

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUIS ANTONIO OLIVEIRA ARAUJO

**Projeto conceitual e construção de um protótipo de uma minimáquina para o
corte de substratos de Alumina.**

**São Carlos
2009**

LUIS ANTONIO OLIVEIRA ARAUJO

Projeto conceitual e construção de um protótipo de uma minimáquina para o corte de substratos de Alumina.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan

São Carlos

2009

Aos meus pais, Rubens e Heloisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, em especial, pais, irmãs e irmão, por tudo;

À minha namorada, Juliana, pelo amor e companheirismo. Mesmo longe parecia tão perto;

Ao prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan, pela amizade e orientação;

Ao Sr. Líbero Delalíbera, pelo incentivo e apoio;

À prof. Dra. Zilda de Castro Silveira, ao prof. Dr. Renato Goulart Jasinovicus, à prof. Dra. Luciana Montanari, ao Ms. Eng. Walter Aparecido Mariano, ao Dr. César Renato Foschini, ao aluno de IC Sr. Gabriel Ferreira De Filippis e ao Sr. Robert Dias Ximenes, pela contribuição e parceria;

Ao Sr. José Carlos Risardi e Sr. Mauro Olivatto, um agradecimento especial pela dedicação na execução desse projeto;

Aos Srs. Daniel e Donizetti da Cerauto;

Ao pessoal da DISCO HI-TECH AMERICA E EUROPE, Delta Tau Systems, Yaskawa do Brasil LTDA e EPCOS, pela atenção dispensada comigo;

À EESC / USP em especial aos funcionários da biblioteca central e pós-graduação, pela oportunidade e assistência;

Ao pessoal do LTC, LAMAFE, IQSC e DEMA/UfsCar, parceiros indiretos e diretos;

Aos amigos: Elias, Celso, Fofuxo, Wilian, Elô, Ladislau, Mel, Liliane, o pessoal do “predinho” e “agregados”. Sugestões e incentivos essenciais em qualquer trabalho;

Ao pessoal da FPM, pelo incentivo e pela crença no meu potencial.

RESUMO

ARAUJO, L.A.O. (2009). **Projeto conceitual e construção de um protótipo de uma minimáquina para o corte de substratos de Alumina**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

O trabalho aborda o processo de corte de substrato cerâmico, estuda e propõe uma estratégia de projeto para a concepção e tomada de decisões de uma mini *dicing saw*. A tecnologia dos componentes eletrônicos modernos esta baseada no emprego de finos e estreitos substratos cerâmicos ou de silício. Uma das técnicas para a obtenção destas peças, faz uso da segmentação do substrato maior onde são depositadas as trilhas e os componentes de milhares de partes. O corte desses substratos, quando feito por meio abrasivos, emprega discos superabrasivos de espessura próxima a 0,2mm e velocidades periféricas acima de 30m/s. Nestas condições é exigido baixo ruído, alta precisão de giro e elevada velocidade rotacional, geralmente obtido através de mancais aerostáticos cerâmicos. O trabalho foi organizado em projeto conceitual e construção de um protótipo de uma *dicing saw* ou *dicing machine*. O protótipo admite peças com dimensões de até 100 x 100 mm podendo cortar até 5 mm de profundidade dependendo do diâmetro do disco de corte. O trabalho avalia condições de corte, como: velocidade de avanço de corte, desgaste e velocidade de rotação do disco abrasivo, profundidade de corte e a qualidade final do corte, como: trincas, lascas, linearidade do corte, características estas qualificadas e quantificadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e perfilometria. Estudos preliminares de corte de blocos de Alumina foram realizados, detectando condições estáveis de produção na faixa de 5 a 13mm/s. Menor desgaste do disco em baixas rotações e maiores esforços de corte em grandes profundidades de penetração e avanço do disco abrasivo.

Palavras-chave: *dicing saw*. *Dicing Machine*. Máquina de corte. Substrato.

ABSTRACT

ARAUJO, L.A.O. (2009). **Conceptual project and construction of a mini dicing prototy to cut Alumina substrate.** Dissertation – School of Engineering of Sao Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2009.

This work studies the dicing process of ceramic parts and proposes a project strategy to concept and take decisions about configuration for a preliminary project and the construction of a dicing saw or dicing machine prototype. The technology used by modern electronic components is based on narrow and thin ceramic or silicon. One of the techniques to obtain these products is to dice a larger substrate using an abrasive blade to generate low damages and high productivity. The dicing abrasive process uses abrasive blades with thickness around 0,2 mm and peripherycal speeds of 30 m/s. On these conditions, low noise, high precision and high rotation is required, conditions generated by ceramic aerostatic spindles. This work is managed in preliminary project and construction of a dicing saw or dicing machine prototype. This prototype is able to cut substrates with square shape 100 x 100 mm and depth of 5 mm depending on the blade diameter. This work tests cutting conditions as: feed rate, blade wear, blade speed, and also test the die final quality as: chipping, cracking, dicing linearity. quantity and quality characteristics were both verified by electronic microscopes and perfilometry. Preliminary studies about dicing ceramic parts detected stable production in 5 to 13mm/s. Lower blade wear in lower rotations and higher cutting forces in higher cutting depth and feed rate.

Keywords: dicing saw. Dicing machine. Substrate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo de vida de um produto (PAHL et al., 2005).	23
Figura 2.2 – Fases do processo de projeto de um produto (BACK, 1983).	24
Figura 2.3 – Atividades de projeto – fases primárias (BACK, 1983).....	25
Figura 2.4 – Atividades de projeto nas diferentes etapas de desenvolvimento de um produto (BAXTER, 1998).	27
Figura 2.5 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto (PAHL et al., 2005).	28
Figura 2.6 – Funil de decisões (BAXTER, 1998).	30
Figura 2.7 – Correlação entre atividades de projeto e possíveis ferramentas a serem utilizadas (BAXTER, 1998).	31
Figura 2.8 – Quadro morfológico (PAHL et al., 2005).	33
Figura 2.9 – Tendências das máquinas de precisão (TANIGUCHI (1983) apud PORTO et al., 2004, p.1).	34
Figura 2.10 – Classificação de processos de usinagem segundo tolerância e produtos (MCKEOWN (1987) apud PORTO et al., 2004, p.2).	35
Figura 2.11 – <i>Dicing Machine</i> (UNITED STATE PATENT 5842461, 1998).	36
Figura 2.12 – <i>Semiconductor Wafer Dicing Machine</i> (UNITED STATE PATENT 4688540, 1987).	37
Figura 2.13 – Tipos de laser (LIZOTTE, 2003).	39
Figura 2.14 – Lentes para concentração do laser (HAMAMATSU PHOTONICS K.K. Disponível em: < http://jp.hamamatsu.com/products/semicon-fpd/pd393/L9570-01/index_en.html >. Acessado em: 20 de abril de 2009).	39
Figura 2.15 – <i>Laser saw</i> guiada por <i>Waterjet saw</i> (PERROTTET, DURANT, RICHERZHAGEN, 2006).	40
Figura 2.16 – Funcionamento <i>Waterjet Saws</i> DAD 4110 (DISCO CORPORATION. Disponível em:< http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/water.html >. Acessado em: 06 de outubro de 2007).	41
Figura 2.17 – Flexibilidade de trajetórias <i>Dicing Waterjet Saws</i> DAD 4110 (DISCO CORPORATION. Disponível em:< http://www.disco.co.jp/eg/products/catalog/pdf/daw4110.pdf >. Acessado em: 06 de outubro de 2007).	42

Figura 2.18 – Corte de material semicondutor, (UNITED STATE PATENT 693.9785 B2, 2005).	43
Figura 2.19 – Opções de <i>dicing saws</i> .	44
Figura 2.20 – Conceito básico de uma <i>Dicing Machine</i> (BORGES, 2004).	44
Figura 2.21 – Formas de fixação do material junto à mesa de corte. Em a) verificamos o uso de tape adesivo sobre um tape de PVC, ambos para sacrifício (GIDEON, 2008). Em b) ilustra os formato dos tapes adesivos e frame (Disponível em:< http://www.lintec.co.jp/e-dept/english/adwill/products/di_t.html >. Acessado em: 21/03/2008). Na Figura c) uma montagem com vidro e adesivo e, por fim, em d) uma montagem mecânica (GIDEON, 2008).	45
Figura 2.22 – Ferramenta de corte inclinada – Série 7100 da Advanced Dicing Technology (ADT) (Disponível em:< http://www.bitase.se/bitase1/datasheets/ADT-7100-Brochure-SE.pdf >. Acessado em: 21/03/2008).	46
Figura 2.23 – Em a), planos de corte da DAD 3350 da DISCO CORPORATION (OPERATION MANUAL, 2007). Em b) planos de movimentação Nano Ace da LOADPOINT LTD (Disponível em:< http://www.micrope.com/Files/Nanoace_Brochure.pdf >. Acessado em:13/03/2008).	47
Figura 2.24 – Formatos admissíveis para corte em dicing machines inclinada – Série 7100 da Advanced Dicing Technology (ADT),(Disponível em:< http://www.bitase.se/bitase1/datasheets/ADT-7100-Brochure-SE.pdf >. Acessado em: 21/03/2008).	48
Figura 2.25 – Máximas velocidades dos mancais WESTWIND em diferentes processos de fabricação (Disponível em:< http://www.westwind-airbearings.com/airBearing/highSpeed.html >. Acessado em: 15/04/2008).	48
Figura 2.26 – Mancal aerostático (Disponível em:< http://www.westwind-airbearings.com/airBearing/documents/AirBearingTechnologybriefv2.pdf >. Acessado em: 18/04/2008).	49
Figura 2.27 – Cabeçote com mancais aerostáticos WESTWIND modelo D1592 (Disponível em:< http://www.westwind-airbearings.com/specialist/documents/WaferDicing_000.pdf >. Acessado em: 18/04/2008).	50
Figura 2.28 – Montagem disco de corte, flange e <i>spindle</i> (DISCO CORPORATION. OPERATION MANUAL, 2007).	51

Figura 2.29 – Discos de corte em funcionamento (Disponível em:< http://www.disco.co.jp/eg/products/catalog/pdf/dad3220.pdf >. Acessado em 07/03/2007).	52
Figura 2.30 – <i>Dicing saw</i> automática DFD 6450 (dois spindles), (Disponível em:< http://www.disco.co.jp/eg/products/catalog/pdf/dfd6450.pdf >. Acessado em: 21/06/2008).	52
Figura 2.31 – A evolução da microeletrônica. O volume que ocupa 150.000 transistores é comparado com um pequeno chip de silício que contem quase que o mesmo número de transistores (Fonte: Deutsches Museum, Munique, Alemanha, visita em 17/06/2008).	54
Figura 2.32 – Esboço a) corte laser e e b) corte jato d’água (Fonte: Anotações Thomaz Lieberenz, maio de 2008).	55
Figura 2.33 – Discos de corte: a) disco de diamante e resina, b) disco tipo <i>hub</i> , c) disco serrilhado de diamante e resita e d) disco de metal (Disponível em: < http://www.disco.co.jp/eg/products/blade >. Acessado em: 03/07/2007.	56
Figura 2.34 – Grãos abrasivos usados na fabricação de discos abrasivos de corte. Em a) grãos diamante e em b) grãos de CBN (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).	57
Figura 2.35 – Correlação escala mesh e milímetros (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).	58
Figura 2.36 – Tamanho do grão em discos de corte abrasivo (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).	58
Figura 2.37 – Abrasividade (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).	60
Figura 2.38 – Disco abrasivo a) antes e b) após dressagem ou pré-corte (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).	60
Figura 2.39 – Dressagem. Em a) o disco abrasivo pode ter sua abrasividade aumentada após operação de dressagem. A figura b) ilustra a exposição do grão de diamante(GIDEON, 2008)	61
Figura 2.40 – Perfil topográfico de discos abrasivos. Em a) poros e em b) <i>chip pocket</i> (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).	61

Figura 2.41 – Corte por disco abrasivo de grãos grandes (Disponível em: < http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dicing_thin.html >. Acessado em: 18/06/2007).....	62
Figura 2.42 – Corte com disco abrasivo de grãos pequenos(Disponível em: < http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dicing_thin.html >. Acessado em: 18/06/2007).....	62
Figura 2.43 – Corte <i>dual</i> (GIDEON, 2008).....	63
Figura 2.44 – Sentido de giro, a) sentido horário e b) sentido anti-horário (GIDEON, 2008).....	64
Figura 2.45 – Trajetórias de corte. Em a) o disco passa sobre o material sem tocá-lo, preservando o sentido de corte em todos os cortes. Em b) o disco retorna a posição inicial alterando o sentido de corte (DISCO CORPORATION. OPERATION MANUAL, 2007).....	65
Figura 2.46 - Processo de corte de filmes finos (Disponível em: < http://www.disco.co.jp/eg/products/description/description01.html >. Acessado em: 18/06/2007).....	65
Figura 2.47 – Problemas de inclinação do disco de corte decorrente de: a) imperfeições da flange e b) excesso de torque no aperto da flange (GIDEON, 2008).	66
Figura 2.48 – Cortes gerados por inclinação do disco de corte: a) perda de perpendicularismo com relação ao topo e base e b) perda de linearidade (GIDEON, 2008).....	66
Figura 2.49 – Largura de corte (<i>kerf width</i>) e espessura do disco (<i>blade width</i>) (GATSEN, 2001).....	67
Figura 2.50 – Relação entre área exposta do disco abrasivo montado na flange e sua espessura (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).....	67
Figura 2.51 – Geometrias especiais (GIDEON, 2008).....	68
Figura 2.52 – Ângulo de aproximação (Φ) (GIDEON, 2008).	68
Figura 2.53 – DBG (Disponível em: < http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dbg.html >. Acessado em: 18/06/2007)...	69
Figura 2.54 – Sistema de aquisição de dados de força de corte com dinamômetro junto à mesa de corte (KIM et al., 2007).	70

Figura 2.55 – Modelo de Matsui para o corte abrasivo (MATSUI apud MIZUNO, IYAMA e ZHANG, 2008)	73
Figura 2.56 – Mecanismos de corte no silício (111) (LUO e WANG, 2008).	76
Figura 2.57 –Mecanismos de corte no silício (111). Em a) fase elástica, em b) fase de deformação plástica, em c) fase de <i>cracking</i> e em d) fase de super intensidade acústica / grandes lascas (LUO e WANG, 2008).	76
Figura 2.58 – Regiões de <i>chipping</i> (GIDEON, 2008).	78
Figura 2.59 – <i>Chippings</i> mais comuns do lado superior: a) sequência de pequenas lascas e b) sequência de lascas maiores (GIDEON, 2008).	78
Figura 2.60 – Geração de lascas por baixa rotação (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).....	80
Figura 2.61 – Velocidade de corte por força de corte (Disponível em: < http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dicing_thin.html >. Acessado em:18/06/2007).	80
Figura 2.62 - Silício trincado por esforço de corte excessivo (Disponível em: < http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dicing_thin.html >. Acessado em:18/06/2007).	81
Figura 2.63 – Equação experimental da máxima largura de corte (KIM et al., 2007).	82
Figura 2.64 – Geração de lascas na parte inferior do material. Em a) lascas na parte inferior e em b) <i>The lip effect</i> (GIDEON, 2008).	83
Figura 3.1 – Estratégia de projeto proposta.	84
Figura 3.2 – Procedimento de tomada de decisão resumido.	85
Figura 3.3 – Estrutura em “L” (SLOCUM, 1992).....	95
Figura 3.4 – Estrutura tipo Ponte (SLOCUM, 1992).	96
Figura 3.5 – Definição de resolução, acurácia e repetibilidade (SLOCUM, 1992).....	99
Figura 3.6 – Ideias sobre organização da movimentação dos eixos. Em a) movimentação XYZ e Θ no mesmo conjunto de mesas. Em b) movimentação XYZ em um conjunto e Θ na mesa. Em c) movimentação no plano horizontal (ZX) e vertical (Y), faltando o giro Θ	102
Figura 3.7 – Conceitos de minimáquinas de corte. Em a) estrutura em “L”. Em b) tipo ponte.	103

Figura 3.8 – Conceito escolhido para o projeto do protótipo de uma minimáquina de o corte de substratos de materiais frágeis. Em a) primeira ideia. Em b) evolução da ideia.	103
Figura 3.9 – Segundo o manual de guias lineares e patins da HIWIN, a) a montagem horizontal de quatro patins sob a mesa deve adotar patins que suportam a b) carga P (1, 2, 3 e 4) segundo as equações citadas.....	106
Figura 3.10 - Trilho e patim selecionado HGH – 15CA (HIWIN).....	107
Figura 3.11 - Cálculo da força aplicada em cada patim na vertical HIWIN. Em a) diagrama de montagem e distribuição de forças. Em b) a expressão que define os esforços P (1, 2, 3 e 4).....	108
Figura 3.12 - Montagem dos patins e guias lineares HIWIN. Em a) montagem sugerida e em b) montagem projetada.	109
Figura 3.13 - Princípio de uma placa de vácuo (KÖNIG et al., 1991).....	111
Figura 3.14 - Distorções devido às forças geradas pela placa de vácuo (KÖNIG et al, 1991)	111
Figura 3.15 – Placa CNC 3AX, a) layout da face superior e b) layout da face inferior. Em c) a placa pronta.....	113
Figura 3.16 – Modelo para cálculos de deflexões.....	114
Figura 3.17 – Tolerâncias da estrutura.	115
Figura 3.18 – Desenho do conjunto montado: protótipo minimáquina de corte.	116
Figura 3.19 – Desenho do conjunto montado em perspectiva: protótipo minimáquina de corte.....	116
Figura 3.20 – Chapas entregues para usinagem.....	118
Figura 3.21 – Estrutura montada com parafusos.....	118
Figura 3.22 – Solda da estrutura – especificação de projeto.....	119
Figura 3.23 – Estrutura montada com parafusos e soldada. Em a) visão geral. Em b) detalhe do cordão.	120
Figura 3.24 – Diagrama de tempo e temperatura no alívio de stress residual em aços (Metals Handbook V4, ASM).	120
Figura 3.25 – Acabamento superficial	121
Figura 3.26 – Usinagem de desbaste (após soldagem). Em a) fresamento de uma das faces. Em b) detalhe para o degrau de apoio dos trilhos. Em c) pré-montagem e por fim, d) início da etapa de pintura.	122
Figura 3.27 – Usinagem do assento dos trilhos (detalhe).....	123

Figura 3.28 – Usinagem do assento dos trilhos (detalhe).	123
Figura 3.29 – Carcaça mancal.	124
Figura 3.30 – Mesa de corte à vácuo, detalhe de canais de captação do ar.	124
Figura 3.31 – Mancal montado.....	125
Figura 4.1 – Desenho de projeto da minimáquina de corte de materiais frágeis.....	126
Figura 4.2 – Protótipo de uma minimáquina de corte de materiais frágeis.....	127
Figura 4.3 – Sistema montado para ensaio.....	128
Figura 4.4 - Curva de queima aplicada nas placas de Alumina.....	129
Figura 4.5 – Disposição das peças sobre base metálica para retificação.	130
Figura 4.6 – Peça cortada	131
Figura 4.7 – Condições de corte.	132
Figura 4.8 – Corpo de prova.....	135
Figura 4.9 – Experimento 1A.....	136
Figura 4.10 – Perfis e medidas de rugosidade	138
Figura 4.12 – Desgaste e Potência consumida em rotação de disco de 20.000 rpm.	140
Figura 4.13 – Desgaste e Potência consumida em rotação de disco de 30.000 rpm.	141
Figura 4.14 – Desgaste médio do disco abrasivo.....	142
Figura 4.15 - Corte em desvio	143
Figura 4.16 – Ensaio, em detalhe.....	144
Figura 4.17 – Ensaio.	145
Figura 4.18 – Corpo de prova – validação minimáquina de corte. Em a) visão geral, b) e c) visão aproximada dos cortes.....	146
Figura D.1 – Diagrama de Gantt	160

