



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA

VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING

18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil

August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

DESENVOLVIMENTO DE PROJETO CONCEITUAL E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE UMA MINIMÁQUINA DE CORTE ABRASIVO PARA O CORTE DE SUBSTRATOS DE ALUMINA.

Araujo, L. A. O., luis_araujo@bol.com.br

Silveira, Z. C., silveira@sc.usp.br

Fortulan, C. A., cfortula@sc.usp.br

Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo.

Laboratório de Tribologia e Compósitos – LTC.

Av. Trabalhador São Carlense, nº 400, São Carlos, S.P., Brasil. CEP: 13566-590, Caixa Postal: 356.

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento do projeto de uma máquina de corte abrasivo (*dicing saw*) contemplando as etapas de projeto conceitual, fabricação do protótipo e testes de validação. Uma das grandes tendências na engenharia é a geração de produtos cada vez menores e economicamente viáveis. A indústria eletrônica é o principal ícone desta tendência, sendo, o uso do silício na eletrônica o maior elemento motivador no desenvolvimento de processos de usinagem de precisão, dentre eles, o corte. Máquinas de corte de precisão são equipamentos de grande rigidez estrutural, podendo adotar como ferramenta de corte: o laser (*laser saw*), a água (*jet water saw*) ou discos abrasivos (*dicing saw*). Discos abrasivos, empregados no corte de precisão, demandam o uso de alta rotação e baixa vibração, adotando para este processo, cabeçotes com mancais aerostáticos, superando rotações de 60.000 rpm. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um protótipo de uma mini-máquina de corte abrasivo de precisão nos estudos do corte de corpos de prova de Alumina, onde a capacidade de corte definida é de no máximo 100 (larg.) x 100 (prof.) x 30 (alt.) mm, usando discos de espessura de 0,25 mm, diâmetro de 50,8 mm e velocidades periféricas em cerca de 120 m/s. Equipado com sistema de movimentação CNC, o protótipo alcançou resolução de algumas unidades de micrometros. A validação foi feita pelo corte de corpos de prova de Alumina aonde foram encontradas condições ótimas e limites de desempenho em profundidade de corte, velocidade de avanço e velocidade periférica do disco.

Palavras-chave: metodologia de projeto, *dicing saw*, máquinas de precisão, substrato de Alumina.

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia microeletrônica teve grande crescimento com o uso do silício na construção de *chips* de computador. O processo de fabricação desse dispositivo microeletrônico usa o corte abrasivo de precisão no fatiamento do silício em pequenas dimensões (Kim et al, 2007). A demanda por *chips* cada vez menores e com maior capacidade de processamento motivou, dentre outras coisas, a evolução do processo de corte abrasivo de precisão, podendo-se fabricar peças cada vez mais precisas, pequenas e de qualidade. A evolução desse processo viabilizou outras aplicações, favorecendo a melhoria e o desenvolvimento de produtos, principalmente os sensores cerâmicos, piezoelétricos, multicamadas, outros. Evidentemente, existem outras técnicas de corte, como por exemplo: o corte a laser ou jato d'água. Porém, o corte abrasivo ainda é o mais comum dos processos de corte de silício e cerâmica eletrônica. Segundo Cheung (2005), o processo abrasivo tem melhor produtividade, aplicação e também gera cortes de melhor qualidade. A área de usinagem, em específico, o corte abrasivo de precisão de micro-componentes e o projeto de máquinas e dispositivos de corte de precisão ainda é um campo pouco explorado no país. Fato atribuído talvez à reserva de informática que distanciou o país do crescimento de tecnologias dedicadas à fabricação de micro-componentes eletrônicos no seu momento de maior crescimento. Hoje, a produção em alta escala não deixa margem para financiamento do desenvolvimento de base. O objetivo principal desse trabalho é o desenvolvimento do projeto conceitual de uma mini-máquina de corte e sua validação, através da fabricação de um protótipo e ensaios de corte de bloco de Alumina. Objetivos secundários são: a concepção da mini-máquina, estendendo os estudos sobre seu desempenho, com base na análise do corte em material frágil, alterando parâmetros operacionais e verificando sua influência sobre a qualidade final do corte. O desenvolvimento de um procedimento de projeto que satisfaça a construção de um protótipo de qualidade. O uso de novos conceitos construtivos, podendo ser usados na construção de

diferentes máquinas ou aperfeiçoamento das *dicing machines* já existentes. Contribuição no estudo do processo de usinagem de corte em diferentes tipos de substratos finos e frágeis e o estudo e difusão do processo de usinagem de corte de precisão no país.

2. BREVE REVISÃO SOBRE MÁQUINAS DE USINAGEM DE CORTE

Nos últimos anos vários métodos de fabricação foram e continuam sendo desenvolvidos para a obtenção de microcomponentes, como por exemplo, eletro-erosão, moldagem com pós, deposição e remoção de material (Yeo; Balon 2002). Para que o processo de fabricação em escala nanométrica possa efetuar, por exemplo, furos com diâmetros de grandeza de 5 μm ou menores em função da condutividade do material o projeto tradicional de máquinas-ferramentas deve incorporar novas tecnologias e materiais, para atender essa nova demanda de produtos. Segundo Yeo e Balon (2002), o processo de fabricação com remoção de material é muitas vezes limitado pela capacidade de operação de máquinas-ferramentas, principalmente em micro-usinagem de componentes frágeis e com alta dureza. Segundo Nix *et al.* (2005) e Perront; Durant e Richerzhagen (2006) as técnicas mais comuns, para o corte de materiais frágeis são: corte a laser, corte por jato d'água e o corte com discos abrasivos (mais utilizado). A *dicing saw* é a máquina mais indicada para processos de corte de materiais frágeis, tais como o silício, a alumina e vidros cerâmicos, com aplicação para etapas de fabricação de componentes eletrônicos, como o processo de manufatura de *chips* em material semiconductor, conforme a Figura 1 ilustra. Os diferentes fabricantes conduzem a uma variedade construtiva do equipamento, sendo possível encontrar desde opções simples e semi-automáticas até alternativas totalmente automáticas. Uma *dicing saw* consiste em uma máquina equipada com um sistema de movimentação linear (coordenadas X, Y e Z) e uma ferramenta de corte abrasivo (cabeçote-*spindle*). Uma mesa X-Y permite a movimentação controlado neste plano e na coordenada Z se encontra o cabeçote equipado com o disco abrasivo, conforme a Figura 2 ilustra.

