída efetivo, definido pelo raio de gume e portanto fortemente negativo, independe do ângulo de saída nominal.

Uma análise das forças específicas de corte e passiva mostra que o comportamento das curvas de força específica é influenciado pelas alterações no ângulo de saída, de um modo semelhante ao que ocorre para as variações no raio de quina da ferramenta. Para ângulos de saída fortemente negativos ( $\gamma = -25^\circ$ , por exemplo) o crescimento das forças específicas para um mesmo intervalo de avanços é mais brusco, sendo que o "size-effect" tem seu início para avanços gradualmente maiores à medida que os ângulos de saída tornam-se mais negativos.

#### 4. CONCLUSÕES

A usinagem de ultraprecisão de materiais duros e frágeis, como os cristais infravermelhos, mostra problemas bastante mais complexos que a usinagem de materiais metálicos. Para se obter sucesso na produção de componentes ópticos de alta qualidade através da tecnologia de usinagem com diamante, é necessário considerar os diversos fatores de influência que atuam durante o processo. Sem o domínio destes fatores, não é possível a obtenção de resultados de trabalho satisfatórios.

Uma das ferramentas de importância para um melhor conhecimento dos fenômenos que ocorrem durante as operações de usinagem é a análise do comportamento das forças. Com o projeto, construção e análise das características de um novo sistema de medição de forças na usinagem de ultraprecisão foi possível a medição de forças em um nível extremamente pequeno. Com isto, foi possível a análise do comportamento das forças no torneamento para as diferentes condições de usinagem usuais na fabricação de elementos ópticos através da usinagem de ultraprecisão de alguns cristais infravermelhos de importância.

O estudo do comportamento das forças na usinagem de ultraprecisão de sulfeto de zinco, Cleartran® e germânio mostra que o avanço exerce uma influência marcante sobre as componentes de força. Incrementos no avanço levam a um aumento não-proporcional tanto da força de corte quanto da força passiva, embora o aumento da componente de corte seja mais evidente. Observa-se também que para regiões de avanço progressivamente menor ocorre um aumento hiperproporcional nas forças específicas, conhecido como "size-effect". Assim como para as variações de avanço, variações na profundidade de corte refletem-se também nitidamente sobre as componentes da força de usinagem, verificando-se da mesma forma o "size-effect" para regiões de profundidades de corte pequenas. Também o uso de fluido de corte mostra uma influência sobre as forças durante a usinagem de ultraprecisão de sulfeto de zinco, Cleartran® e germânio, sendo verificada uma redução no nível de forças em relação a ensaios realizados a seco.

Com relação ao raio de quina da ferramenta, é possível verificar que o mesmo exerce uma influência marcante tanto sobre a força de corte quanto sobre a força passiva. Para maiores raios de quina observam-se forças correspondentemente maiores, além de ocorrer um deslocamento do início do "size-effect" para regiões de maior avanço, quando os raios de quina adotados são maiores. Também o ângulo de saída da ferramenta mostra ter influência sobre as componentes de força, sendo esta influência principalmente observada para regiões de maior avanço. Para avanços progressivamente menores, entretanto, diminui gradualmente a importância deste parâmetro geométrico da ferramenta sobre as forças, o que pode ser

explicado pelo crescente domínio do ângulo de saída efetivo, fortemente negativo para pequenas espessuras de usinagem, sobre o ângulo de saída nominal.

### ***Agradecimentos***

O autor agradece a colaboração do Instituto para Tecnologias de Produção da Fundação Fraunhofer (FhG-IPT), de Aachen, Alemanha, e o apoio financeiro do CNPq para realização de pesquisas apresentadas neste trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

- Carrol, J. T., Dow, T., Strenkowski, J. S. Tool Force Measurement and Prediction in Diamond Turning. SPIE Vol. 676. Ultraprecision Machining and Automated Fabrication of Optics, 1986. p. 104-110.
- Kim, J. D., Kim, D. S. On the Size of Micro-Cutting Force in Ultraprecision Machining. In: UME 3, may 1994, Aachen. Anais... Aachen, 1994. 7 p.
- König, W., Essel, K., Witte, L. Spezifische Schnittkraftwerte für die Zerspaltung metallischer Werkstoffe. Verlag Stahleisen MBH, Düsseldorf, 1982. 19 p.
- König, W. et al. Fertigungstechnologie zur Herstellung von höchstgenauen Oberflächen durch Zerspaltung mit bestimmter Schneide. DFG-Bericht We 550/107-3. 1996.
- Lee, W. B. Prediction of Microcutting Force Variation in Ultraprecision Machining. In: 5<sup>th</sup> International PRECISION ENGINEERING Seminar, 18-22/9/1989, Monterey, California. Anais... Monterey, 1989. p. 42-45.
- Pyra, M. Untersuchung und Entwicklung einer geeigneten Kraftmeßeinrichtung zur Erfassung von statischen und dynamischen Kräften als meßtechnische Größe bei Mikrozerspannung im Plandrehprozeß. Aachen, 1988. 59 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1988.
- Schroeter, R. B. Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro Infravermelho. Florianópolis, UFSC, 1997. 194 p. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
- Spenrath, N. M. Technologische Aspekte zum Feinstdrehen von Kupferspiegeln. Aachen, 1991. 152 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia), RWTH-Aachen, 1991.
- Winzer, M. Entwurf, Berechnung und Auslegung eines hochgenauen Funktionselementes zur Feinstzustellung von Werkzeugen auf Präzisionsmaschinen. Aachen, 1985, 73 p. Studienarbeit, RWTH-Aachen, 1985.

### **MEASUREMENT AND ANALYSIS OF FORCES IN ULTRAPRECISION MACHINING OF BRITTLE MATERIALS**

**Abstract.** *The ultraprecision machining with tools of monocrystalline diamond is a manufacturing process with growing importance, mainly in the production of parts with extreme surface, form and dimensional qualities – in metallic and polymeric materials, for the optical, electronic, and mechanical fields. However, for this technology to be applied also in the manufacturing of parts made of materials of brittle behavior, such as infrared crystals, a deep knowledge of the phenomena which take place during the machining of these materials is necessary. An useful tool in the understanding of these phenomena is, among others, an analysis of the cutting forces. This article presents and discusses the main characteristics of a system developed for the measuring of forces in ultraprecision machining, and some of the results obtained in measuring these forces during the machining with monocrystalline diamonds of the infrared crystals zinc sulfide, Cleartran®, and germanium.*

**Key words:** *Ultraprecision machining, Machining forces, Infrared crystals*