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Materiais ligantes mais comuns para discos de corte abrasivos (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).....	59
Quadro 2 – Condições do experimento (KIM et al., 2007).....	72
Quadro 3 – Análise morfológica da minimáquina.	93
Quadro 4 – Materiais da estrutura.	94
Quadro 5 – Estrutura da máquina <i>dicing</i>	97
Quadro 6 – Parâmetros experimentais.	132
Quadro 7 – Comparativo entre potência média requisitada pelo <i>spindle</i> em cada condição de corte.	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas de cerâmicas avançadas (MAMALIS et al., 2002).	77
Tabela 2 – Cotações iniciais para o projeto	87
Tabela 3 – Cotações para o projeto	88
Tabela 4 – Composição Alumina Calcinada A1000-SG (fonte: Almatris, Inc.)	128
Tabela 5 – Dados sobre retração e densidade das barras após sinterização	129
Tabela 6 – Características do disco de corte abrasivo	131
Tabela 8 – Disponibilidade de literatura pertinente em algumas bibliotecas.	154
Tabela 9 – Pesquisa na internet.....	155
Tabela 10 – Folha de avaliação A1	158
Tabela 11 – Folha de avaliação A2	159

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Objetivos do trabalho	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Metodologia de Projeto	21
2.2 Máquinas de usinagem de corte	34
2.2.1 <i>Laser saw</i>	38
2.2.2 <i>Waterjet Saw</i>	40
2.2.3 <i>Dicing Saw</i>	42
2.3 O processo de corte abrasivo	53
2.3.1 Disco de corte.....	56
2.3.2 Considerações teóricas sobre o processo de corte abrasivo.....	62
2.3.2.1 Geometria de corte	63
2.3.2.2 Forças de corte	69
2.3.2.3 Mecanismo de corte	75
2.3.2.4 Defeitos de corte.....	77
3 MATERIAIS E MÉTODOS	84
3.1 Etapas de Projeto	84
3.1.1 Identificação da demanda.....	85
3.1.2 Estudo da viabilidade técnica e econômica	86
3.1.2.1 Reconhecimento da fase do ciclo de vida das <i>dicing saw</i>	86
3.1.2.2 Percepção da capacidade EESC / USP São Carlos.....	89
3.1.2.3 Conclusão da análise de viabilidade.....	90
3.1.3 Projeto conceitual de uma mini <i>dicing</i>	91
3.1.3.1 Delimitação do projeto	91
3.1.3.2 Quadro morfológico	92
3.1.3.3 Conceito.....	101
3.1.4 Projeto Preliminar	104
3.1.4.1 Projeto das mesas	104
3.1.4.2 Projeto da estrutura da minimáquina	114
3.1.4.3 Conjunto montado	115
3.1.4.4 Planejamento da fabricação do protótipo.....	117
3.1.5 Fabricação do Protótipo.....	117

3.1.5.1 Estrutura.....	118
3.1.5.2 Mesas.....	122
3.1.5.3 Alojamento dos mancais	124
3.1.5.4 Mesa de corte.....	124
3.1.5.5 Motores	125
3.1.5.6 Fusos	125
3.1.5.7 Sistema de movimentação	125
4 RESULTADOS	126
4.1 O protótipo <i>dicing saw</i>	126
4.2 Ensaio de validação	127
4.2.1 Organização dos ensaios	130
4.2.2 Resultados e discussões obtidos nos experimentos preliminares.....	133
4.2.2.1 Desempenho de corte - Análise de Imagens.....	133
4.2.2.2 Desempenho de corte - Desempenho do disco	138
4.3 Validação do protótipo.....	144
5 CONCLUSÕES	147
5.1 - Sugestões para trabalhos futuros	148
6 REFERÊNCIAS.....	149
APÊNDICE A.....	154
APÊNDICE B.....	158
APÊNDICE C	159
APÊNDICE D	160

1 INTRODUÇÃO

Na década de 1990, o sistema de telefonia no Brasil atingiu níveis de crescimento muito altos. Tanto a telefonia móvel como fixa, tornaram-se acessíveis a todas as classes sociais, aumentando consideravelmente a demanda por aparelhos telefônicos, que por sua vez, incentivou as indústrias detentoras da tecnologia telefônica a investirem no aumento de sua capacidade produtiva. Ainda hoje, o crescimento desse ramo é claro.

A telefonia é um exemplo significativo no contexto industrial nacional, mas é fundamental salientar que outros setores também se desenvolveram nos últimos anos, como por exemplo: a indústria de sensoriamento, fundições, usinas, indústrias metalúrgicas em geral, agroindústria, indústria petrolífera, aeronáutica e naval. Mesmo que direta ou indiretamente, a indústria brasileira produz e exporta cada vez mais produtos, incluindo, produtos de tecnologia (DE CONTI, 2006).

Resultado da estabilidade econômica e de políticas de crescimento, o país comercializa hoje mais tecnologia do que há 30 anos atrás. Termos e expressões como: microeletrônica, cerâmicas eletrônica, biomateriais, tecnologia nanométrica, outras, são cada vez mais comuns na indústria e centros de pesquisa brasileiros. O acesso a novas tecnologias e informações vem se tornando cada vez mais fácil.

Seguindo algumas das tendências tecnológicas mundiais, como: automação, robotização, miniaturização e comunicação, o país vem explorando a microeletrônica em todas as suas etapas de produção e comercialização.

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.

1.1 Objetivos do trabalho

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 microcomponentes 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 minimáquina de corte e sua validação através da fabricação de um protótipo e ensaios de corte de bloco de Alumina.

O objetivo secundário é: a concepção da minimáquina, 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.

Ainda como objetivos secundários, pode-se citar:

- Desenvolvimento de um procedimento de projeto que satisfaça a construção de um protótipo de qualidade;
- 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;
- Estudo e difusão do processo de usinagem de corte de precisão no país;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, três itens serão abordados: metodologia de projeto, máquinas de precisão e o corte de precisão de substratos de materiais frágeis.

O tema de metodologia de projeto tem vasta literatura. Normalmente, é abordado por autores de livros de projeto de engenharia. No entanto, essa abordagem pode ser considerada superficial quando comparada à literatura específica do tema. Muitos autores citam a metodologia de projeto em praticamente um único capítulo como pode ser visto em Norton (2006), Shigley, Mischke e Budynas (2005), Slocum (1992), entre outros.

Um dos objetivos deste trabalho é desenvolver uma estratégia de projeto adequada para a construção de uma minimáquina para o corte de materiais frágeis. Com base em técnicas e ferramentas de metodologia de projeto, tanto para concepção, quanto para a tomada de decisões e configurações iniciais. Portanto, o item 2.1 abordará uma literatura específica sobre projeto de engenharia, aonde constam instrumentos de análise e desenvolvimento de projeto. Referências como: Pahl et al. (2005), Back (1983), Baxter (1998), entre outros, compõem base ao tema.

O item 2.2 localiza as máquinas de corte de materiais frágeis no contexto das máquinas de usinagem, explorando os diferentes tipos de máquinas de corte, elementos cortantes (laser, jato d'água e disco abrasivo) e aspectos construtivos. As principais fontes desse item foram: visitas técnicas a fabricantes de máquinas de corte, curso de operação e manutenção de uma máquina de corte, catálogos, artigos, patentes e algumas literaturas pertinentes, como: Slocum (1992), Porto et al. (2004) e Koenigsberger (1978).

O capítulo 2 finaliza com o processo de usinagem de corte abrasivo de materiais frágeis, subdividindo-se em estudos detalhados sobre discos de corte e considerações teóricas sobre o processo de corte abrasivo.

2.1 Metodologia de Projeto

A primeira conferência sobre metodologias de projeto ocorreu em 1962, na cidade de Londres, Inglaterra. Esse encontro oficializou a metodologia de projeto como campo de estudo e pesquisa. Porém existem indícios anteriores da aplicação

de métodos na solução de problemas e na geração de ideias. Leonardo da Vinci aplicava métodos de forma consciente, quando solucionando problemas ou assimilando alguma nova informação. Durante a segunda guerra, pesquisadores estudavam a organização do pensamento na tentativa de otimizar processos produtivos e atividades de projeto (LÖVGREN, 2002).

Pahl et al. (2005) explica que a atividade de projeto se origina por uma demanda. Essa demanda pode ser a necessidade de uma inovação (de produto/serviço), uma adaptação (de produto/serviço) ou uma alteração (de produto/serviço).

Back (1995) considera a atividade de projeto como ações orientadas para o atendimento às necessidades humanas, principalmente daquelas que podem ser satisfeitas por fatores tecnológicos da nossa cultura. Diferencia-se o projeto de engenharia, de outros projetos, pelo seu grau de complexidade, quando é exigido o uso de procedimentos de otimização, decisão e prognósticos.

É importante definir desde já, que este trabalho faz referência ao projeto de engenharia, no entanto, devido a uma conveniência linguística; a expressão “**projeto de engenharia**” será tratada apenas como “**projeto**”.

Segundo Pahl et al. (2005) a atividade de projeto é parte significativa do ciclo de vida de um produto. Na Figura 2.1, é possível verificar atividades de projeto disseminadas em praticamente todas as etapas do ciclo de vida de um produto.

A literatura conta com vários modelos morfológicos de projeto. São atividades de projeto organizadas de forma coerente, quase sempre iterativas, específicas ou abrangentes ao tema do projeto. O modelo morfológico descrito por Back (1983) tem relevância nesse contexto devido às suas inúmeras citações em artigos e livros. O modelo sugere as atividades de projeto divididas em fases primárias do projeto e fases relacionadas ao ciclo produção-consumo. O primeiro grupo está relacionado com as atividades de viabilidade técnica do produto, concepção, identificação do mercado consumidor, chegando até o detalhamento do projeto, enquanto o segundo grupo engloba as atividades ligadas ao processo de fabricação, serviços de apoio e descarte ou reciclagem do produto (Figura 2.2).

Cada fase possui uma sequência de desenvolvimento, com técnicas e ferramentas. Back (1983) especifica que as fases primárias dependem da equipe de projeto e marketing, sendo que, nas fases posteriores, há a inclusão de outras equipes, como: produção, manufatura, vendas, fornecedores, outros.

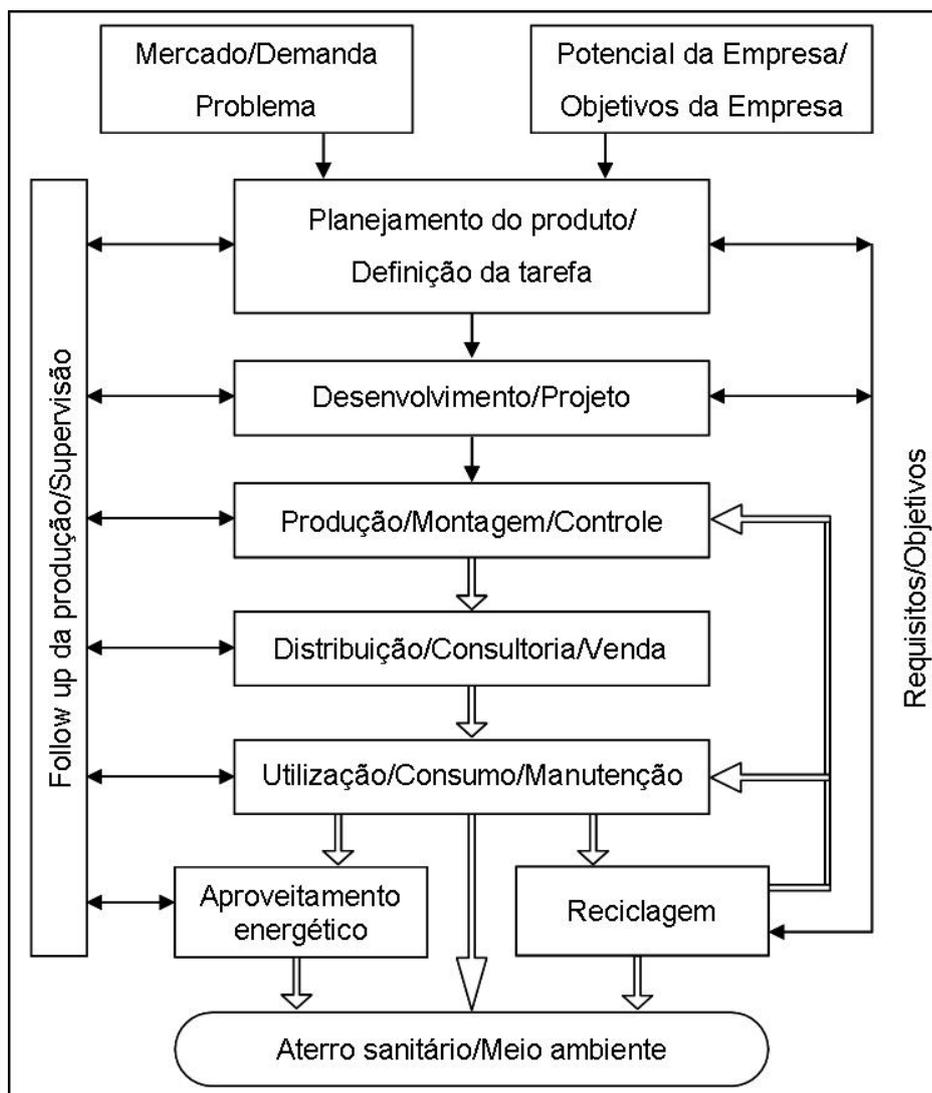


Figura 2.1 – Ciclo de vida de um produto (PAHL et al., 2005).

- Fase 1 – Estudo de viabilidade: um projeto é iniciado quando há a identificação de uma necessidade ou demanda. Essa necessidade é proveniente de várias fontes: inovações tecnológicas, avanço científico, fatores econômicos ou a criação de oportunidades (nichos de mercado). Ela deve ser estudada em toda sua abrangência, incluindo problemas e limitações. Após a identificação da necessidade e da viabilidade técnica e econômica, inicia-se o projeto conceitual, que, por meio de técnicas apropriadas, deve indicar um conjunto de soluções potencialmente viáveis.
- Fase 2 – Projeto preliminar: a partir do conjunto de soluções obtidas na fase anterior, estuda-se a configuração, os parâmetros de projeto e viabilidade física de cada solução através de diversas disciplinas da engenharia, como

por exemplo: estática, cinemática, dinâmica, elementos de máquina, ciências dos materiais, termodinâmica, simulações, outros. Simulações computacionais, a partir de modelo analítico, numérico (CAE), ou em CAD, devem prever faixas operacionais para os parâmetros estudados, e se possível, construir um protótipo para testes e validação do modelo.

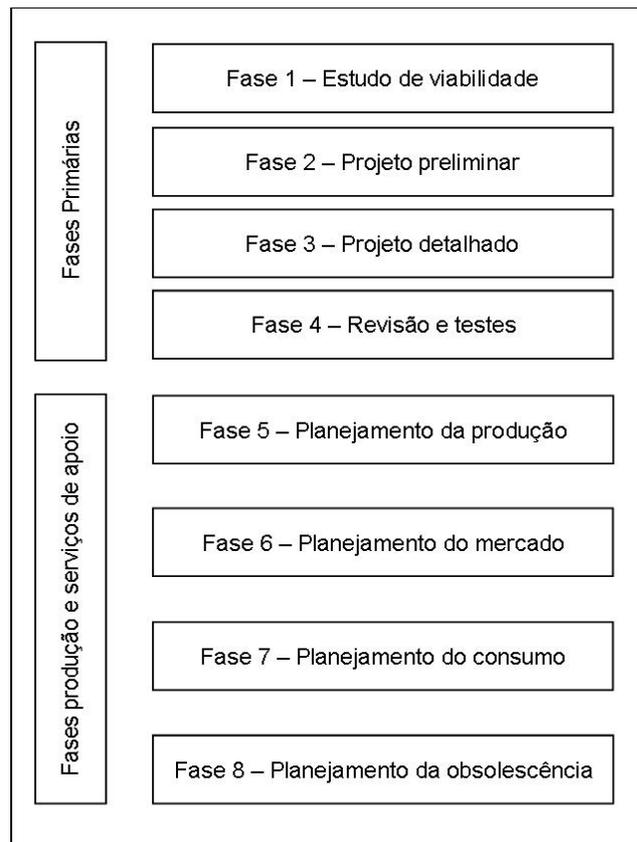


Figura 2.2 – Fases do processo de projeto de um produto (BACK, 1983).

- Fase 3 – Projeto detalhado: é a fase do detalhamento, seleção de peças e componentes, descrições, dimensionamento e desenho. Ao final dessa etapa, o projeto deve ter informações suficientes para ser fabricado.
- Fase 4 – Revisão e testes: essa fase também tem caráter de detalhamento, mas com uma abordagem voltada ao desempenho do produto. É uma fase de análise dos limites de funcionamento. As informações obtidas são materiais de reprojeção, até que se atinja um produto final aprovado.
- Fase 5 – Planejamento da produção: essa fase do projeto inclui a participação de equipes de produção, manufatura, fornecedores e outros. É a etapa de projeto do processo produtivo do produto.

- Fase 6 – Planejamento do mercado: apesar da viabilidade comercial ter sido explorada anteriormente (Fase1), a fase de planejamento do mercado é uma ratificação da logística de distribuição do produto.
- Fase 7 – Planejamento do consumo: essa fase também foi abordada no estudo de viabilidade, mas ela é retomada devido a sua grande importância no planejamento de coleta de informações no campo, acumulando informações para o aperfeiçoamento do projeto.
- Fase 8 – Planejamento da obsolescência: existe um grande planejamento de como inserir um produto no mercado, porém, também se faz necessário um planejamento para sua retirada quando obsoleto. Essa fase tem uma forte relação com o ciclo de vida do produto e o grau de flexibilidade em sua utilização. Nem sempre um produto tem sua obsolescência definida por desgaste técnico, mas sim por tendências ou defasagem tecnológica. Mesmo obsoleto, um produto tem um valor comercial e dependendo desse valor, faz-se necessário um planejamento de retirada do mercado.