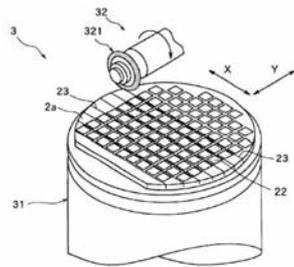


Figura 1 – Corte de material semiconductor (Fonte: *United State Patent* 693.9785, 2005).

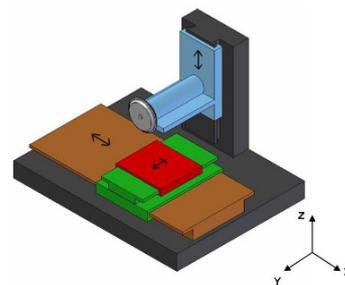


Figura 2 – Conceito básico de uma Dicing Machine (Fonte: Borges, 2004).

O eixo X, responsável pela translação da mesa de corte (velocidade de corte ou avanço) deve possuir uma ampla faixa de ajuste de velocidade. Os eixos Y e Z devem possuir boa resolução, precisão e alta acurácia, respondendo pela dimensão da fatia e penetração do disco de corte no material, respectivamente. Algumas versões possuem mais um eixo de movimentação: o eixo theta (Θ), que é responsável pelo giro da mesa de corte (*chuck table*), habilitando o equipamento a cortar o mesmo material em mais de uma direção na mesma fixação. Normalmente, o material é montado sobre um quadro (*carrier*), formado por um filme adesivo (*adhesive layer* ou *tape*) e uma moldura (*frame*). Existem, comercialmente, *dicing saws* com um maior número de graus de liberdade, como por exemplo, máquinas da série 7100 da ADT (*Advanced Dicing Technology*), nas quais, a ferramenta de corte ajusta uma coordenada de giro, possibilitando cortes em planos inclinados, conforme a Figura 3 ilustra. Existem também diferentes configurações de planos de trabalho, como por exemplo, o material pode ser cortado na coordenada X e ferramenta de corte no plano YZ ou o material a ser cortado fica no plano XY enquanto a ferramenta de corte trabalha na direção Z.

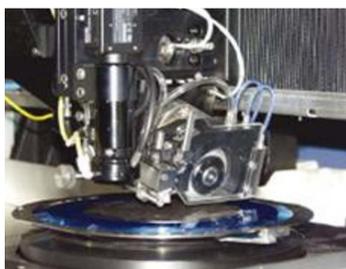


Figura 3 - Ferramenta de corte inclinada – Série 7100 da *Advanced Dicing Technology* (ADT) (Disponível em: <<http://www.bitase1/datasheets/ADT-7100-Brochure-SE.pdf>>).



Figura 4 - Formatos admissíveis para corte em dicing machines inclinada – Série 7100 da *Advanced Dicing Technology* (ADT), (Disponível em: <<http://www.bitase1/datasheets/ADT-7100->

O cabeçote de corte (ou *spindle*) é um dos componentes mais importantes da máquina. Ele deve fornecer ao disco de corte, rotações de até 60000 rpm, com velocidades periféricas de até 150m/s (disco de 50 mm ou 2" de diâmetro), considerada em retificação como *high speed*. (Boucher et al. 2002). Em corte de substratos multicamadas nos quais baixas forças de corte são aplicadas rotações de 30.000 rpm a 60.000 rpm (Luo, 2008). É exigida rigidez, torque e alta rotação para um bom desempenho do processo, portanto, cabeçotes com mancais aerostáticos apresentam-se como excelente alternativa. Slocum (1992) descreve que mancais aerostáticos suportam cargas aplicadas com um fino filme de ar comprimido, que flui continuamente de dentro do mancal para a atmosfera. De forma abrangente, os mancais aerostáticos podem ter construções para deslizamento plano ou angular (rotacional). Seguindo essa classificação, os mancais aerostáticos usados em cabeçotes de corte para *dicing saws* podem ser os cônicos ou uma combinação entre o radial e o axial. Cabeçotes com mancais de rolamento podem ser empregados, porém apresentam alto ruído, aquecimento e baixa rigidez. O acionamento poder ser obtido por ar (turbina) ou elétrico (com ou sem escova). (SLOCUM, 1992). Na extremidade do cabeçote, apoiado pelos mancais, existe uma ponta trabalhada no eixo para a montagem do conjunto flange e disco de corte

2.1 O processo do corte abrasivo

O processo de corte por meio de discos abrasivos é largamente usado pela indústria eletrônica nos processos de fabricação de ranhuras (*grooving*), fatiamento e corte de materiais frágeis e duros, como, cerâmicas eletrônicas, vidros ópticos, vidros cerâmicos, ferrita monocristalina, silício, semicondutores em geral, outros. A vantagem de se usar o disco abrasivo é a eficiência do processo, a qualidade de forma e dimensão final do produto. Recentemente, pesquisas vêm abordando o processo de corte a laser. O interesse é obter cortes cada vez mais estreitos, precisão, flexibilidade na trajetória de corte e menores danos ao produto, como: lascas, trincas e distorções. Porém, o desempenho deste processo esta fortemente ligada à espessura do material a ser cortado, influenciando diretamente na velocidade de corte e no número de passes necessários para atingir a profundidade desejada. Tendo em vista esse fato, o processo de corte por meio de discos abrasivos mostra-se vantajoso em comparação ao corte laser (Mizuno *et al.* 2008; Cheung, 2005). Para se caracterizar o processo de usinagem de corte de materiais frágeis devem-se considerar as seguintes características: Disco de corte: O processo de corte abrasivo de filmes finos e frágeis é fortemente caracterizado pela sua alta produtividade, precisão e qualidade do corte. Um dos fatores que viabiliza o processo de corte abrasivo são as características do disco abrasivo (Cheung, 2005). No caso do processo de corte de filmes finos, normalmente, encontram-se discos da espessura de 0,15 a 0,45 mm e diâmetros de 1 até 4" Em geral são feitos de resina e grãos abrasivos, podendo ser encontrada algumas versões em cerâmica e metal. Nos discos de resina e grãos abrasivos, variam: o tamanho do grão, o tipo de resina e o formato do disco. Existe, também, o disco tipo *hub*, que consiste em um disco de corte anexado à uma flange. Discos serrilhados são usados no caso de materiais com espessuras acima de 5mm conforme a Figura 5 ilustra.