A Figura 2.3 resume as considerações comentadas nas fases primárias:

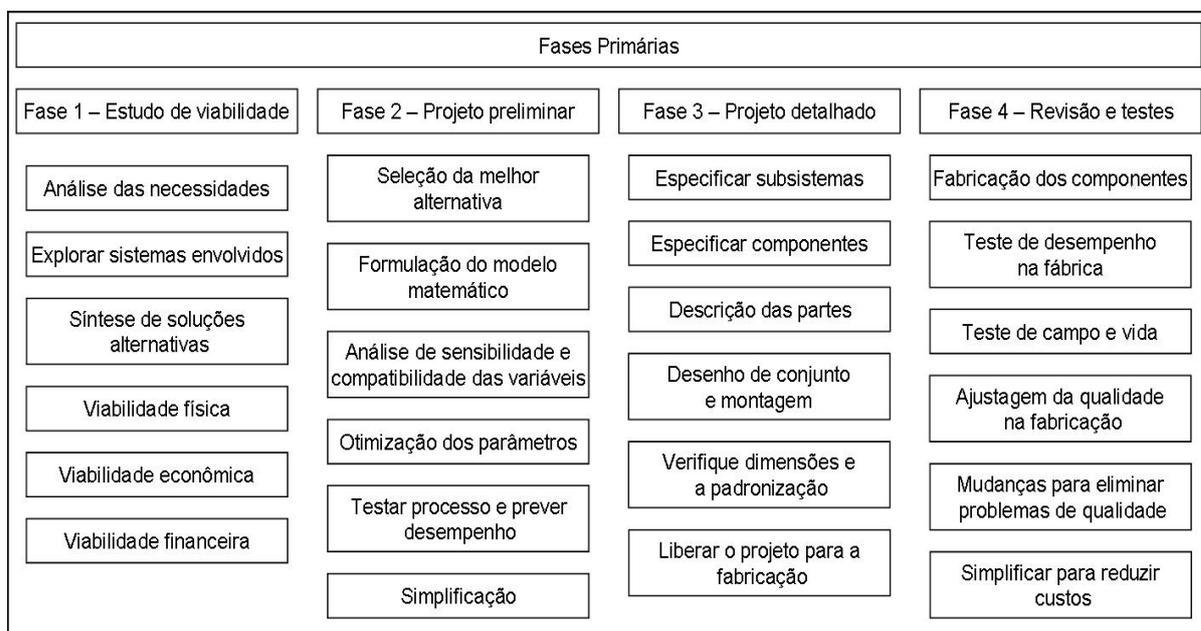


Figura 2.3 – Atividades de projeto – fases primárias (BACK, 1983).

Back (1983) explica que todo produto é dotado de particularidades, o que reflete diretamente no formato do seu projeto e nas atividades de projeto, porém, é possível observar fases de desenvolvimento comuns à maioria dos projetos.

Autores como Baxter (1998), descrevem a organização das atividades de projeto como uma ação complexa. Tudo depende de uma série de particularidades, como: filosofia da empresa, produto a ser projetado, pessoal envolvido, custos, riscos e incertezas. Além disso, atividades de projeto são caracterizadas por realimentações (ou reciclagens) e/ou antecipações, fatos de grandes benefícios, pois melhoram o produto devido a um aprofundamento do conhecimento do tema e, também, pela detecção de oportunidades e problemas despercebidos durante o desenvolvimento passado. A Figura 2.4 mostra as atividades de projeto estruturadas nas diferentes etapas (ou fases) de desenvolvimento de um produto.

Baxter (1998) sugere que a configuração do projeto está baseada em quatro fases:

A configuração do projeto começa com o conceito escolhido e termina com o protótipo completamente desenvolvido e testado. Ela compreende quatro fases:

- Geração de ideias, explorando-se todas as formas possíveis de fabricar o produto.
- Seleção de ideias, escolhendo-se a melhor ideia, em comparação com as especificações de projeto.
- Análise das possibilidades de falha e seus efeitos, para levantar os possíveis pontos de falha do produto.
- Construção e teste do protótipo, para aprovar ou rejeitar o projeto. (BAXTER, 1998, p. 231).

A expressão “conceito escolhido” faz referência ao projeto conceitual. É uma etapa que antecede a configuração do projeto.

Pahl et al. (2005) enfatiza que não existe um modelo único para o projeto do produto. Analisando as atividades de projeto, suas organizações e métodos mais comuns, o autor propõe três conjuntos de procedimentos e métodos mais comuns:

- Procedimentos e métodos da engenharia de sistemas: a engenharia de sistemas estabelece que um produto é um sistema formado por um conjunto

de elementos ordenados e interligados segundo suas características e delimitado pelo seu ambiente de aplicação.

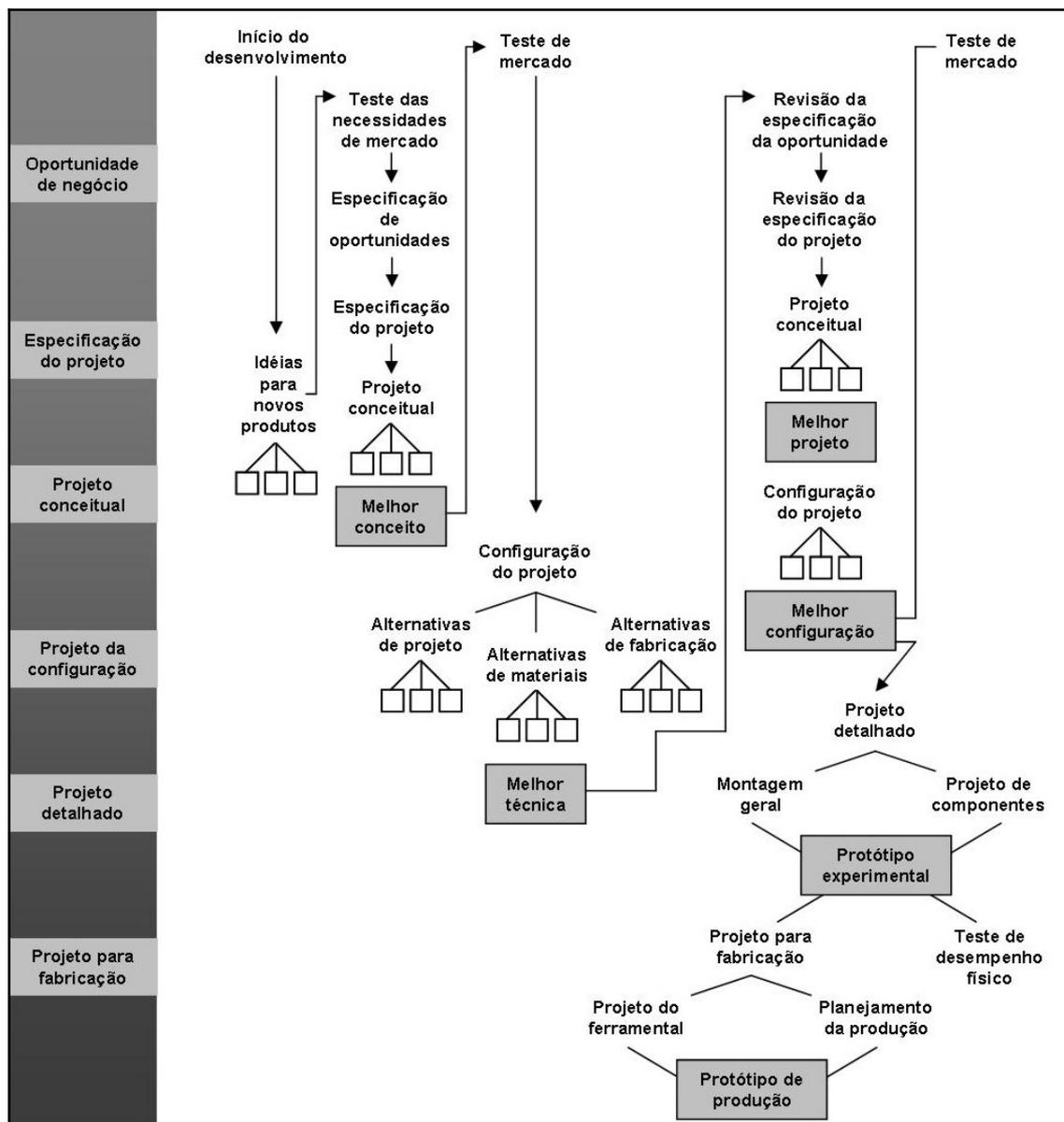


Figura 2.4 – Atividades de projeto nas diferentes etapas de desenvolvimento de um produto (BAXTER, 1998).

- O método da análise de valor, segundo a DIN 69910 (*Deutsche Ingenieurnormen*): o método de análise de valor trabalha a redução de custos de um produto e, por consequência, do projeto. Esse método dispõe de uma série de ferramentas, e dentre elas, ferramentas de análise contábil, como: base de cálculo dos custos, métodos de identificação dos custos, fixação das metas de custos, regras para minimização dos custos, outros.

- Métodos de projeto segundo as diretrizes da VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*): exibe conjuntos de métodos de análise em diferentes etapas de um projeto de produto. Destacam-se a VDI 2222, que define procedimentos e métodos no desenvolvimento de novos produtos, e a VDI 2221, Figura 2.5, que define um procedimento geral, abrangendo um grande número de aplicações (não apenas novos produtos). A tarefa é entendida como o elemento motivador para o desenvolvimento de um projeto.

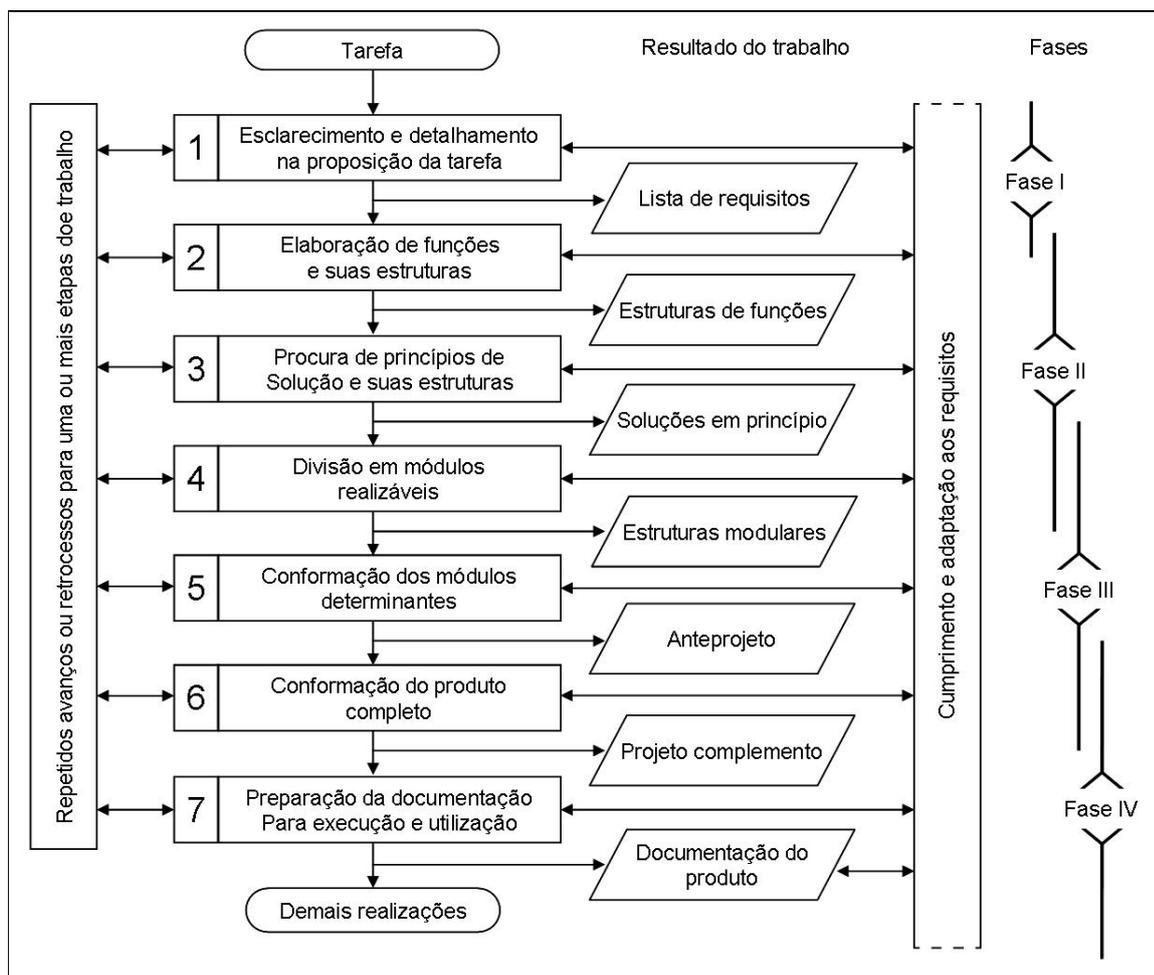


Figura 2.5 - Procedimento geral para o desenvolvimento do projeto (PAHL et al., 2005).

Pahl et al. (2005) ainda enfatiza que o procedimento geral para o desenvolvimento de um projeto pode ser desdobrado em quatro fases:

- Planejamento e esclarecimento da tarefa (Fase I): com o surgimento de um elemento motivador ou demanda, proveniente de uma necessidade comercial, tecnológica ou de qualquer outra origem, dá-se início ao projeto. Essa fase

caracteriza-se pela qualificação e quantificação exata da tarefa em uma lista de requisitos. Essas informações devem ser atualizadas durante todo o projeto.

- **Concepção (Fase II):** nessa fase existe uma geração de possíveis soluções (opções de projeto) que preenchem a lista de requisitos da fase anterior. Mais de uma solução pode satisfazer a lista de requisitos, forçando a geração de mais critérios de seleção.
- **Anteprojeto (Fase III):** encontrando-se uma solução que atende a lista de requisitos e mais alguns critérios de seleção, o anteprojeto avança na especificação técnica e econômica da solução selecionada.
- **Detalhamento (Fase IV):** é a fase de especificação definitiva da solução adotada. Entende-se por especificação definitiva, a definição de forma, dimensões, componentes, outros, que formam o produto, assim como o custo envolvido. O projeto deve conter informação o bastante para se construir um protótipo.

Pahl et al. (2005) descreve diferentes métodos em cada etapa de trabalho, como: métodos para o planejamento, para busca e avaliação da solução. Métodos para concepção. Métodos para anteprojeto. Métodos para detalhamento. Métodos para desenvolvimento de produtos em série e modulares. Métodos para desenvolvimento de produtos com garantia de qualidade, projetos auxiliados por computador, outros. Os métodos citados são ferramentas de geração de ideias, conceitos e tomada de decisão.

Ferramentas de tomada de decisão são fundamentais para o sucesso do projeto, tanto nas fases de planejamento quanto durante a sua execução. Produtos submetidos a estudos de viabilidade técnica e econômica antes do desenvolvimento têm 2,4 vezes mais chances de sucesso e, produtos bem dimensionados têm 3,3 vezes mais chances de sucesso (BAXTER, 1998).

Baxter (1998) cita o **funil de decisões** como uma das ferramentas de tomada de decisão durante o desenvolvimento qualitativo do projeto de um produto. Ele minimiza o risco do fracasso e incertezas (Figura 2.6). É uma ordenação do processo de tomada de decisões.

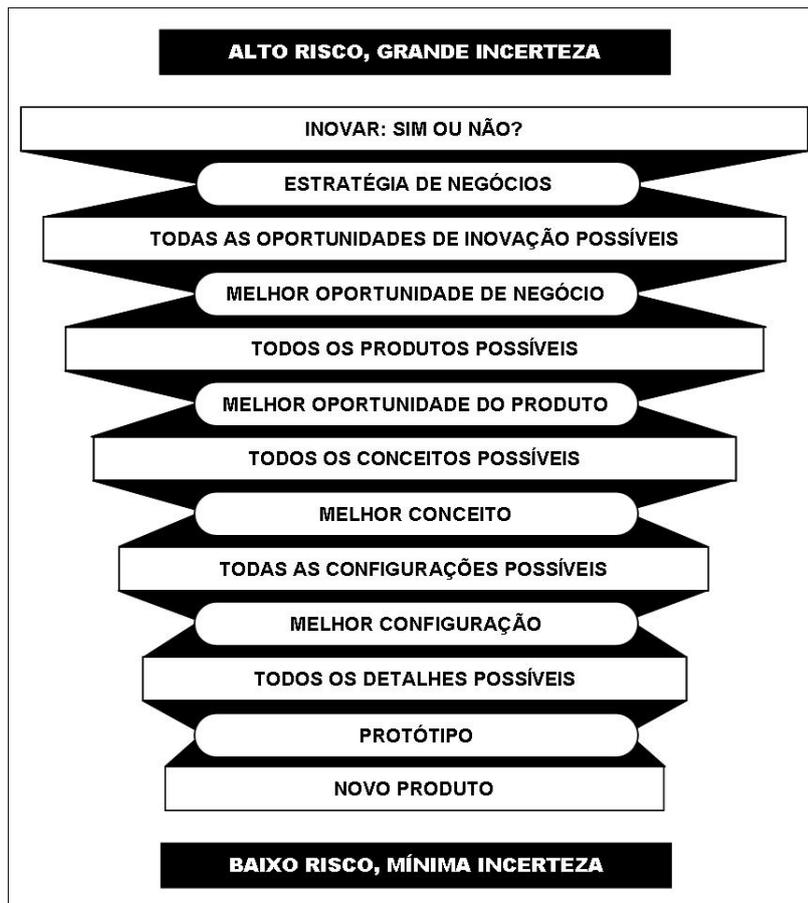


Figura 2.6 – Funil de decisões (BAXTER, 1998).

Baxter (1998) explica que um produto deve satisfazer as exigências do consumidor e se diferenciar de outros demais. O projeto conceitual é a etapa de projeto que desenvolve as linhas básicas da forma e função do produto. É a etapa em que se originam principalmente os elementos de diferenciação do produto. Nessa fase, o uso de técnicas de criatividade é fundamental para o sucesso do projeto e produto. A Figura 2.7 correlaciona algumas ferramentas existentes e suas respectivas atividades de projeto:

- Análise paramétrica compara características de produtos em desenvolvimento com produtos já existentes.
- Análise do problema é uma organização de questionamentos sucessivos a fim de explorar o elemento motivador do projeto.
- Anotações coletivas, Estímulo grupal e *brainwriting* são procedimentos em que um grupo de pessoas anota suas ideias sobre o tema proposto. Existem diferenças operacionais que distingue um procedimento de outro.

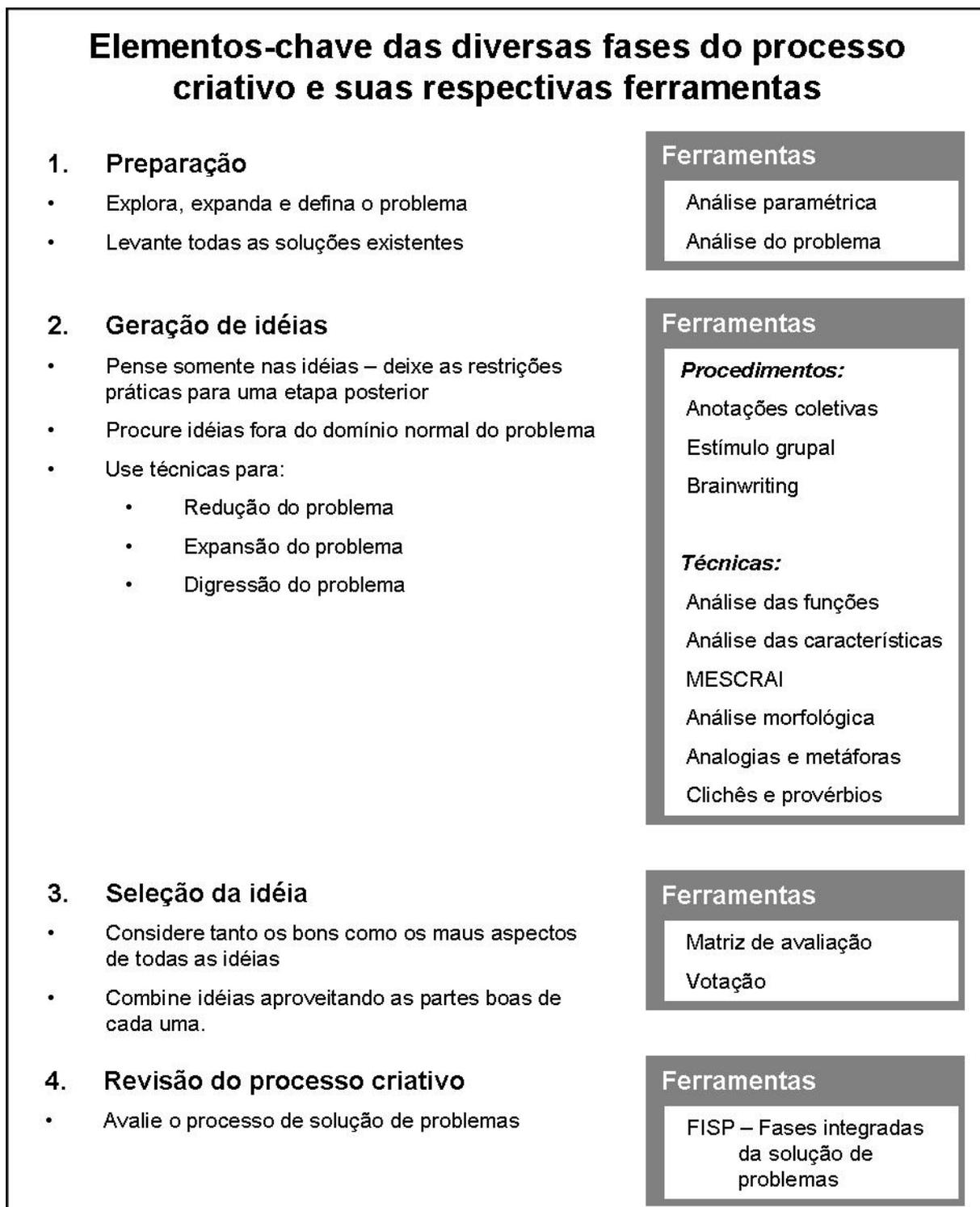


Figura 2.7 – Correlação entre atividades de projeto e possíveis ferramentas a serem utilizadas (BAXTER, 1998).

As técnicas de geração de ideias procuram redução, expansão ou digressão do elemento motivador do projeto (problema). Destacam-se as técnicas de:

- Análise das funções, na qual é listada as funções principais e secundárias do produto, interferindo diretamente na sua forma final;
- Análise das características aborda produtos já existentes, recombina suas características por meio de permutação e alterando a forma final do produto;
- MESCRAI é uma sequência de ações com o intuito de verificar possíveis alterações e/ou diferenciações de um produto já existente (MESCRAI significa: Modificar, Eliminar, Substituir, Combinar, Rearranjar, Adaptar e Inverter);
- Análise morfológica desenvolve possíveis combinações entre características do produto e as possíveis soluções. Várias opções podem servir como solução para a mesma característica de projeto. Segundo Pahl et al. (2005), a principal vantagem dessa técnica é a visão geral que se tem das possíveis combinações de soluções (Figura 2.8). A tomada de decisão sobre qual solução adotar deve levar em conta vários fatores, como: fatores econômicos, técnicos, ambientais, entre outros. No entanto, existem ferramentas que auxiliam essa tomada de decisão, como o funil de decisões;
- Analogias e metáforas é a técnica que correlaciona produtos diferentes, mas com algumas características similares;
- Clichês e provérbios é uma técnica que usa ditos populares como orientadores na formação de soluções.

Baxter (1998) finaliza seus estudos de ferramentas úteis no desenvolvimento de um projeto com a FISP (Fases Integradas da Solução de Problemas), que avalia a eficiência das técnicas aplicadas anteriormente.

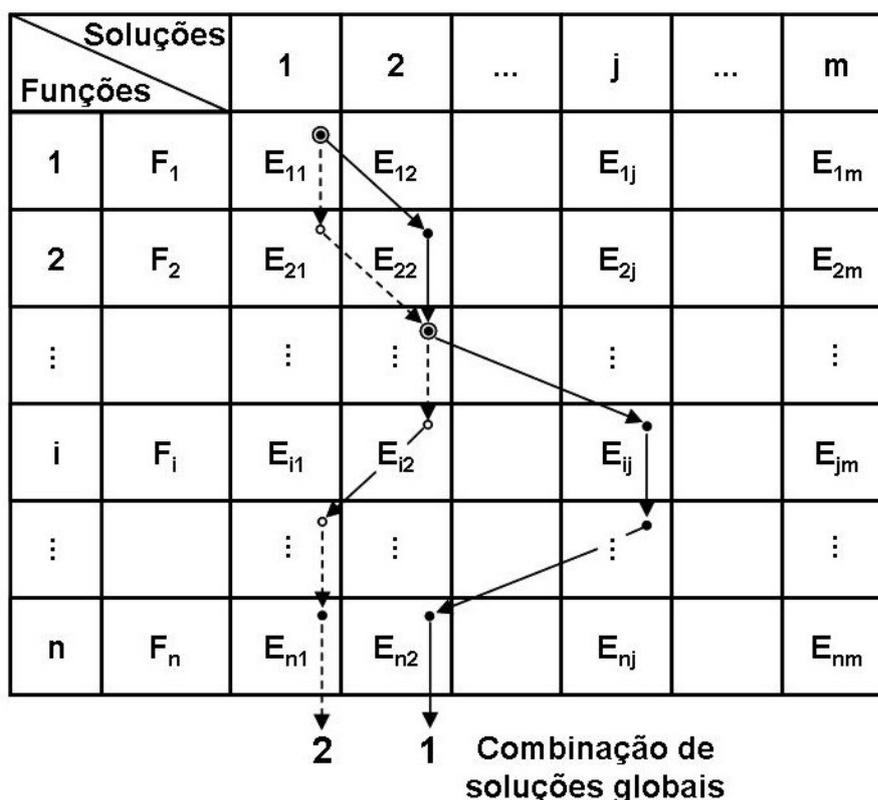


Figura 2.8 – Quadro morfológico (PAHL et al., 2005).

De uma forma geral, a metodologia de projeto pode ser entendida como uma sistematização de procedimentos durante o desenvolvimento de um projeto. A sistematização tem um caráter benéfico, ela não reprime a intuição e/ou criatividade. Organiza grupos de atividades, mas dentro de cada grupo não existem fronteiras de desenvolvimento. Os procedimentos podem ser entendidos como ferramentas de tomada de decisão, solução de problemas, documentação, monitoramento, outros. (PAHL et al., 2005).

O gerenciamento de projetos oferece uma visão integrada de todos os fatores envolvidos em um projeto para que sejam atingidos os objetivos assumidos. Ele oferece uma grande variedade de ferramentas e técnicas, necessárias para se atingir os objetivos propostos e planejados (ROZENFELD, 2008).

Dentre as ferramentas destaca-se a rede de precedência, devido à sua grande aplicação. Nesta ferramenta, as atividades de projeto são organizadas cronologicamente de modo racional e eficiente, para o controle de suas atividades no ciclo de vida. Destacam-se técnicas como PERT, CPM, Gráfico de Gantt, Corrente Crítica, entre outras.

2.2 Máquinas de usinagem de corte

Schellekens et al. (1998), nos anos 90, já explicava que existia uma tendência do projeto de precisão torna-se cada vez mais importante devido à grande demanda por máquinas, instrumentos e produtos de alta acurácia. Essa tendência já havia sido citada anteriormente por Taniguchi (1983), em seu gráfico de tendências de máquinas de precisão (Figura 2.9).

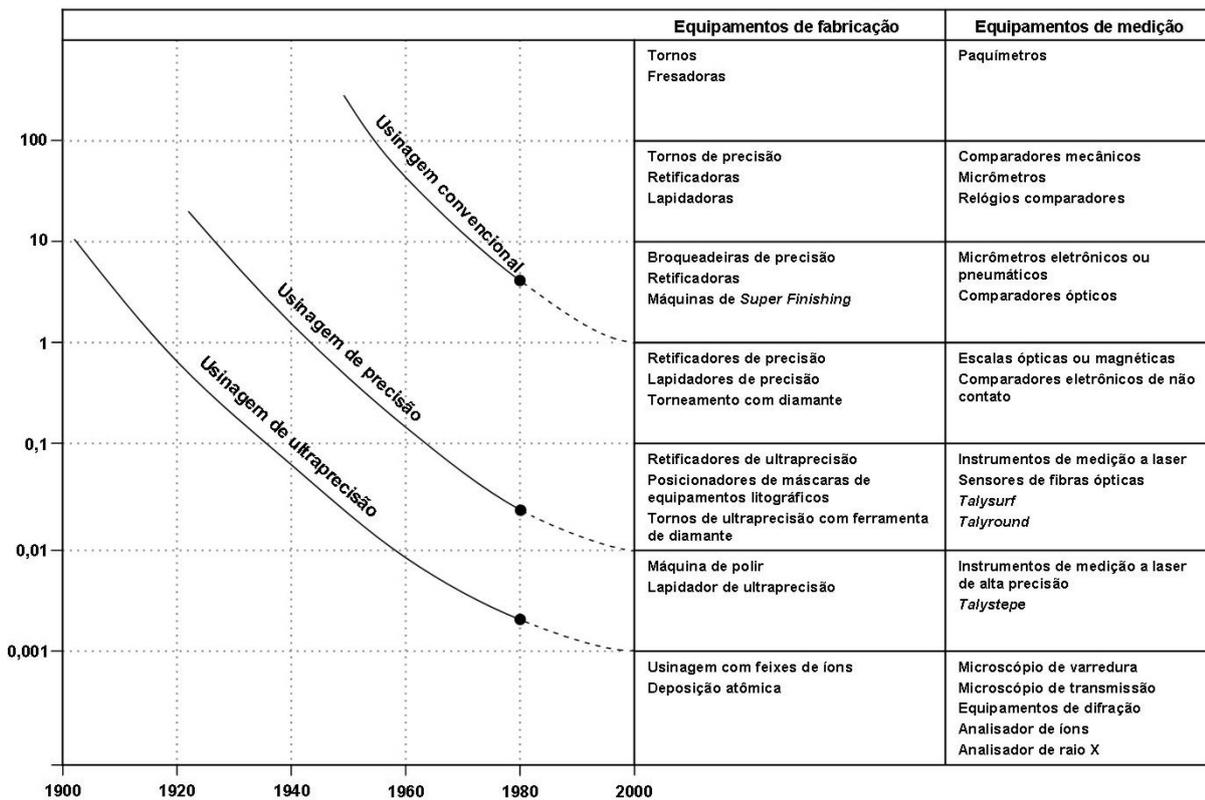


Figura 2.9 – Tendências das máquinas de precisão (TANIGUCHI (1983) apud PORTO et al., 2004, p.1).

Segundo Duduch (2006) os termos: precisão e ultraprecisão, não têm definições fixas. A evolução de diferentes tecnologias viabilizou a construção de máquinas cada vez mais precisas, possibilitando a diminuição das dimensões e faixas de tolerância dos produtos usinados. McKeown (1987 apud PORTO et al., 2004, p. 2) sugere uma classificação dos processos de usinagem segundo sua tolerância e produtos (Figura 2.10).

	<i>Faixa de tolerância</i>	<i>Mecânico</i>	<i>Eletrônico</i>	<i>Óptico</i>
Usinagem convencional	200µm	Elementos gerais para aplicações domésticas, autopeças em geral, etc.	Elem. elétricos gerais, motores e conectores.	Corpos de câmeras, telescópios e binóculos.
	50µm	Elementos gerais para motores.	Transistores, diodos e cabeçotes magnéticos para gravadores.	Diafragma da câmeras, portallentes para câmeras e telescópios.
Usinagem de precisão	5µm	Partes mecânicas para relógios, mancais para máquinas ferramenta e engrenagens.	Relés elétricos, resistores, condensadores e <i>wafers</i> de silício.	Lentes, prismas, fibras ópticas e conectores (múltiplo modo).
	0,5µm	Mancais de esfera e rolo, válvulas servo-hidráulicas, mancais aerostáticos, bicos injetores para impressoras, etc.	Escalas magnéticas, osciladores de quartzo para câmeras CCD, memórias magnéticas (<i>bubbles</i>), transdutores de pressão finos, cabeçotes de impressão térmicos e cabeçotes de videocassete.	Lentes de precisão, escalas ópticas, espelhos poligonais para laser, espelhos de deflexão, conectores e fibra óptica (modo único).
Usinagem de ultraprecisão	0,05µm	Blocos-padrão, pontas de endentadores de diamante, mesas X-Y de ultra precisão.	Memórias de circuito integrado, videodisco eletrônicos e <i>Large Scale Integrated</i> - LSI.	Espelhos planos, lentes de Fresnel, redes de difração, cabeçote de leitura de DVD, videodisco óptico.
	0,005µm		<i>Very Large Scale Integrated</i> – VLSI.	Redes de difração de ultra precisão.

Figura 2.10 – Classificação de processos de usinagem segundo tolerância e produtos (MCKEOWN (1987) apud PORTO et al., 2004, p.2).

Assim como outras máquinas de usinagem, por exemplo: tornos ou retíficas, as máquinas de corte de materiais frágeis podem ser classificadas como sendo de precisão ou ultraprecisão, de acordo com o **produto** a ser trabalhado e a **construção** do equipamento (KIM, et al., 2007; NIX et al., 2005).

Patentes norte-americanas relacionadas aos processos de fabricação de alguns componentes citados na Figura 2.10, como: semicondutores (US 6576531 B2, 2003), transdutores (US 5329496, 1994), circuitos integrados (US 5516728, 1996) e outros, mencionam o processo de corte como etapa de fabricação, porém, não citam faixas de tolerância. Por outro lado, Bishop et al. (2001), define uma tolerância quando descreve, especificamente, técnicas de corte de supercondutores com tolerância de $\pm 2,5 \mu\text{m}$. Segundo ele, trata-se de um processo de **precisão**. Kim et al. (2007), também classifica o processo de corte, quando explica sobre as características do corte de silício, definindo-o como de **ultraprecisão**.

Aris Bernallis (2007), vendedor técnico da DISCO HI-TECH AMERICA, escritório técnico/comercial da empresa japonesa DISCO CORPORATION., um dos

maiores fabricantes de máquinas de corte para materiais frágeis, diz que, diferente dos *cut-offs*, as *dicing machines* são máquinas de corte mais precisas e sofisticadas com relação ao alinhamento do corte na peça, repetibilidade, automação e desempenho. Expressões como: *dicing machine* ou *precision dicing machine* ou ainda, *ultra precision dicing machine*, são nomes populares e comerciais de serras de precisão / ultraprecisão, empregadas no processo de corte de filmes finos e frágeis. No entanto, esse termo é muito genérico, pois não especifica a ferramenta de corte (informação verbal)¹.

O termo *dicing machine* é citado em inúmeros artigos e patentes de diferentes produtos e processos de corte, da forma mais ampla possível. Masayuki Azuma, da Tokyo Seimitsu Co. Ltd., fabricante japonesa de máquinas de corte de materiais frágeis, registrou uma patente nos Estados Unidos da América, em 1998, descrevendo uma *Dicing Machine*, como sendo uma máquina usada para o corte de materiais finos e frágeis, equipada com dois mancais de giro, nos quais são montados discos abrasivos para o corte.

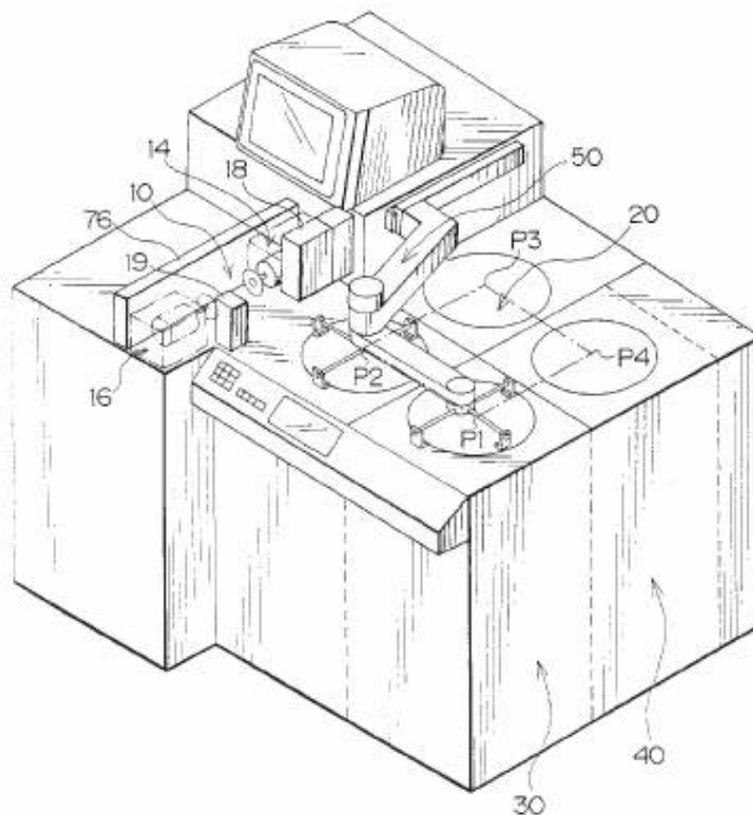


Figura 2.11 – Dicing Machine (UNITED STATE PATENT 5842461, 1998).

¹ Informação fornecida pelo Sr. Aris Bernallis, Disco HI-TEC AMERICA, em San Jose, California, EUA, abril de 2007.

Por outro lado, Takatoshi Ono, da DISCO Abrasive Systems, Ltd., fabricante de máquinas de corte de materiais frágeis e discos abrasivos de corte, registrou a patente de uma máquina de corte, nos Estados Unidos da América, em 1987, como sendo uma *Semiconductor Wafer Dicing Machine* (Figura 2.12). As diferenças entre as máquinas residem na disposição dos mancais de corte e alguns acessórios. As similaridades são: o elemento cortante do processo (discos abrasivos de pequena espessura) e o nome do equipamento (*Dicing Machine*).