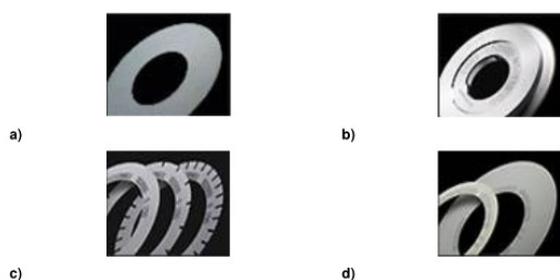


Figura 5 - Discos de corte: a) disco de diamante e resina, b) disco tipo *hub*, c) disco serrilhado de diamante e resina e d) disco de metal.

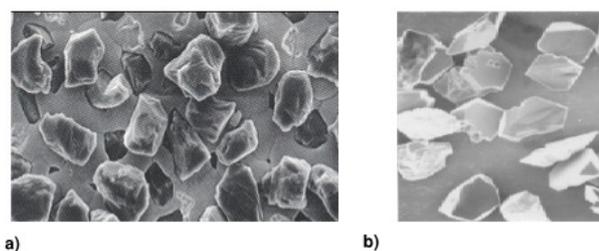


Figura 6 - Grãos abrasivos usados na fabricação de discos abrasivos de corte. Em a) grãos diamante e em b) grãos de CBN. (Fonte: DISCO CORPORATION, 1997).

A espessura e diâmetro são características relevantes no processo de corte. Quanto maior o diâmetro do disco utilizado, maior deverá ser o torque disponibilizado pela máquina e melhor o sistema de refrigeração. Por outro lado, discos maiores viabilizam o aumento avanço de corte e diminuem a rotação. Discos com maiores diâmetros possuem longa vida útil, quando comparado com discos semelhantes de menor diâmetro. A espessura do disco influencia no esforço de corte (Gideon, 2008). Discos de corte, geralmente são classificados de acordo com o tipo e tamanho do grão, concentração de grão no disco e o tipo de material ligante. Estas características atuam diretamente na eficiência do processo de corte. Diamantes naturais foram muito usados no passado, no entanto, suas características pluralizadas e principalmente, o seu grau de pureza, levaram ao uso dos diamantes sintéticos. Estes têm características bem definidas e baixa contaminação, devido ao seu processo de fabricação controlado (Gideon, 2008). Atualmente, também é possível encontrar disco de nitreto cúbico de boro (CBN). Na Figura 6 são apresentadas microscopias destes dois tipos de grãos abrasivos. O tamanho do grão é determinado pela dureza e fragilidade do material que se deseja trabalhar. Para o corte de materiais duros, recomenda-se o uso de grãos grandes, porém, cortes com bom acabamento demandam o uso de discos com grãos menores, a fim de minimizar os defeitos gerados durante processo de corte. Quando usado em

materiais duros, as partículas menores tendem a se sobrecarregar, criando altas temperaturas, danificando o material e em alguns casos, quebrando o disco. A concentração indica o volume de grãos contido no volume do disco, ou, segundo alguns fabricantes, o volume de grãos em 1cm^3 . Altas concentrações de grãos geram discos mais duros e mais resistentes ao desgaste. A distância entre os diamantes é relativamente pequena, não havendo espaço suficiente para acomodação de parte do material removido e transporte de fluido refrigerante entre o contato de grão e material, influenciando na qualidade do corte. Discos de menor concentração são o oposto: eles possuem maior espaçamento entre grãos, havendo espaço suficiente para uma acomodação adequada de parte do material removido e transporte de fluido refrigerante, fato de grande relevância na abrasividade do disco. O corte do substrato ou *wafer* pode ser feito em apenas um corte ou cortes sucessivos, de acordo com a espessura do material ou a largura do corte necessária (corte *dual*). É preferível fazer um corte em uma única etapa, pois um disco abrasivo fino pode curvar-se devido à carga desbalanceada no segundo corte. A partição definitiva é obtida com o disco em penetração total no material e penetração parcial no filme de sacrifício (*tape*) do *carrier* (Gideon, 2008). Para obtenção de partes ortogonais, a mesa de corte da *dicing saw* sofre um giro de 90° e procede-se o fatiamento. Estas mesas de corte devem ser equipadas com dispositivos de boa resolução e repetibilidade, caso contrário, as peças não terão a geometria especificada. O perpendicularismo e linearidade do corte são de extrema importância. Quase todos os parâmetros podem afetar a geometria do corte: grau de amortecimento da máquina, desbalanceamento do *spindle*, disco com desbalanceamento da flange, velocidade de avanço alta, rotação do disco baixa, falta de refrigeração, flange suja ou danificado, outros. Outras características que devem ser investigadas no processo de corte utilizando *dicing saw* são: forças de corte envolvidas, mecanismos e defeitos de corte.

2.2 Técnicas de metodologia de projeto

O processo de desenvolvimento do projeto de um produto seja de uma máquina, um equipamento, um componente ou bens de consumo envolve atividades multidisciplinares que podem ser descritas sob diferentes abordagens, tais como: preparo psicológico/criativo, metodologias de projeto e visão organizacional (Pahl *et al.*, 2005). O processo para a realização do projeto de um produto atua entre as interseções de atividades culturais e tecnológicas por meio da base de conhecimento adquiridas nas áreas de ciências puras, engenharia, desenho industrial, economia, psicologia, *marketing* e políticas públicas. De acordo com Back (2008), o termo “projeto” é amplo, mas deve integrar todas as atividades do projeto e planejamento do produto. Essas atividades incluem, por exemplo, pesquisa de mercado, projeto do produto, fabricação, usabilidade do produto, planos de manutenção e distribuição e o descarte/reutilização do produto. Pahl *et al.* (2005) enfatizam o recente reconhecimento da importância da metodologia de projeto ou teoria de projeto na concepção de um produto, seja obtido por projetos inovadores, adaptativos ou alternativos. A importância dessa área de pesquisa é ressaltada pelas normas recentes como a VDI 2221(1977), 2222 (1987), ambas para sistemática de projetos e a VDI 2223 (1999) para o anteprojeto de produtos técnicos e as diretrizes de projeto para ensino e pesquisa sugeridos pela ASME (1986). Na literatura técnica, há várias abordagens sistemáticas sobre a seqüência e as etapas de desenvolvimento de um projeto de engenharia (Back, 2008; Baxter, 2000; Pahl *et al.* 2005). Essas propostas ou abordagens, com pequenas variações de interpretações apresentam ferramentas técnicas, tanto para o desenvolvimento do conteúdo técnico, quanto organizacional. Com o desdobramento de cada atividade no processo de projeto, há uma análise de cada etapa, que conduz a tomadas de decisões importantes, no início do desenvolvimento do produto, fase na qual os custos envolvidos em alterações ainda são pequenos. As atividades de projeto envolvem um fluxo iterativo de conhecimento, informações e tomadas de decisões, que é fundamental para reduzir o ciclo de desenvolvimento do produto, com maior valor agregado e redução do tempo total de desenvolvimento do projeto.