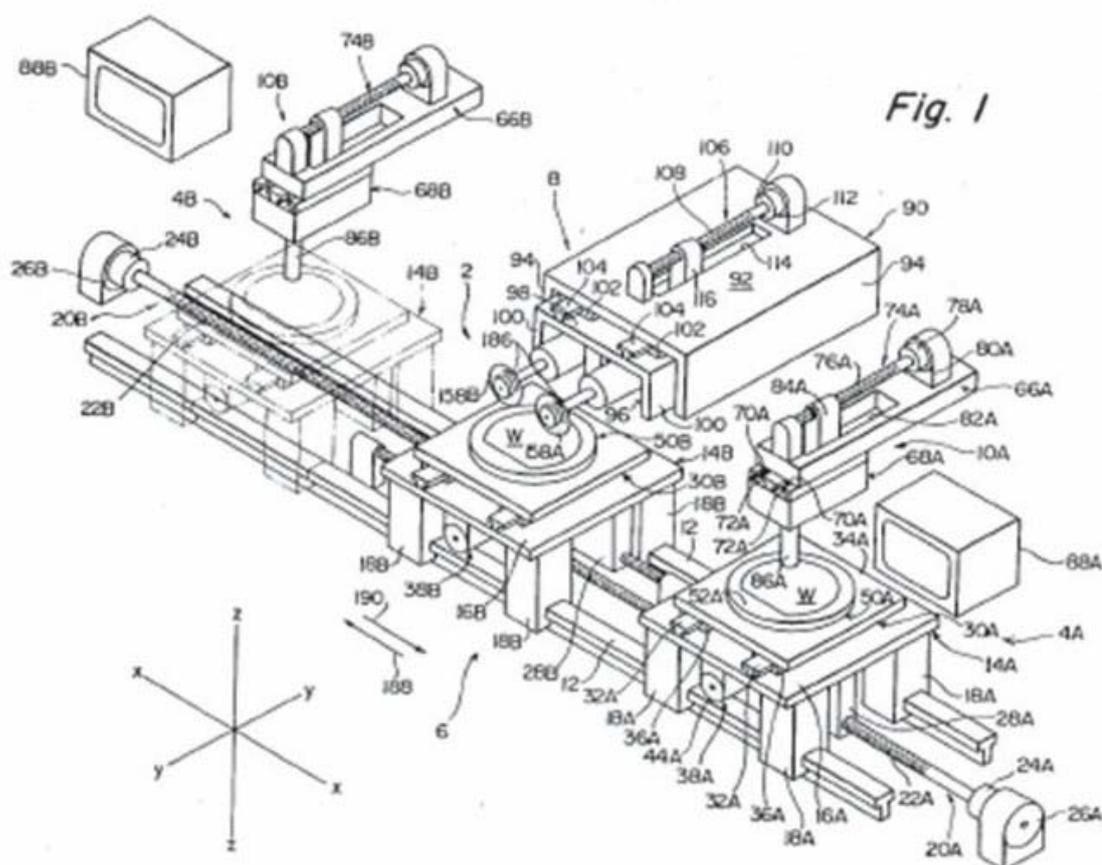


Figura 2.12 – Semiconductor Wafer Dicing Machine (UNITED STATE PATENT 4688540, 1987).

Avançando ainda mais no estudo do termo *dicing machine*, a *United State Patent* tem em seus registros, a patente US 3112850 de Domenick J. Garibotti, de 31 de outubro de 1962, que descreve uma *dicing machine* de semicondutores usando a técnica de feixe de elétrons. Portanto, o termo não especifica a ferramenta de corte (laser, disco abrasivo, outros). Ele apenas define que o equipamento é uma máquina e é de corte.

Segundo Nix et al. (2005) e Perrotet; Durant e Richerzhagen (2006), as técnicas mais comuns para o corte de materiais frágeis são: o corte laser, o corte por jato d'água abrasivo e o mais usado, corte com discos abrasivos.

2.2.1 Laser saw

Corey (2007) fala da crescente tendência nos últimos anos, do uso de *laser saws* no corte de materiais finos e frágeis. As grandes vantagens desse equipamento são:

- Versatilidade de trajetórias de corte;
- Processo seco, pois trabalha sem refrigeração no corte;
- Largura do corte (*kerf*) menor que 15 μm .

Por outro lado, esse processo tem pontos negativos, como:

- Alto custo do equipamento;
- Alto consumo de energia;
- Baixa velocidade de corte;
- Recomendado para corte de pequenas espessuras;
- Não se aplica a qualquer tipo de material;
- Em alguns casos, gera calor, o que pode modificar a estrutura cristalina do material.

O corte laser pode ser resumido como um processo térmico, no qual uma fonte de luz pulsante de alta potência muda o estado do material de sólido para líquido/gasoso, em um curto intervalo de tempo. O comprimento de onda da luz tem grande importância com relação ao tipo de material. Os lasers mais comuns são listados na Figura 2.13, com comprimento de onda (*wavelength*) e os materiais e mercados onde são usados.

Laser	Comprimento de onda	Mercado / Materiais
DPSS Nd: YAG	1064 nm / 532 nm	Híbrido / Ceramicas
DPSS Nd: YAG	355 nm / 266 nm	Semicondutores / <i>Wafers</i>
CO2	9,4 nm / 10,6 nm	Lentes e telas / Vidro
CO2	9,4 nm / 10,6 nm	Flexíveis / Poliamida, FR4

Figura 2.13 – Tipos de laser (LIZOTTE, 2003).

Lizotte (2003) explica que a tecnologia óptica tem grande importância na construção de *laser saws*. Lentes são usadas na convergência do laser em um ou mais feixes concêntricos.

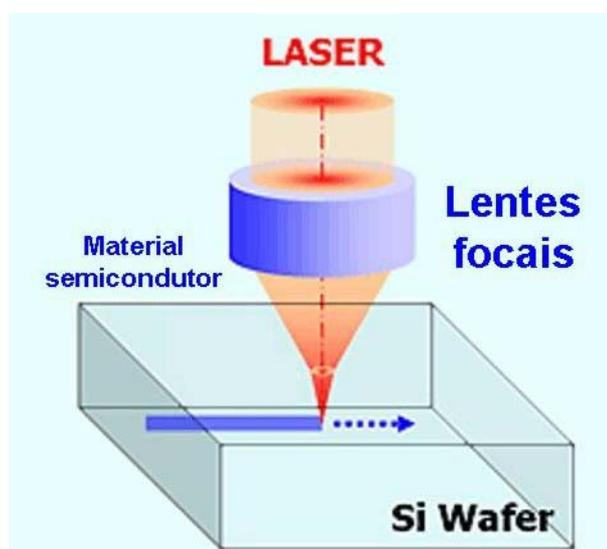


Figura 2.14 – Lentes para concentração do laser (HAMAMATSU PHOTONICS K.K. Disponível em: <http://jp.hamamatsu.com/products/semicon-fpd/pd393/L9570-01/index_en.html>.

Acessado em: 20 de abril de 2009).

Perrottet, Durant, Richerzhagen (2006) explicam que, na tentativa de eliminar problemas referentes ao calor gerado pelo processo de corte laser, foi criado um novo conceito de máquina de corte: a *Water-jet-guided laser saw*, que consiste em conduzir o laser por um fluxo d'água (Figura 2.15).

O processo de geração do elemento cortante tem algumas similaridades com o processo laser. O laser passa por uma lente focal (*focusing lens*) formando um feixe. Na etapa seguinte, este é conduzido até uma câmara com água (*water*

chamber). Desta câmara, sai um jato d'água pressurizado carregando junto feixes de laser. Estes se mantêm dentro fluxo por reflexão (detalhe da Figura 2.15, *laser guided by total internal reflection*).

As principais vantagens desse equipamento são: dispensa o uso de dispositivos para foco do laser, redução significativa do calor gerado pelo laser, remoção eficiente do cavaco pelo fluxo de água e a geração de cortes sem grandes danos à geometria e às propriedades do material cortado. Apesar de ser uma máquina mais veloz do que a *laser saw*, ainda tem baixa produtividade quando comparado as *dicing saw*.

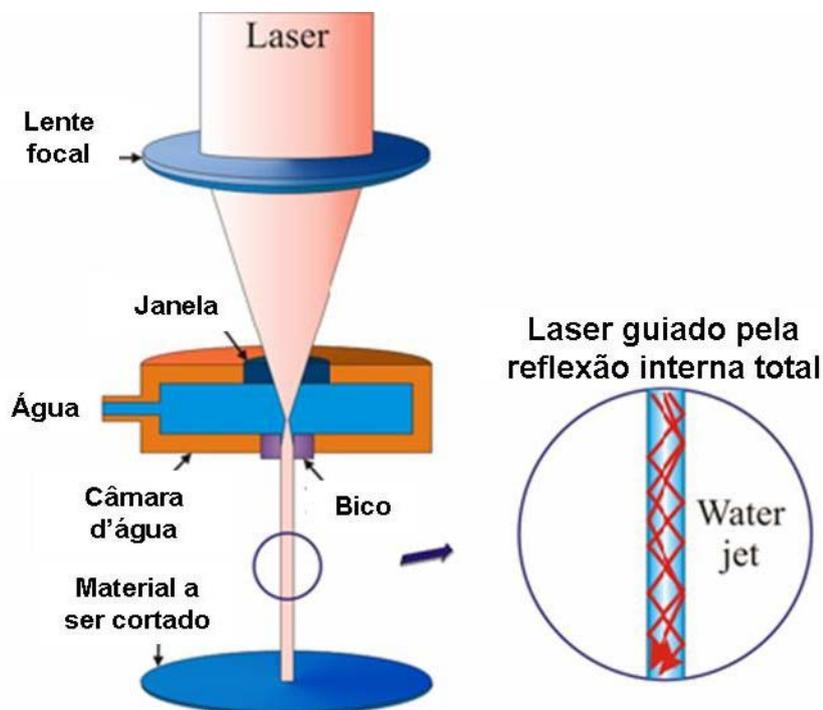


Figura 2.15 – Laser saw guiada por Waterjet saw (PERROTTET, DURANT, RICHERZHAGEN, 2006).

2.2.2 Waterjet Saw

Kovacevic et al. (1997) explica que a *Water Saw* ou *Waterjet Saw* ou ainda *Abrasive Waterjet Saw*, é uma máquina de corte que usa um jato d'água à alta pressão e grãos abrasivos dispersos pelo fluido. O mecanismo de corte funciona pela remoção de partículas do material a ser cortado, quando em contato (colisão e atrito) com os grãos abrasivos conduzidos pelo fluido em alta pressão. Sua

aplicação inicial foi no corte de madeira e plástico no início de 1970. A evolução tecnológica fez com essa técnica também pudesse ser usada no corte de vidro, aço, ferro, titânico, concreto, cerâmicas e outros. O esquema de funcionamento de uma *waterjet saw* modelo DAD 4110, fabricado pela empresa japonesa DISCO CORPORATION, é apresentado na Figura 2.16. Água limpa é bombeada por uma linha de alta pressão. Esta passa por um vaso misturador (vaso), onde há a combinação com um abrasivo. A mistura é encaminhada até um bico injetor (bico), que só permitirá a passagem da mistura em alta pressão no momento em que a peça a ser trabalhada estiver na posição adequada. O material a ser cortado é fixado em um suporte que permite a passagem do jato pressurizado. Nesse modelo consta um sistema de recirculação do abrasivo.

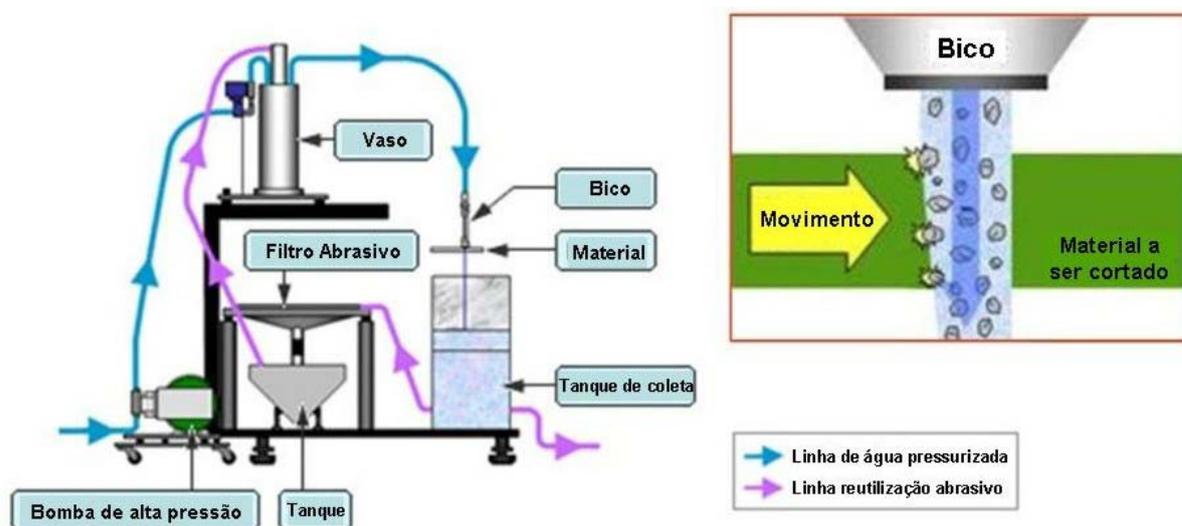


Figura 2.16 – Funcionamento *Waterjet Saws* DAD 4110 (DISCO CORPORATION. Disponível em: <<http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/water.html>>. Acessado em: 06 de outubro de 2007).

Hashish (2006) complementa, observando que, nesse processo as velocidades de corte podem chegar até 60mm/s e acurácia de aproximadamente 0,1mm. Há grande flexibilidade de trajetórias, baixo ruído e pequena geração de calor, estendendo seu campo de aplicação até mesmo no corte de alguns componentes eletrônicos de maior tolerância (Figura 2.17).

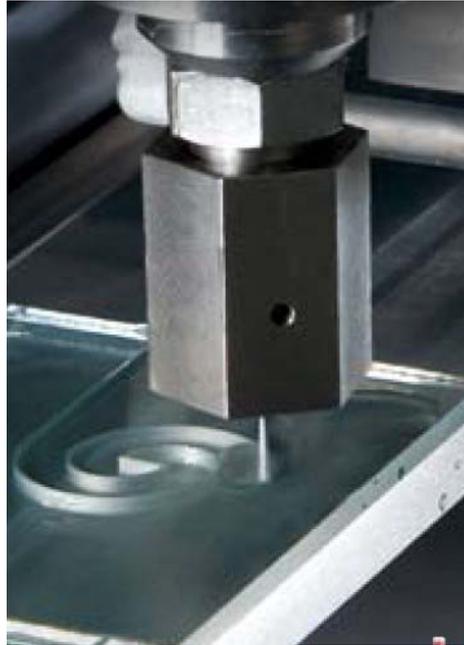


Figura 2.17 – Flexibilidade de trajetórias *Dicing Waterjet Saws* DAD 4110 (DISCO CORPORATION. Disponível em:<<http://www.disco.co.jp/eg/products/catalog/pdf/daw4110.pdf>>. Acessado em: 06 de outubro de 2007).

2.2.3 *Dicing Saw*

A *dicing saw* é a máquina mais usada no processo de corte de materiais frágeis, tais como o silício, a alumina, vidros cerâmicos e outros. A empresa japonesa DISCO CORPORATION, detentora da patente norte-americana sobre o processo de manufatura de *chips* em material semicondutor para a indústria eletrônica (US 6939785 B2, 2005), explica que uma das etapas do processo de fabricação desses componentes eletrônicos é o corte do material semicondutor, usando para essa segmentação, uma *dicing saw*, com disco abrasivo de espessura em torno de 20 μm , girando em alta rotação (Figura 2.18).

Comercialmente, existem várias opções de fabricantes, destacando-se a japonesa DISCO CORPORATION, como a maior empresa fabricante de *dicing machines*, seguida por uma série de outras empresas, como: a britânica LOADPOINT LTD., a norte americana, Thermocarbon Inc., a israelense Advanced Dicing Technologies Ltd. (ADT), a japonesa Tokyo Seimitsu Co. Ltd da Accretech Group, a suíça Synova S.A., outros.

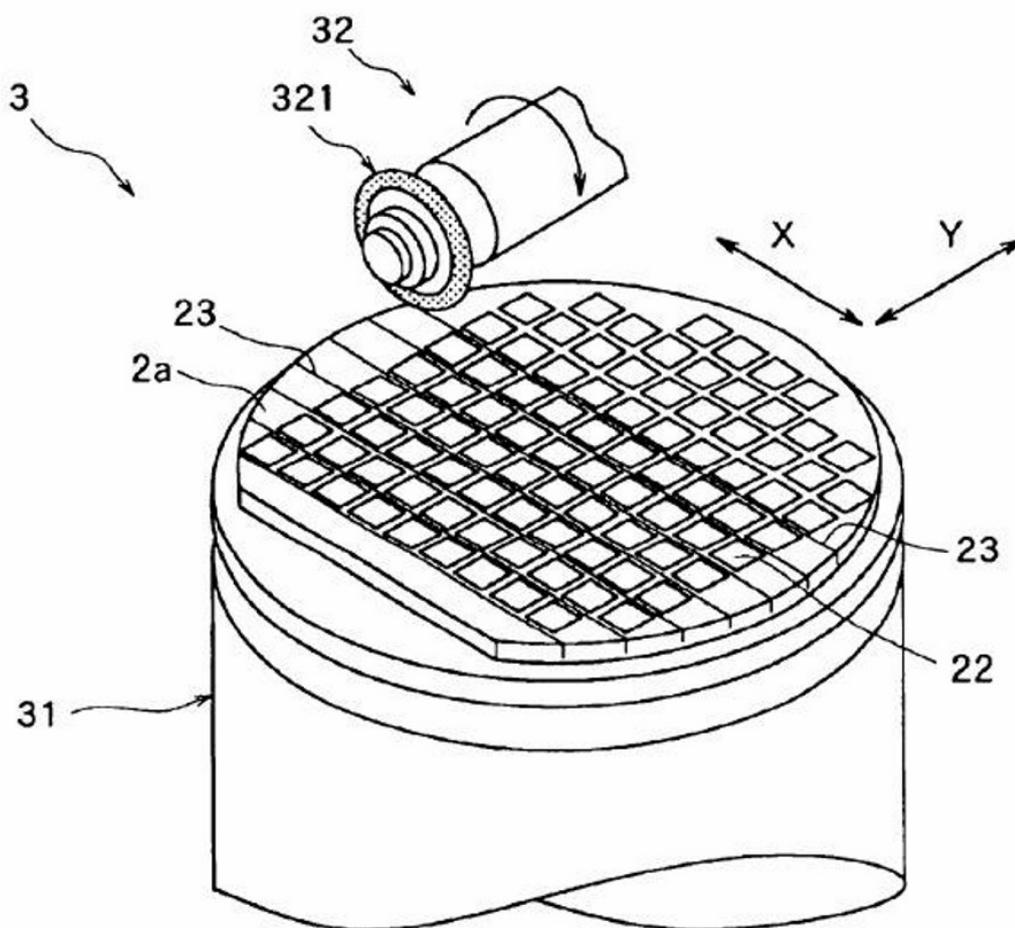
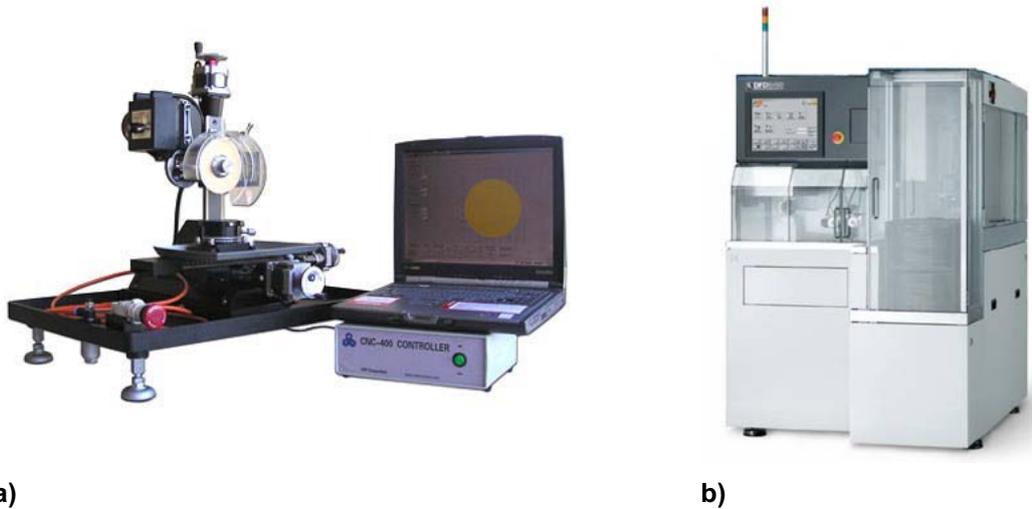


Figura 2.18 – Corte de material semicondutor, (UNITED STATE PATENT 693.9785 B2, 2005).

A variedade de fabricantes conduz a uma variedade construtiva do equipamento, sendo possível encontrar desde opções simples e semi-automáticas (Figura 2.19 A), como a EC400 da MTI CORPORATION, até alternativas mais sofisticadas e totalmente automáticas (Figura 2.19 B), como a DFD6450 da DISCO CORPORATION.

Basicamente uma *dicing saw* consiste em uma máquina equipada com sistema de movimentação linear nas coordenadas XYZ e uma ferramenta de corte abrasivo (*cabeçote* ou *spindle*). Uma mesa XY permite a movimentação controlada nas coordenadas X e Y. Nessa configuração, o material a ser cortado fica no plano de trabalho XY. Na coordenada Z, fica o cabeçote equipado com disco abrasivo (Figura 2.20).



a)

b)

Figura 2.19 – Opções de *dicing saws*. Desde modelos mais simples com a a) *EC400 Precision CNC Dicing / Cutting saw with Accessories & Software*, MTI Corporation. Disponível em: <<http://www.mtixtl.com/index.asp?PageAction=VIEWPROD&ProdID=295>>. Acessado em: 23/08/2007. Até modelos mais sofisticados com dois *spindles* como a b) *DFD6450 Fully Automatic Dicing Saw*. DISCO CORPORATION. Disponível em: <<http://www.disco.co.jp/eg/products/catalog/pdf/dfd6450.pdf>>. Acessado em: 15/03/2008.

O eixo X, responsável pela translação da mesa de corte (velocidade de corte ou avanço), deve possuir uma larga faixa de ajuste velocidade. Os eixos Y e Z são responsáveis pela dimensão da fatia e penetração do disco de corte no material, respectivamente. Portanto, devem possuir boa resolução, alta acurácia e precisão.

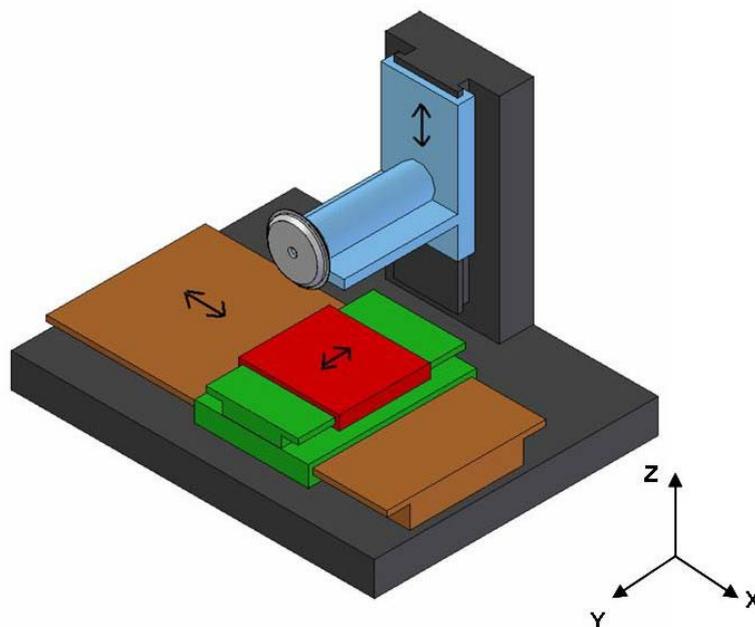
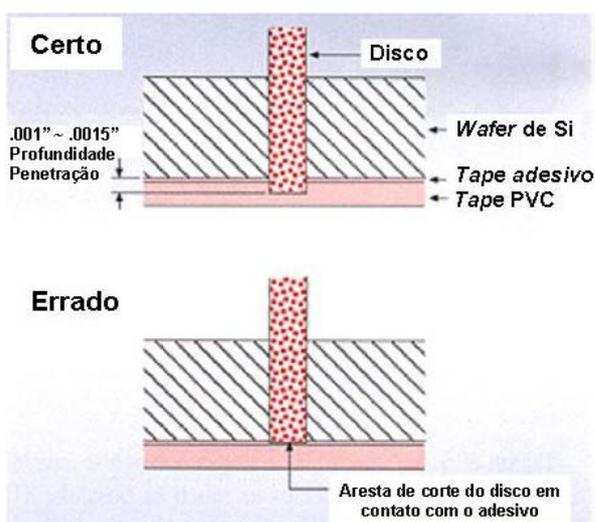


Figura 2.20 – Conceito básico de uma *Dicing Machine* (BORGES, 2004).

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.

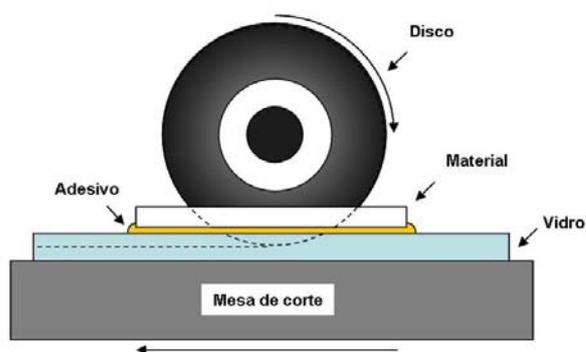
Normalmente, o material é montado sobre um quadro (*carrier*), formado por um filme adesivo (*adhesive layer* ou *tape*) e uma moldura (*frame*). De acordo com André Kikland, gerente de vendas da LINTEC AMERICA, INC., o *tape*, em geral, é de pequena espessura e também serve como superfície de sacrifício, pois o disco de corte, quando trabalhando, precisa transpassar totalmente o material (Figura 2.21 a e b).



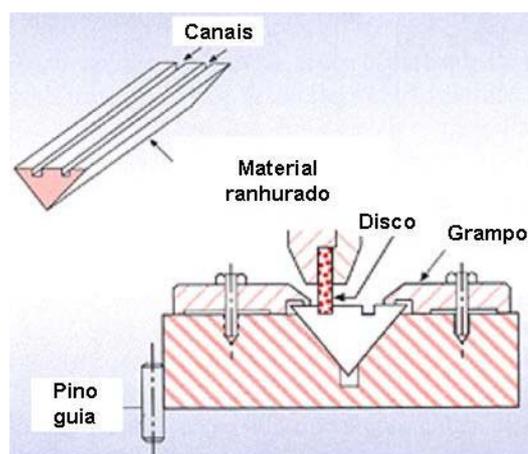
a)



b)



c)



d)

Figura 2.21 – Formas de fixação do material junto à mesa de corte. Em a) verificamos o uso de tape adesivo sobre um tape de PVC, ambos para sacrifício (GIDEON, 2008). Em b) ilustra os formatos dos tapes adesivos e frame (Disponível em: <http://www.lintec.co.jp/e-dept/english/adwill/products/di_t.html>. Acessado em: 21/03/2008). Na Figura c) uma montagem com vidro e adesivo e, por fim, em d) uma montagem mecânica (GIDEON, 2008).

Em alguns casos, a profundidade de corte é grande, demandando o uso de uma superfície de sacrifício espessa como o vidro. Em outros casos, o material não adere bem ao filme adesivo, sendo necessário o uso de cola ou cera (Figura 2.21 c). Fixações mecânicas e envasamentos são cada vez menos usados (Figura 2.21 d). O *carrier* é fixado mecanicamente na *chuck table*, por meio de vácuo ou presilhas (informação verbal)².

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 (Figura 2.22).

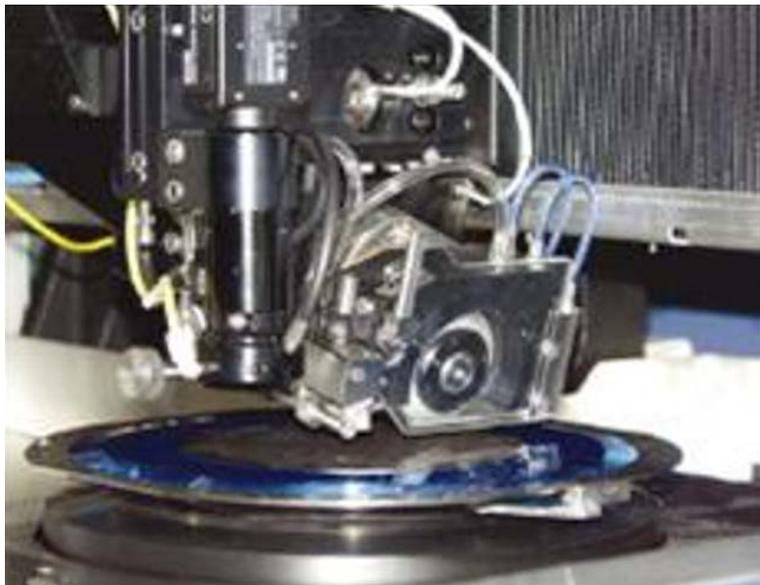
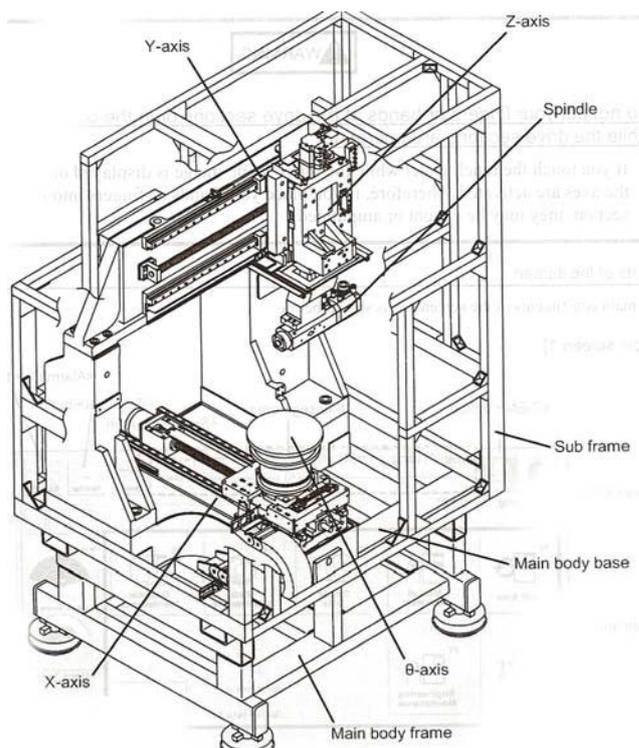


Figura 2.22 – Ferramenta de corte inclinada – Série 7100 da Advanced Dicing Technology (ADT) (Disponível em: <<http://www.bitase1/datasheets/ADT-7100-Brochure-SE.pdf>>. Acessado em: 21/03/2008).

Existem também diferentes configurações de planos de trabalho, como por exemplo, a DAD3350 da DISCO CORPORATION, que trabalha com o material a ser cortado na coordenada X e ferramenta de corte no plano YZ (Figura 2.23 a). No caso da Nano Ace, da LOADPOINT LTD., o material a ser cortado fica no plano XY enquanto a ferramenta de corte trabalha na direção Z (Figura 2. 23 b).

² Informação fornecida pelo Sr. André Kikland, gerente de vendas da LINTEC AMERICA INC., Janeiro de 2009.



a)

b)

Figura 2.23 – Em a), planos de corte da DAD 3350 da DISCO CORPORATION (OPERATION MANUAL, 2007). Em b) planos de movimentação Nano Ace da LOADPOINT LTD (Disponível em:<http://www.micrope.com/Files/Nanoace_Brochure.pdf>. Acessado em:13/03/2008).

Normalmente, o material a ser cortado se encontra na forma de filme fino circular, quadrado ou retangular. O material pode ser composto de um único filme fino, nesse caso, recebe o nome de substrato ou pode ser composto de mais de uma camada, recebendo o nome de *wafers*. No caso de substratos/*wafers* circulares, o filme pode chegar até 12” de diâmetro. Peças quadradas normalmente atingem 300 x 300 mm. É possível encontrar casos especiais de dimensões maiores, porém, essas dimensões influem diretamente no tamanho dos eixos da *dicing*.

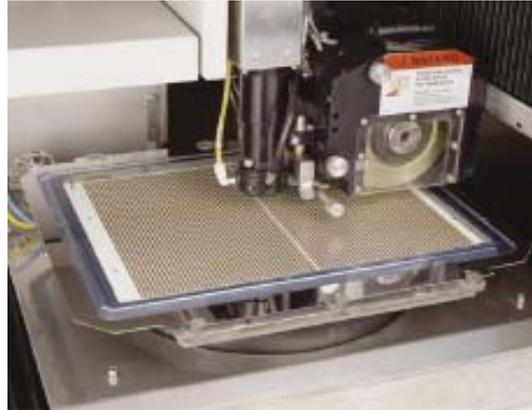


Figura 2.24 – Formatos admissíveis para corte em dicing machines inclinada – Série 7100 da Advanced Dicing Technology (ADT),(Disponível em:<<http://www.bitase1/bitase1/datasheets/ADT-7100-Brochure-SE.pdf>>. Acessado em: 21/03/2008).

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, LIGHT et al. 2002).

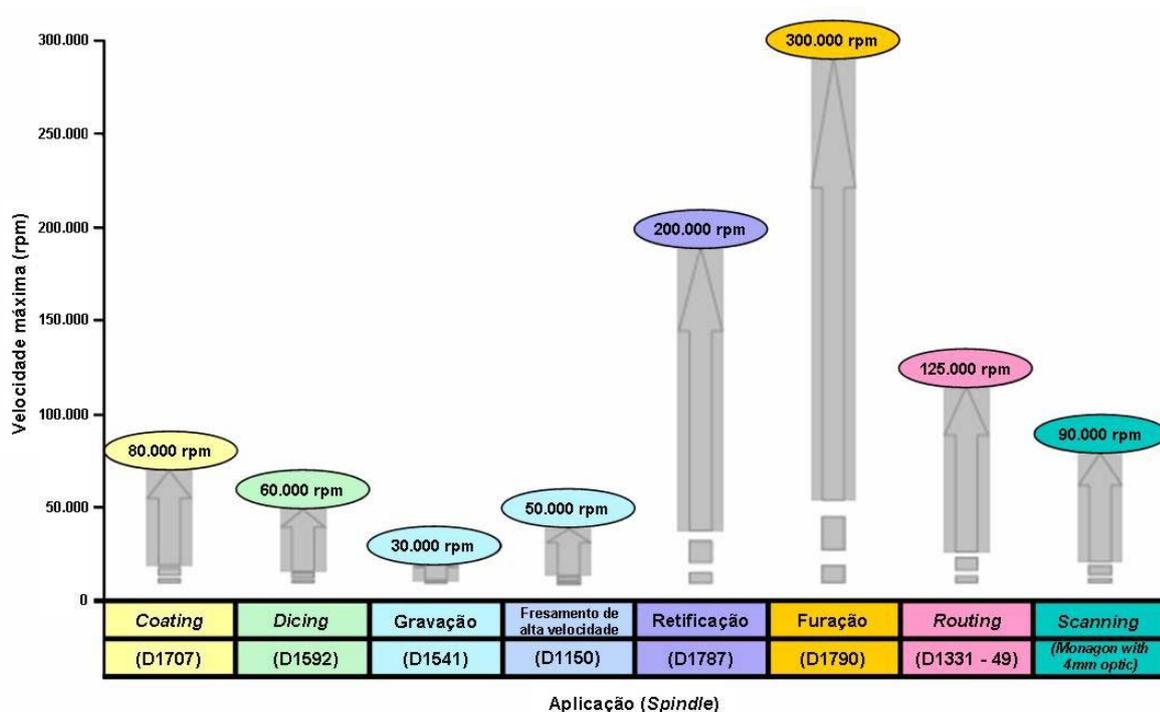


Figura 2.25 – Máximas velocidades dos mancais WESTWIND em diferentes processos de fabricação (Disponível em:<<http://www.westwind-airbearings.com/airBearing/highSpeed.html>>. Acessado em: 15/04/2008).

Em corte de substratos multicamadas, nos quais se desejam baixas forças de corte, são aplicadas rotações de 30.000 rpm a 60.000 rpm (LUO e WANG, 2008). São exigidos: baixa deflexão, torque e alta rotação para um bom desempenho do processo, assim, os 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). Existem cinco tipos:

- Contato simples (*single pad*) – Suporta cargas normais e desliza sob o plano;
- Contatos opostos (*opposed pads*) – Suportam cargas transversais e têm deslizamento axial;
- Radial (*Journal*) – Suporta cargas radiais e tem deslizamento angular;
- Rotacional (*rotary thrust*) – Suporta cargas axiais e tem deslizamento angular;
- Cônicos (*conical journal/thrust*) – Suportam cargas axiais e radiais. Têm deslizamento angular.

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, como pode ser visto na Figura 2.26.

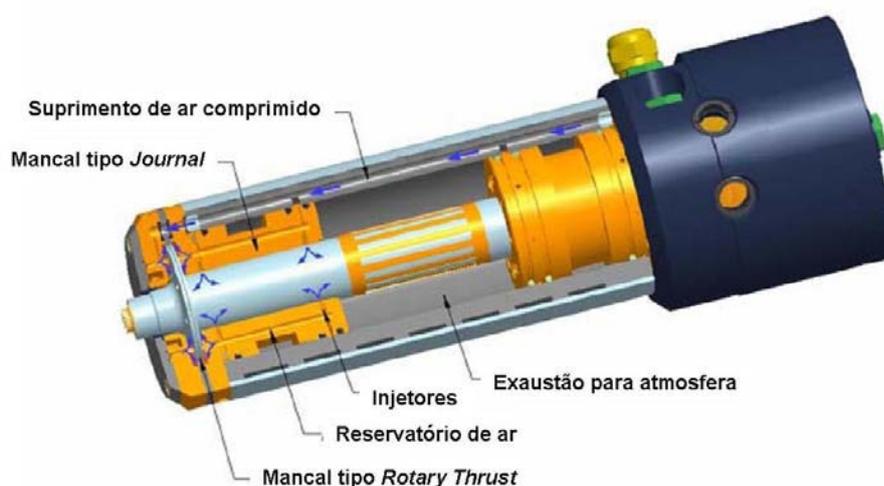


Figura 2.26 – Mancal aerostático (Disponível em: <<http://www.westwind-airbearings.com/airBearing/documents/AirBearingTechnologybriefv2.pdf>>. Acessado em: 18/04/2008).

Cabeçotes com mancais de rolamento podem ser empregados, porém apresentam alto ruído, aquecimento e baixa rigidez. Cabeçotes com mancais hidrodinâmicos também poderiam ser usados devido à sua alta rigidez, porém, estes trabalham em faixas de rotação menores que as necessárias para o corte. O acionamento poder ser obtido por ar (turbina) ou elétrico (com ou sem escova). (SLOCUM, 1992).



Figura 2.27 – Cabeçote com mancais aerostáticos WESTWIND modelo D1592 (Disponível em:<http://www.westwind-airbearings.com/specialist/documents/WaferDicing_000.pdf>. Acessado em: 18/04/2008).