3. METODOLOGIA PARA O PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UMA MINI DICING.

Tendo como foco, o processo de corte de precisão de materiais frágeis é proposta uma estratégia para o projeto de uma mini-máquina de corte (*Dicing Saw*). Dentro dessa estratégia, são aplicadas técnicas para o estudo de possíveis configurações e tomada de decisões em cada etapa do desenvolvimento do projeto. O fluxograma baseado na literatura técnica é apresentado na Figura 7.

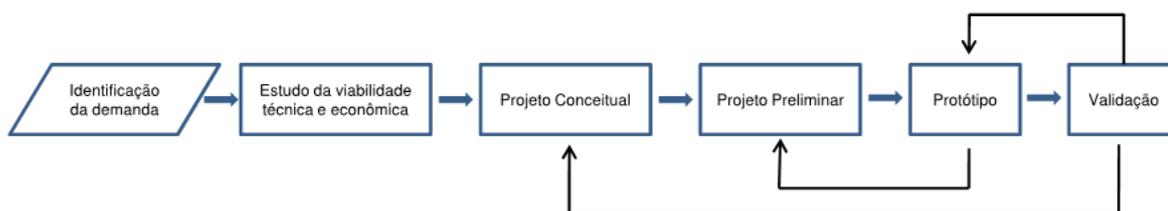


Figura 7 – Estratégia de projeto proposta.

3.1 Identificação da demanda

O Brasil possui grande desenvolvimento nas áreas de usinagem convencional, e em áreas específicas, como retificação e corte de placas cerâmicas para pisos e revestimentos. Porém, praticamente não há publicações/estudos sobre o processo e melhorias/concepção de projetos, para máquinas do tipo “*dicing*”, que é fundamental para a fabricação de componentes eletrônicos. O trabalho proposto tem como objetivo o desenvolvimento e fabricação de uma máquina protótipo “*dicing*”, para validá-la inicialmente, através de processos de corte de precisão em diferentes tipos de substratos finos e frágeis. Com esses resultados preliminares pretende-se explorar as condições de usinagem desta categoria de máquina, e futuramente melhorar o desempenho da máquina, através de ensaios de identificação dinâmica da estrutura e do conjunto rotativo.

3.2 Estudo da viabilidade técnica e econômica

Nessa etapa identificou-se que há uma grande variedade de modelos de *dicing saw* disponíveis no mercado, com diferentes níveis de sofisticação, com elementos em comum: a) Movimentação linear em três direções (XYZ) acionado por motores (passo ou servo), mais um giro para a mesa de corte (Θ), contabilizando 4 graus de liberdade em movimentação e posicionamento; b) Cabeçote de corte de alta rotação; c) Um grau de liberdade na ação de corte e sistemas de refrigeração. A máquina deveria apresentar um baixo custo de fabricação e montagem, mas mantendo características como repetibilidade e resolução dos eixos de movimentação, para o correto posicionamento do disco de corte com relação ao material usinado. Os cabeçotes das *dicing saw*, em geral, são sustentados por mancais aerostáticos, atingindo rotações de até 60.000 rpm, mas rotações inferiores a 60.000 rpm, para o estudo do desempenho de um protótipo da máquina foram admissíveis. A verificação econômica do projeto revelou que se trata de um processo relativamente caro, pois esta diretamente relacionada à faixa de tolerância do produto e ao tipo de material. Alguns produtos demandam cuidados especiais, como: salas limpas, áreas com baixo risco de vibrações e tremores de terra, mão de obra qualificada, outros. A etapa do projeto conceitual gerou algumas opções que reduziram muito o custo do processo de operação do equipamento, como por exemplo, o uso de vidros ao invés de *tapes* adesivos para fixação do material à mesa de corte. O custo final de fabricação do protótipo foi equivalente a R\$ 20.000,00, contabilizando componentes e cerca de 200 horas de operações de usinagem e montagem.

3.3 Projeto conceitual de uma mini *dicing*

Nesta etapa, o uso da análise morfológica como ferramenta para escolha dos requisitos técnicos e auxílio na tomada de decisão apresentou um volume de idéias significativo, conforme a Figura 8 ilustra.

Para efetuar a movimentação de todo o sistema foi adotado um equipamento de 4 graus de liberdade (X, Y, Z e Θ). Uma máquina capaz de movimentação linear em três direções aumenta o número de variáveis de processo, como por exemplo: profundidade de corte, distância de um corte ao outro, velocidade de avanço de corte. A movimentação angular em Θ também se faz relevante e deve ser incluída no projeto. Porém não existe a necessidade de uma resolução angular pequena, normalmente, os valores do ângulo Θ são de 90^0 com relação ao corte, gerando peças perpendicularismo satisfatório para as aplicações gerais.

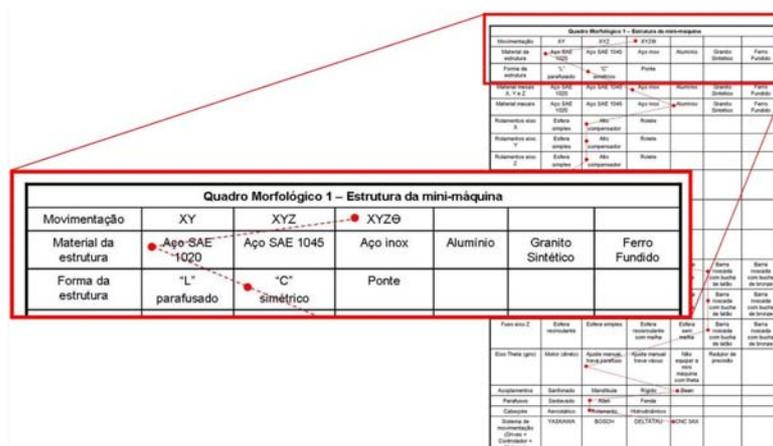


Figura 8 – Detalhe: Análise morfológica desenvolvida para o sistema.