Na extremidade do cabeçote, apoiado pelos mancais, existe uma ponta trabalhada no eixo para a montagem do conjunto flange e disco de corte (Figura 2.28).

Na seleção do melhor *spindle* de corte para determinado trabalho, a primeira informação que deve ser considerada é a dureza do material e o volume total de material que se deseja remover. Estes dois parâmetros determinarão a potência e o tamanho do *spindle*. Se o material é duro e a quantidade de material que deve ser removida é grande, o esforço será alto, logo, recomenda-se o uso de um cabeçote de alta potência. É importante verificar se o equipamento funciona em baixas rotações, pois a potência especificada geralmente é a máxima na máxima rotação. Outro fator importante na escolha deste dispositivo é a sua montagem. Cabeçotes com extensão da ponta do eixo, não tem boa aplicação para trabalhos que exijam precisão e baixa vibração.

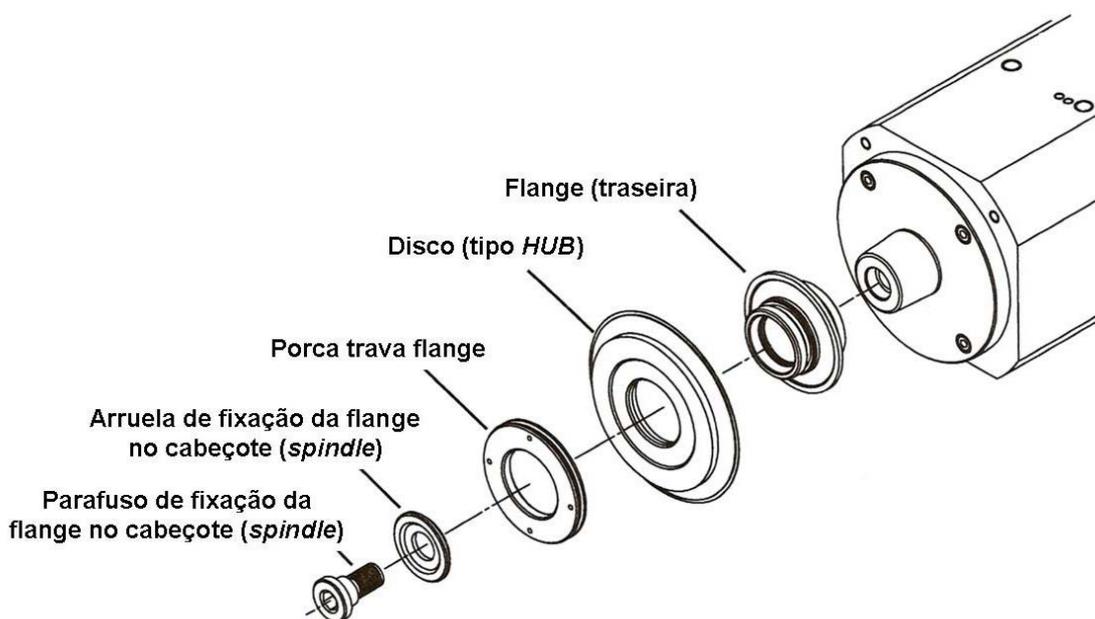


Figura 2.28 – Montagem disco de corte, flange e *spindle* (DISCO CORPORATION. OPERATION MANUAL, 2007).

Segundo o Eddie Jim (2007), DISCO HI-TECH AMERICA, *dicing saws* possuem dois sistemas de refrigeração: do cabeçote e do disco de corte. A refrigeração é essencial para o bom funcionamento do cabeçote, evitando dilatações e deformações. Normalmente o próprio fluido dinâmico do sistema (fluido que percorre os mancais aerostáticos ou hidrodinâmicos) é o elemento refrigerante. Algumas versões usam o nitrogênio como fluido dinâmico, devido ao grau de pureza (informação verbal)³.

A refrigeração do disco de corte deve ser feita de forma eficiente, pois normalmente, a usinagem de materiais frágeis gera grandes quantidades de calor, podendo gerar deformações e danos à ferramenta de corte e ao material (MIZUNO, IYAMA e ZHANG, 2008).

É importante observar que o sistema de refrigeração do disco também limpa a área de corte e o próprio disco abrasivo, além da remoção do material cortado. Na maioria dos casos, água destilada é usada, evitando a impregnação de minerais nas tubulações de refrigeração da máquina.

³ Informação fornecida pelo Sr. Eddie Jim, Disco HI-TEC AMERICA, em San Jose, California, EUA, abril de 2007.



Figura 2.29 – Discos de corte em funcionamento (Disponível em: <<http://www.disco.co.jp/eg/products/catalog/pdf/dad3220.pdf>>. Acessado em 07/03/2007).

Dicing saws, semi ou totalmente automáticas são máquinas sofisticadas com vários recursos como: sistemas de visão para alinhamento do corte e verificações quantitativas e qualitativas, dois mancais de corte, sistema automático de carga e descarga de material (versões automáticas), monitoramento de desgaste e quebra do disco abrasivo de corte, entre outros. Normalmente, os sistemas semi e totalmente automáticos utilizam um sistema de manipulação dos *carriers* (Figura 2.30).

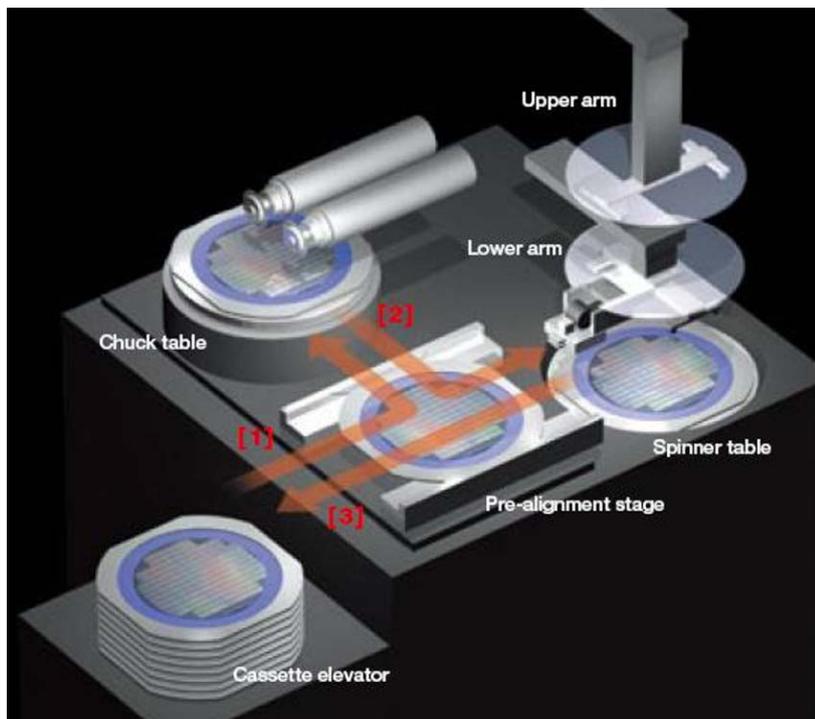


Figura 2.30 – *Dicing saw* automática DFD 6450 (dois spindles), (Disponível em: <<http://www.disco.co.jp/eg/products/catalog/pdf/dfd6450.pdf>>. Acessado em: 21/06/2008).

No caso da *dicing saw* automática DFD 6450 de dois *spindles*, um manipulador mecânico (*lower arm*) retira o material de um magazine e o encaminha para o pré-alinhamento e depois, para o corte na *chuck table* (1). Um outro manipulador (*upper arm*) encaminha o *carrier* para o mecanismo de lavagem e secagem (*spinner table*) (2) e, por fim, o *carrier* contendo material cortado e limpo retorna para o magazine (3).

Algumas publicações, como NIX (2005), preferem não citar a faixa de tolerância que uma máquina de corte trabalha, pois existe uma grande influência da ferramenta de corte e do material a ser trabalhado. Porém, em manuais e catálogos, como da *dicing saw* DAD3350, fabricada pela DISCO CORPORATION, é possível encontrar informações sobre resolução e acurácia dos eixos de movimentação (X, Y, Z, Θ , outros). No caso, este modelo possui 1,3 μm de alinhamento dos eixos de movimentação, resolução abaixo de 1 μm , velocidades de corte (avanço) de 0,1 até cerca de 600 mm/s dependendo da aplicação, disco abrasivo de 2" e rotação até 60.000 rpm.

2.3 O processo de corte abrasivo

Segundo Ishikawa e Kitahara (1997), o desenvolvimento tecnológico aponta para três direções principais: a miniaturização de componentes mecânicos e eletrônicos, autonomia e fusão de tecnologias de diferentes áreas. A evolução da tecnologia microeletrônica, principalmente, pelo uso de materiais como o silício, incentivou o desenvolvimento de tecnologias de produção de componentes cada vez menores (Figura 2.31).

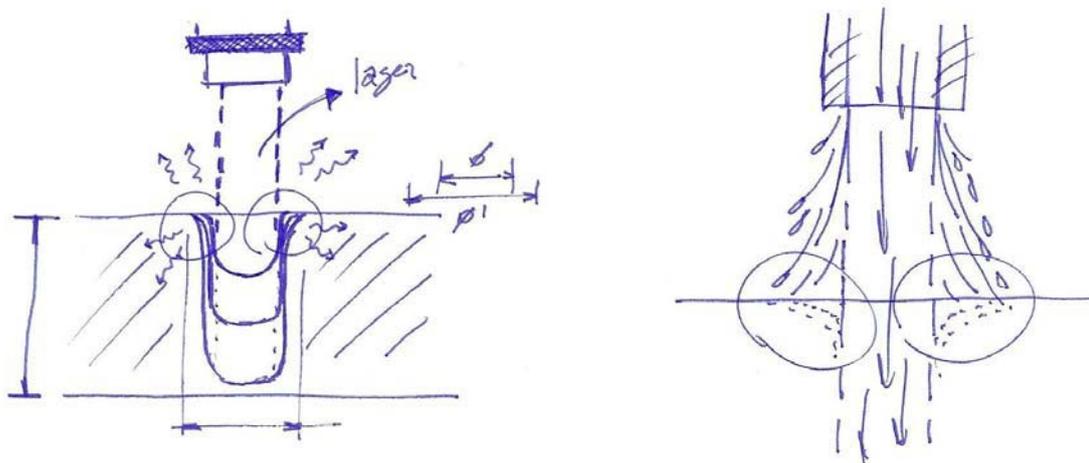
O processo de corte por meio de discos abrasivos é largamente usado pela indústria eletrônica nos processos de fabricação de ranhuras (*grooving*), fatiamento e corte de materiais frágeis e duros, como cerâmicas eletrônicas, vidros ópticos, vitros cerâmicos, ferrita monocristalina, silício, semicondutores em geral e 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 está fortemente ligado 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, YAMADA e ZHANG, 2008; CHEUNG, 2005).



Figura 2.31 – A evolução da microeletrônica. O volume que ocupa 150.000 transistores é comparado com um pequeno chip de silício que contém quase que o mesmo número de transistores (Fonte: Deutsches Museum, Munique, Alemanha, visita em 17/06/2008).

Segundo o Thomas Lieberenz (2008), gerente de vendas da DISCO HI-TEC EUROPE GmbH, escritório técnico/comercial da empresa japonesa DISCO CORPORATION., máquinas de corte laser apresentam boa qualidade de corte em pequenas profundidades, dependendo do material. Portanto, filmes de maior espessura precisam de mais de um corte, para o seccionamento definitivo (Figura 2.32 a). No caso de máquinas de corte a jato d'água, os resultados (qualidade do corte e produtividade) não são bons para materiais frágeis e finos como cerâmicas ou vidros (Figura 2.32 b). Focalizando a atenção sobre o processo de corte abrasivo, Thomas Lieberenz ainda destaca nesse processo os seguintes parâmetros: espessura do disco de corte, materiais empregados (resina diamantada, latão, outros), velocidade de rotação do disco, velocidade de avanço de corte, profundidade de corte, refrigeração do disco, remoção do cavaco e a estrutura da máquina. Todos são fatores a serem avaliados para que se alcance uma configuração ideal para determinado material / produto (informação verbal)⁴.



a) b)
Figura 2.32 – Esboço a) corte laser e b) corte jato d'água (Fonte: Anotações Thomaz Lieberenz, maio de 2008)

O processo de corte de materiais frágeis por meio de discos abrasivos teve grande avanço pela sua aplicação no corte do silício, matéria prima de grande aplicação em microeletrônica. Evidentemente, o corte abrasivo de outros tipos de materiais frágeis implica no uso de diferentes parâmetros de corte (BOUCHER et al. 2002, LIGHT et al. 2002). Pode-se dizer que, a evolução do processo de corte abrasivo de silício viabilizou melhorias e até mesmo o desenvolvimento de novos produtos e processos de fabricação.

⁴ Informação fornecida pelo Sr. Thomas Lieberenz, Disco HI-TEC EUROPE GMBH, em Munique, Alemanha, maio de 2008.

Segundo Germer, M. (2008), líder de processos da EPCOS - Munique/Alemanha, explica que o uso do corte abrasivo de precisão e de ultraprecisão viabilizou reduções de custo do processo de fabricação de termistores e sensores multicamadas, além da miniaturização destes componentes. (informação verbal)⁵.

Os subitens a seguir especificam as características do processo de usinagem de corte.

2.3.1 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 encontradas 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 a uma flange. Discos serrilhados são usados no caso de materiais com espessuras acima de 5mm.

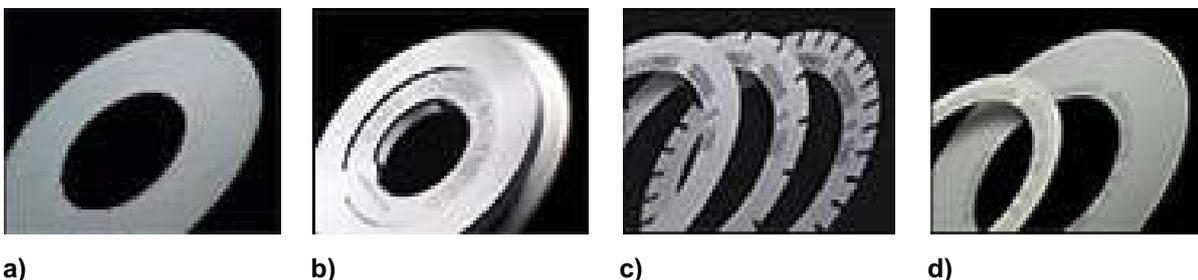


Figura 2.33 – Discos de corte: a) disco de diamante e resina, b) disco tipo *hub*, c) disco serrilhado de diamante e resita e d) disco de metal (Disponível em: <<http://www.disco.co.jp/eg/products/blade>>. Acessado em: 03/07/2007.

Espessura e diâmetro são características relevantes no processo de corte. Quanto maior o diâmetro do disco utilizado, maior deverá ser o torque

⁵Informação fornecida por Michael Germer, EPCOS, em Munique, Alemanha, maio de 2008.

disponibilizado pela máquina e melhor o sistema de refrigeração. Por outro lado, discos maiores viabilizam o aumento do avanço de corte e diminuição da 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. (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

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).

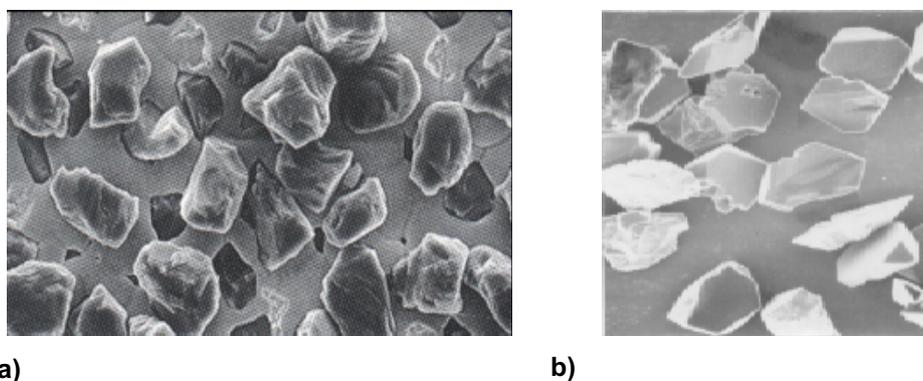


Figura 2.34 – Grãos abrasivos usados na fabricação de discos abrasivos de corte. Em a) grãos diamante e em b) grãos de CBN (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

O tamanho do grão é especificado pela escala Mesh, que define em uma área de uma polegada quadrada, a quantidade de grãos existentes. A Figura 2.35 a seguir correlaciona o tamanho de grão na escala mesh e milímetros.

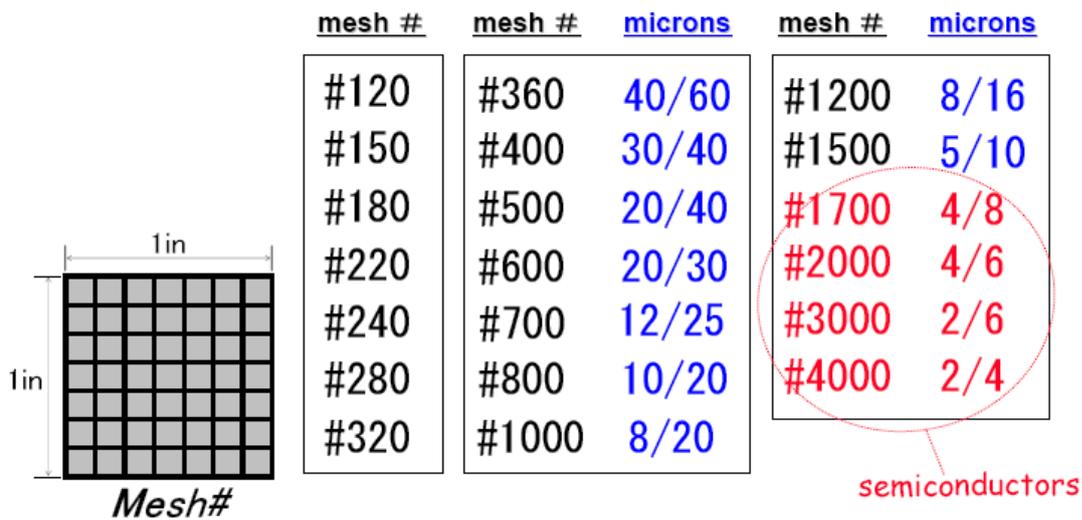


Figura 2.35 – Correlação escala mesh e milímetros (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

Grãos grandes removerão uma grande porção do material. Pequenos grãos removerão, proporcionalmente, menos. 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 (GIDEON, 2008).