No levantamento técnico foi identificado que não há um padrão de construção da estrutura de máquina “*dicing*”. Entretanto, observou-s que as dimensões da estrutura limitam o volume de trabalho, influenciando sua escolha até mesmo em questões de operação do equipamento. Segundo Slocum (1992) seria interessante ter um elevado volume de

trabalho, ideal para pequenas máquinas, porém com grande dificuldade de fabricação. O interesse do projeto é de um equipamento de precisão. Segundo Porto *et. al* (2004), uma máquina considerada de precisão trabalha produtos na faixa de 5 a 0,5 μm de tolerância. Nestes casos, é recomendado o uso de fuso de esferas e sistema servo acionado, em função de suas características de resolução, acurácia e repetibilidade. Porém, o custo deste tipo de sistema se torna elevado. Dessa forma, optou-se ao uso de elementos alternativos, como: barra roscada com bucha de latão (ou bronze) e motores de passo. Apesar de alguns inconvenientes, como o desgaste acelerado da bucha de latão em virtude dos esforços sobre os fios de rosca, o sistema atendeu às necessidades de projeto. No projeto conceitual, a análise morfológica e o mapeamento de estruturas disponíveis na literatura técnica foram utilizados, para se obter a melhor relação desempenho/custo para os eixos de movimentação no plano horizontal XY e Θ (giro), completando o volume de trabalho com Z na vertical, cujas configurações de projeto são apresentadas na Figura 10.

Estrutura da máquina				
Arquitetura da estrutura	"L" parafusado (SLOCUM, 1992)	"C" simétrico	Ponte	XYZ Θ com spindle estacionário
Envelope de trabalho	Grande.	Grande.	Pequeno.	Grande.
Dimensão das peças a serem trabalhadas	Peças grandes e pesadas, pois a estrutura é grande.	Peças grandes, mas com limite na abertura do "C".	Peças pequenas.	Grandes.
Erro de dilatação térmica	Grande. Deve trabalhar em ambiente com temperatura controlada.	Grande, mas pode ser reduzido com uma estrutura dupla.	Minimizado pelo fato da estrutura ser em forma anular.	Deve ser considerado.
Operação	Simple.	Simple.	Limitada .	Simple.
Fabricação	Complicada, pois deve haver um casamento entre o "L" e o resto da estrutura.	Simple, pois é uma única peça a ser usinada.	Complicada, pois são várias e grandes partes a serem usinadas.	Complicada, pois a altura variável precisa de um dispositivo relativamente volumoso.
Pontos negativos	Estrutura cara de ser fabricada.	Manuseio devido ao fato de ser uma peça única.	Estrutura grande para esse projeto.	Essa construção aumenta o volume da máquina.
Pontos positivos	Envelope de trabalho grande.	Cálculo estrutural relativamente simples. Estrutura compacta. Fácil operação. Fácil manutenção. Inovação.	Alta rigidez, ideal para essa aplicação.	Spindle estático, delimitando problemas de geometria de corte apenas ao sistema de movimentação.

Figura 9 – Mapeamento da estrutura da máquina “dicing”.

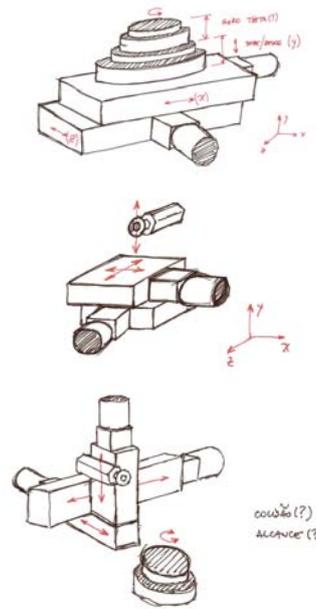
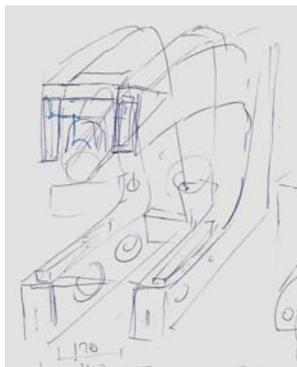
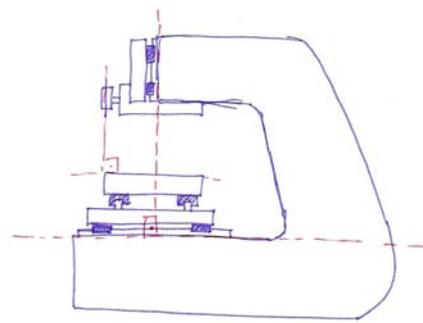


Figura 10 – Croquis gerados para a movimentação nos planos XYZ e de Θ .



(a)



(b)

Figura 11 – Conceito escolhido para o protótipo conceitual de uma mini-máquina “dicing”, para corte de substratos de materiais frágeis. a) Esboço do sistema. b) Croqui da máquina.

Foi tomada a decisão utilizando este conceito considerando que: a) a estrutura não possui uniões por parafusos; b) os trilhos são montados diretamente na estrutura, reduzindo o número de peças e melhorando a acurácia; c) a face de montagem do eixo Z foi usinada na mesma fixação que do eixo Y (no qual, as guias foram assentadas), garantindo o mínimo de perpendicularismo; d) a estrutura conta com apenas uma superfície de referência e duas funcionais, facilitando significativamente a usinagem.

3.4 Protótipo conceitual

O projeto preliminar é a fase posterior ao projeto conceitual, na qual as configurações obtidas são dimensionadas, simuladas computacionalmente e otimizadas. Neste trabalho, foi proposto um protótipo conceitual e a continuação em trabalhos futuros é o estudo de identificação dinâmica da estrutura e do *spindle*, bem como a análise modal da estrutura, para que de fato haja a fase de projeto preliminar no desenvolvimento do projeto proposto. Considerando o protótipo conceitual, a partir da opção de estrutura em “C”, simétrico em aço ABNT 1020, com movimentação nas direções cartesianas X, Y, Z e Θ , as dimensões da estrutura foram obtidas pelo envelope de trabalho estipulado para o protótipo, levando em consideração o volume ocupado pelo *spindle* e os eixos de movimentação. O cálculo de deflexões da estrutura foi baseado no teorema de Castigliano. Foi adotado um sistema simplificado de uma chapa em “U” hiperestática, esquematizado na Figura 12, considerando esforços de 100 N em três direções.

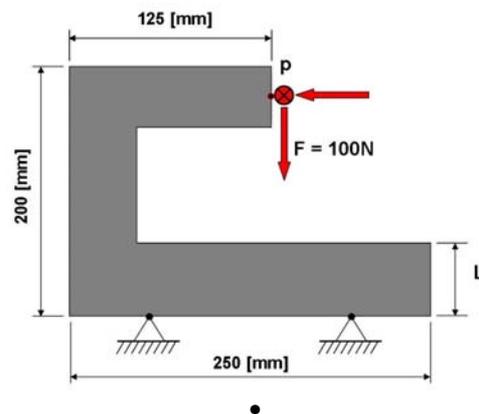


Figura 12 – Modelo para cálculos de deflexões.

Uma das grandes vantagens da estrutura adotada nesse projeto é a sua simplicidade dimensional. Apenas uma superfície de referência, neste caso a superfície A, conforme Figura 13A, e duas funcionais superfícies B e C, conforme Figura 13 (b), garantem um funcionamento dimensional do equipamento.

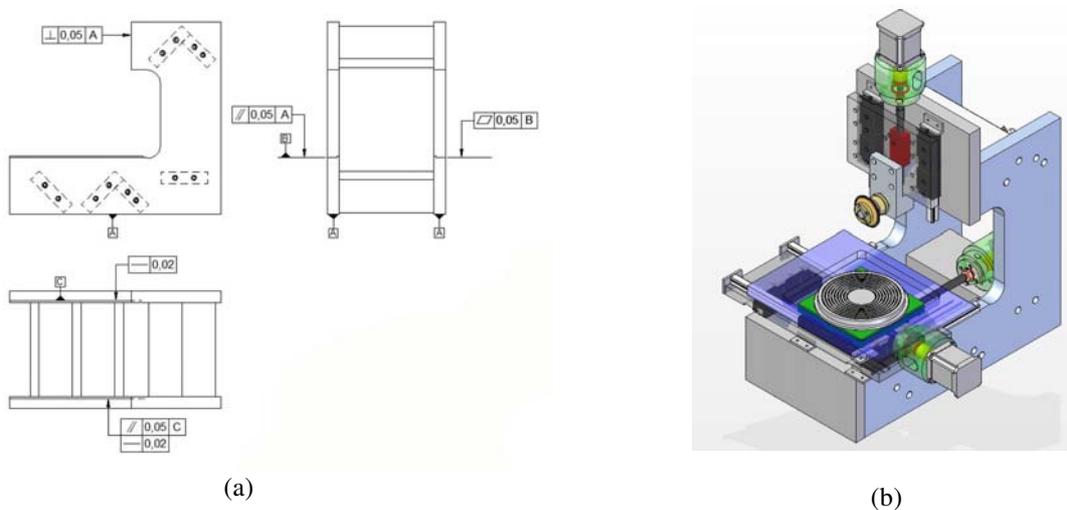


Figura 13 (a) – Tolerâncias da estrutura; (b) conjunto montado final: protótipo mini-máquina de corte.

4. RESULTADOS E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

4.1 Construção do protótipo

Foi elaborado um plano de fabricação organizado em tarefas distribuídas em 30 semanas, que englobaram: usinagem de desbaste, pré-montagem, solda entre as partes, tratamento térmico da estrutura, usinagem fina da estrutura, usinagem dos mancais, montagem das guias, montagem das mesas, montagem dos fusos, usinagem da mesa de vácuo, montagem da mesa, pintura e acabamento. Os motores utilizados foram motores de passo controlados por computador (PC) via drive de controle CNC 3AX, que tem seu projeto disponível na internet e é compatível com software *freeware* TURBOCNC.

4.2 Validação do projeto e protótipo conceitual, através de processo de corte de alumina.

Trabalhos anteriores, desenvolvidos pelo LTC/EESC/USP contemplam o estudo de corte de materiais frágeis, em especial, corpos em cerâmica de Alumina. Na literatura, pouco existe sobre o assunto, portanto, era preciso criar uma referência para a validação do equipamento. Corpos de prova em alumina (40mm x 40mm x 10mm) foram ranhurados em diferentes condições de corte, sendo possível obter dados referentes ao desgaste do disco abrasivo em diferentes condições de profundidade (p), rotação do disco (w) e velocidade de avanço (v). A Alumina foi selecionada devido à sua elevada fragilidade, alta dureza e baixo custo. Suas propriedades e manufatura são amplamente divulgadas, por isso é considerado um material universal, ideal para o enfoque deste trabalho conforme as Figuras 14 (a) e (b) ilustram.

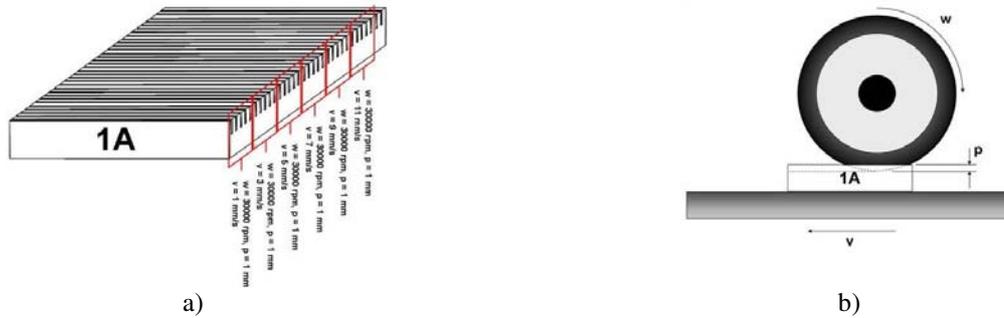


Figura 14 – (a) corpo de prova ranhurado em determinadas condições; (b) condições de corte.

Mediu-se o desgaste do disco (d), rugosidade superficial (Ra e RMS) e a potência de corte descrita pela corrente elétrica do motor (A). A Figura 15 apresenta o resultado obtido com a Microscopia eletrônica de varredura (MEV), que também foi realizada a fim de se observar a influencia das condições de corte nos defeitos de corte gerados.

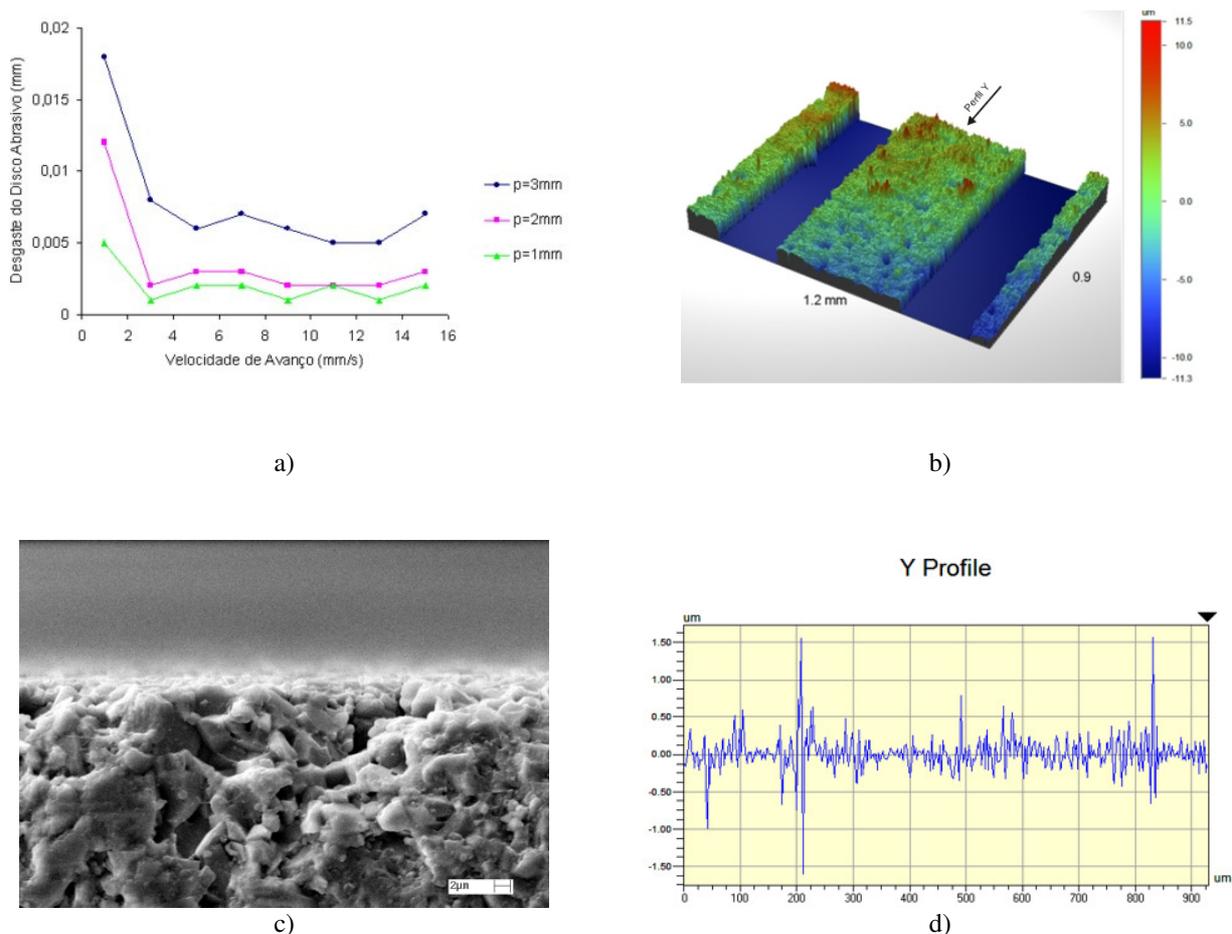


Figura 15 – Avaliação das condições de corte. Em a) curvas de desgaste do disco pela velocidade de avanço, em b) perfilometria do corte, em c) MEV da região cortada e em d) rugosidade superficial no corte.

O ensaio de validação foi planejado para o corte de bloco de alumina com disco de corte de 0,254 mm de espessura, diâmetro de 2” e granulometria de 54 μm . Foi proposta a condição de corte com profundidade de 1 mm, avanço de

1mm/s e rotação do cabeçote em 45.000 rpm que apresenta torque de 0,1 N.m nesta rotação. A Figura 16 (a) e (b) ilustra este ensaio em detalhe. Cortes subsequentes, com menor profundidade, 0,5mm, foram realizados para verificação da linearidade. A refrigeração foi feita por um jato d'água diretamente na região de contato entre disco e cerâmica. Em alguns momentos, foi possível notar “faiscamento” no corte devido ao excesso de calor. Observou-se que o torque de 0,1 N.m foi insuficiente para este experimento tendo que ser diminuída a profundidade para 0,5 mm. Obteve-se uma seqüência de cortes (Figura 16 c) e a linearidade foi medida identificando um desempenho muito satisfatório nas condições testadas.

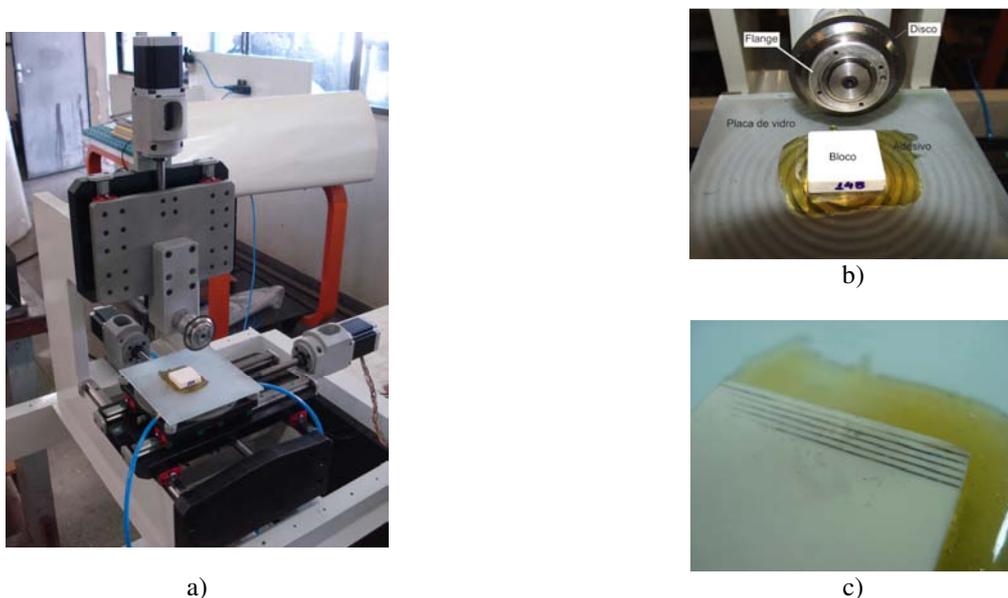


Figura 16 – Ensaio, em detalhe, a) vista do conjunto disco abrasivo e flange, placa de vidro, adesivo e o bloco (corpo de prova em Alumina); b), conjunto em detalhe; c) corte de 0,5mm para verificação da linearidade.

5. Conclusões

O projeto conceitual, fabricação e validação do protótipo apresentou resultados iniciais satisfatórios, principalmente em relação ao corte de blocos cerâmicos com 0,5 mm de profundidade à velocidade de avanço de 1mm/s. Cortes lineares, com arestas integras e espaçamento repetitivo foi observado. O uso de metodologias de projeto na construção do projeto da mini-máquina de corte foi fundamental para a sistematização da configuração da máquina durante a fase de concepção e para o desdobramento de outras etapas do projeto. Experimentos preliminares de controle do corte de cerâmica de alumina demonstraram que a algumas variáveis como: profundidade de corte e velocidade de avanço, quando excessivas (condições agressivas), pode acarretar danos na qualidade do corte e integridade do substrato a ser fatiado. Foi observado que, antes da perda de linearidade, já havia sido constatado danos na aresta de corte do substrato. Os experimentos mostraram que ao se aproximar da condição limite de agressividade o disco teve seu desgaste muito acentuado, podendo ser um bom parâmetro de avaliação do desempenho de corte. O aumento do desgaste do disco tem comportamento similar ao aumento da amperagem do *spindle* (potência requerida). Velocidades de avanço menores que 5 mm/s e maiores que 13 mm/s apresentaram regiões de comportamento instável, e, o aumento da instabilidade foi maior quanto menor a rotação testada. Nesse experimento, a rotação de 30.000 rpm apresentou maior estabilidade quanto às variações não controladas do processo e de material. O corte de 1 mm de profundidade, realizado no ensaio de validação demonstrou um grande desgaste do disco, em torno de 0,05mm, isso se deve à alta queda da rotação do cabeçote utilizado. Não foi possível medir a rotação instantaneamente no momento de corte, porém, foi notado, acusticamente um esforço excessivo do dispositivo. Além disso, os resultados obtidos nos estudos preliminares indicam essa tendência de baixa rotação e alto desgaste do disco. Qualitativamente a linearidade se apresentou de forma aceitável, mesmo os cortes tendo sido realizados à 1 mm/s de avanço, o que caracteriza uma zona de corte instável, como citado nos estudos preliminares. Portanto, o objetivo de se conceber uma “dicing saw” com baixo custo e com desempenho satisfatório, com relação à sua operação (corte de materiais frágeis). Com esse estudo conceitual, a seqüência natural do trabalho são os estudos de identificação dinâmica e análise estrutural da estrutura e do cabeçote.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq e à FAPESP, pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho e ao técnico mecânico José Carlos Risardi do Laboratório de Máquinas-Ferramentas, pelo apoio na fabricação e montagem da máquina “Dicing”.

7. REFERENCES

- Back, N.; Ogliari, A.; Dias, A.; da Silva, J.C. 2008, "Projeto integrado de produtos". Editora: Manole.
- Nix, E.L.; Corbett, J.; Sweet, J.H.; Ponting, M. 2005, "Dicing and grinding of electro-ceramics". Disponível em: www.loadpoint.co.uk/documents/Dicinh_Grinding_Aug_05.pdf. Acesso em 12 de maio de 2008.
- Baxter, M. "Projeto do Produto". 2003. 2ª. Edição. Edgard Blücher. 260p.
- Boucher, J.N.; Bajune, D.E. Substrate dicing method. 2002. "Patente US 2002/0193094 A1". 7p.
- Cheung, A. T. 2005. Dicing advanced materials for microelectronics. IEEE.
- Gideon, L. 2008, Process Optimization of Dicing Microelectronic Substrates. Disponível em <<http://www.kns.com/library/articles/process-opt.htm>>. Acessado em: 13 de outubro de 2008.
- Luo, S. Y.; Wang, Z. W. Studies of chipping mechanisms for dicing silicon wafers. 2008, The "International Journal of Advanced Manufacturing Technology." Vol.35, p.1206-1218.
- Mizuno, Masahiro; Iyama, Toshirou; Zhang, B. I. 2008, Analysis of the Sawing process with abrasive circular saw Blades. Disponível em:<link.aip.org/link/?JMSEFK/130/011012/1>. Acessado em: 15 de agosto de 2008.
- Pahl, G.; Beitz, W. 1996. "Engineering Design: a systematic approach." Springer-Verlag.
- Perrotet, D.; Durant, P.; Richerzahagen, B. 2006, "Water-jet-guided laser technology a damage free dicing solution. "Advanced Packaging," Vol.15, n.6, p.24-26.
- Porto, A. J. V.; *et.al.* 2004. "Usinagem de ultraprecisão." São Carlos: Rima Editora. 239p.
- Shigley, J. E.; Mischke, C. R.; Budynas, R. G. 2005, Projeto de engenharia mecânica. 7ª edição. Editora Bookman.
- Slocum, A. H. 1992. "Precision Machine Design". Prentice Hall.
- Yeo, S.H.; Balon, S.A.P. 2002, High-speed grinding using thin abrasive disks for microcomponents. "Journal of Micromechanics Microengineering." p. N1-N2.

8. NOTA DE RESPONSABILIDADE

Os autores são responsáveis pelo material impresso contidos neste artigo.

DEVELOPMENT OF THE CONCEPTUAL DESIGN AND PROTOTYPE OF A DICING SAW TO CUT OF THE ALUMINA SUBSTRATE

Araújo, L. A. O., luis_araujo@bol.com.br

Silveira, Z. C., silveira@sc.usp.br

Fortulan, C. A., cfortula@sc.usp.br

Engineering School of Sao Carlos, Department of Mechanical Engineering, University of Sao Paulo.

Laboratory of the Tribology and Composites – LTC

Av. Trabalhador São Carlense, n°. 400, Sao Carlos, S.P, Brazil. CEP: 13566-590; Postal Box: 356.

Abstract: *In this work is presented the design development of a dicing saw machine considering the conceptual design, prototype built and validation tests. One of the great world tendencies in engineering is the generation of products every smaller and economic time. The electronic industry is the largest icon of that convergence, and the use of the silicon in the electronics is the main motivator in the development process of machining of precision cut (dicing) of fragile materials. Machines cut precision are equipments with very high structural rigidity, can adopt as cut tool: laser (laser saw), jet abrasive water (jet saw) or, the most common, discs of cut abrasives diamante (dicing saw). Abrasive discs demand the use very high rotation and low vibration, in general with aerostatic bearings reaching up to 60.000 rpm. The objective of this work is the development of dicing saw prototype for application on studies of subtracts alumina cutting. A design methodology was adopted to built a prototype of a mini-machine, where the cut capacity was defined for maximum blanks dimensions of 100 x 100 x 30 mm, using abrasive disc thickness of 0.25mm, diameter disc of 50.8 mm and rotating speed of approximately 120 m/s. Equipped with a CNC command turned able to realize resolution in the scale of tenth of micrometers. The prototype is validated by alumina cutting where it was found conditions optimized and limits in the commitment cut depth, feed rate and peripheral speed of the abrasive blade.*

Key-words: *design methodology, dicing saw, ultra-precision machine, alumina substrates.*