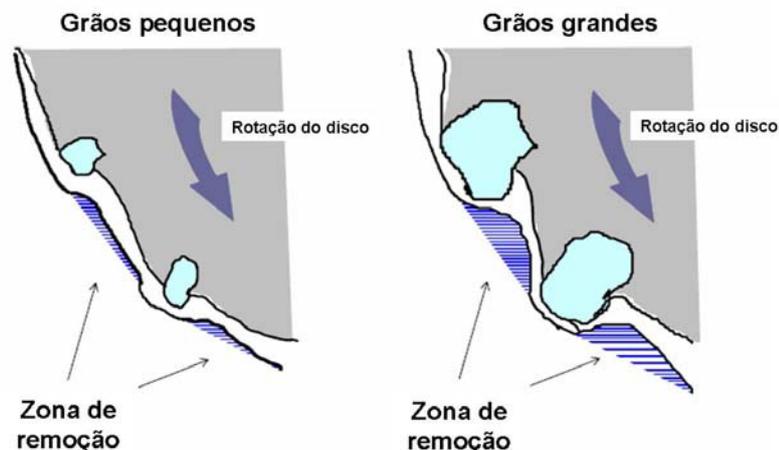


Figura 2.36 – Tamanho do grão em discos de corte abrasivo (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

A concentração indica o volume de grãos contido no volume do disco ou segundo alguns fabricantes, o volume de grãos em 1 cm³.

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. Porém, discos de baixa concentração são menos resistentes ao desgaste, desvantagem em alguns casos. A seleção da melhor concentração depende do material e da qualidade de corte desejada (GIDEON, 2008 e APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

O material ligante, em geral, são três e estão resumidos na tabela a seguir:

Material Ligante	Características	Aplicação
Níquel	<ul style="list-style-type: none"> • Processo de fabricação: eletrofusão; • O principal material ligante é o níquel (Ni); • Usado na fabricação de discos finos; • Alta acurácia; • Alta abrasividade. 	Silício; Outros.
Resina	<ul style="list-style-type: none"> • Processo de fabricação: polimerização; • O principal material ligante é a resina fenólica; • Discos de alta elasticidade; • São discos frágeis; • Alta qualidade de corte. 	Vidros Cristais
Metal	<ul style="list-style-type: none"> • Processo de fabricação: sinterização; • O principal material ligante é o cobre (Cu) e o estanho(Sn); • Alta abrasividade; • Alta poder de corte; • Baixa qualidade de corte. 	CSP; BGA; Materiais duros e frágeis.

Quadro 1 – Materiais ligantes mais comuns para discos de corte abrasivos (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

A abrasividade do disco de corte esta relacionada a diversos fatores. Os mais importantes são a concentração de grãos e o material ligante. A abrasividade também pode ser vista como o grau de exposição dos grãos.

No instante de contato entre grão e material, é preciso que haja espaço suficiente para o alojamento das partículas removidas instantaneamente (Figura 2.37).

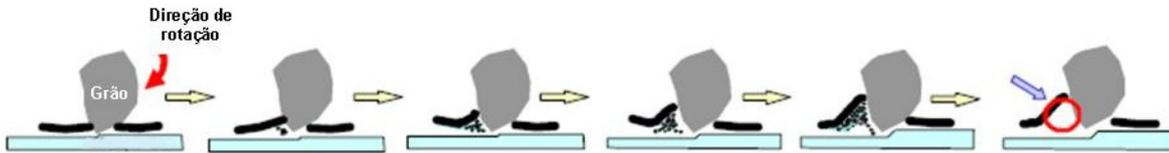
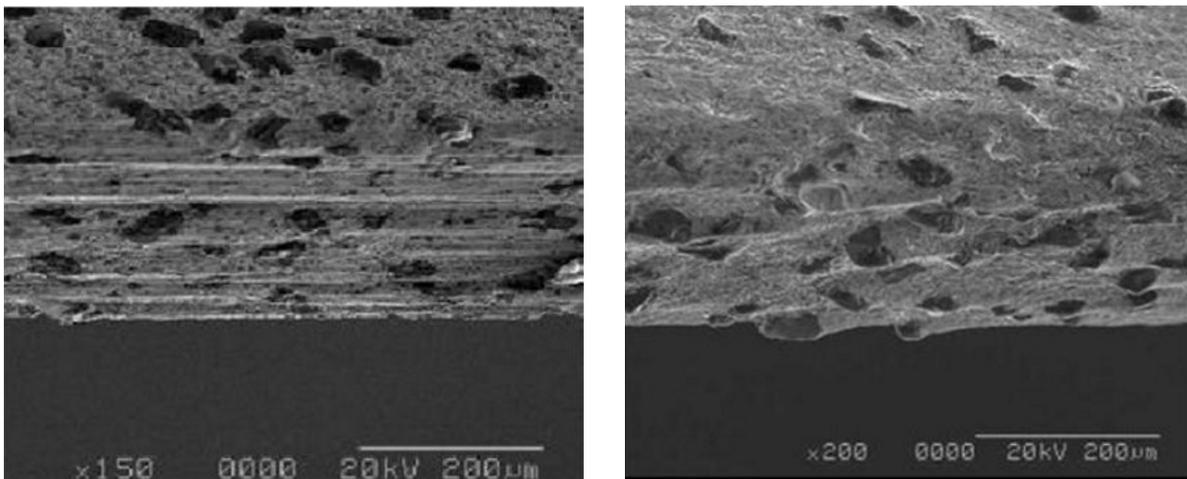


Figura 2.37 – Abrasividade (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

Normalmente, discos novos têm baixa abrasividade, ganhando parte dessa característica após uma dressagem ou um pré-corte (*precut*).

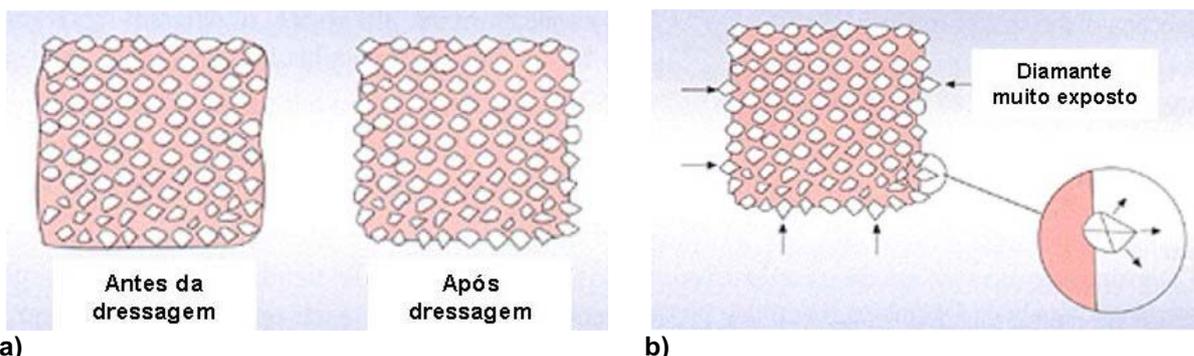


a)

b)

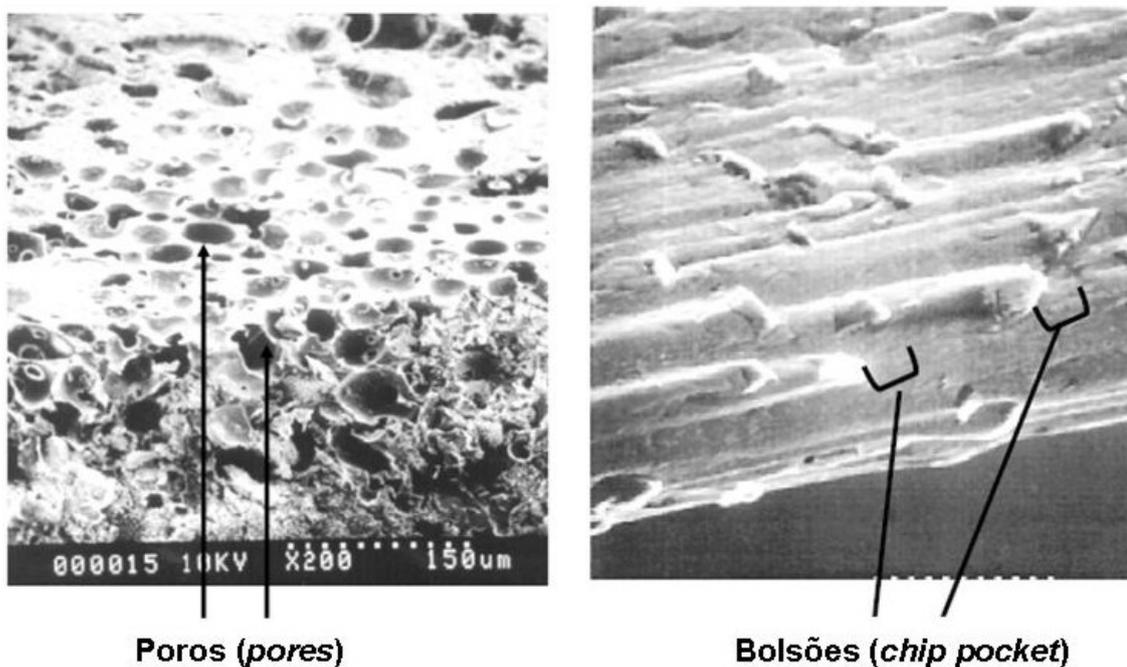
Figura 2.38 – Disco abrasivo a) antes e b) após dressagem ou pré-corte (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

A dressagem é uma operação que regulariza o perfil do disco e aumenta a sua abrasividade. Este é obtido pela geração dos chamados *chip pockets*, que na verdade, são bolsões côncavos entre grãos, necessários para transporte de fluido refrigerante ao local de contato entre grão e material cortado e também para alojamento do cavaco removido.



a) **Figura 2.39 – Dressagem.** Em a) o disco abrasivo pode ter sua abrasividade aumentada após operação de dressagem. A figura b) ilustra a exposição do grão de diamante (GIDEON, 2008)

Discos eletrofundidos (níquel) e de elemento ligante metálico apresentam perfil topográfico diferente de discos feitos em resina. O que também influi na abrasividade. Discos de níquel e metal apresentam bolsões côncavos (*chip pocket*), enquanto os discos de resina apresentam poros (*pores*) (Figura 2.40).



a) **Figura 2.40 – Perfil topográfico de discos abrasivos.** Em a) poros e em b) *chip pocket* (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

A seleção do disco para o corte de determinado material é de extrema importância para a qualidade do corte. As figuras a seguir mostram duas situações de corte do mesmo material, porém com discos diferentes. Na primeira (Figura 2.41) o material foi cortado com um disco em que o tamanho dos grãos é praticamente o

dobro do disco usado no corte seguinte (Figura 2.42) O tamanho do grão do disco tem influência direta na geração de imperfeições de corte.

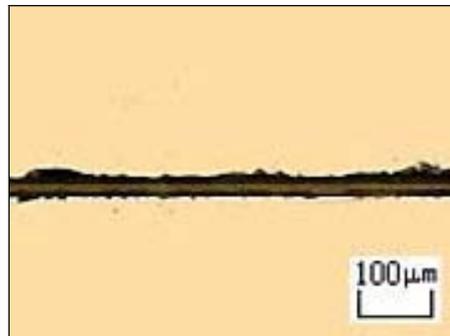


Figura 2.41 – Corte por disco abrasivo de grãos grandes (Disponível em: <http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dicing_thin.html>. Acessado em:18/06/2007).

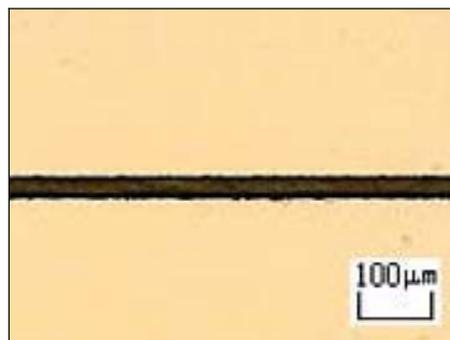


Figura 2.42 – Corte com disco abrasivo de grãos pequenos(Disponível em: <http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dicing_thin.html>. Acessado em:18/06/2007).

As velocidades de rotação (velocidade periférica do disco abrasivo) e de corte (velocidade de avanço do disco), bem como as propriedades do disco abrasivo, são características que trabalham juntas e devem ser bem conhecidas para a definição dos melhores parâmetros de processo. Essas grandezas e outras fazem parte do estudo do processo de corte abrasivo, tema que será abordado no próximo item.

2.3.2 Considerações teóricas sobre o processo de corte abrasivo

A maior parte dos estudos sobre o processo de corte com *dicing saws* aborda: a melhoria de produtividade do processo, melhoria da qualidade do produto e viabilidade de aplicação do processo em novos produtos.

A produtividade e viabilidade de aplicação do processo em novos produtos, geralmente são abordadas por fabricantes de máquinas e de suprimentos, como: discos de corte abrasivos e *spindles*.

Empresas fabricantes de *dicing saws*, tais como ADVANCED DICING TECHNOLOGY (ADT), DISCO CORPORATION E LOADPOINT LTD., disponibilizam periodicamente publicações sobre novas aplicações e ganhos de produção mantendo a qualidade.

Já publicações como: Mizuno, Iyama e Zhang, 2008; Luo e Wang, 2008; Kim, S., Lee e Kim, N. (2007) abordam o estudo da geometria e forças de corte como meio de se compreender os mecanismos geradores de defeitos de corte.

Este item abordará considerações teóricas a respeito da geometria, forças, mecanismos e defeitos gerados pelo processo de corte abrasivo.

2.3.2.1 Geometria de corte

O corte do substrato ou *wafer* pode ser feito em apenas um corte ou em cortes sucessivos, de acordo com a espessura do material ou a largura do corte necessária (corte *dual*). Logicamente, é preferível fazer um corte em uma única etapa, pois um disco abrasivo fino pode curvar-se devido à carga desbalanceada no segundo corte (Figura 2.43). O seccionamento definitivo é obtido com o disco em penetração total no material e penetração parcial no filme de sacrifício (*tape*) do *carrier* (GIDEON, 2008).

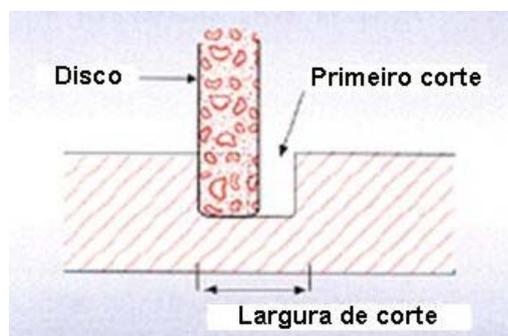


Figura 2.43 – Corte *dual* (GIDEON, 2008).

Existem algumas opções de trajetória de corte do disco abrasivo. Geralmente se adota um sentido de corte. Evidentemente, é possível cortar nos dois

sentidos, porém, são condições de corte diferentes. De acordo com a Figura 2.44 a, a quantidade de material removido é maior no início da espessura D , segundo o sentido de giro do disco e deslocamento da mesa de corte. No sentido oposto, a Figura 2.44 b demonstra que a quantidade de material removido é maior no fim. A energia necessária para remover o material aumenta à medida que o cavaco é formado. Porém, a alta quantidade de energia necessária no início do corte torna as outras forças envolvidas desprezíveis, obtendo-se, portanto, menor dissipação e redução no consumo de energia, com melhora na qualidade superficial da peça. Outro fato interessante, é que os esforços de corte, na condição (a) “empurram” o material para baixo (*down cutting*) e na condição (b) “puxam” para cima (*up cutting*) (GIDEON, 2008).

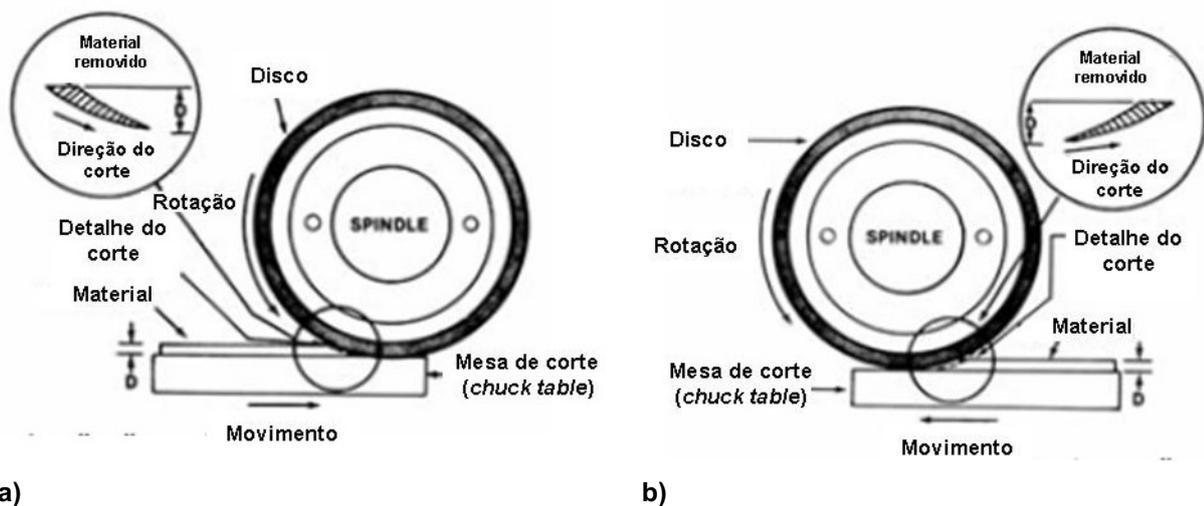


Figura 2.44 – Sentido de giro, a) sentido horário e b) sentido anti-horário (GIDEON, 2008).

O retorno do disco, ao fim de um corte, é feito acima da superfície do material, sem contato, ou então, retornar à posição inicial cortando o substrato. É feito um avanço no eixo Y e sucessivos cortes são realizados até dimensão total do substrato.

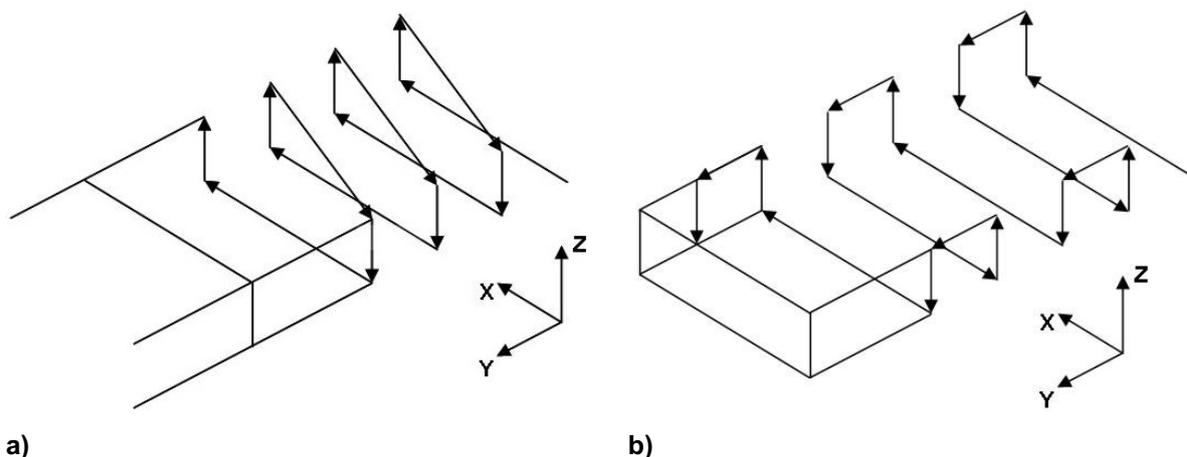


Figura 2.45 – Trajetórias de corte. Em a) o disco passa sobre o material sem tocá-lo, preservando o sentido de corte em todos os cortes. Em b) o disco retorna a posição inicial alterando o sentido de corte (DISCO CORPORATION. OPERATION MANUAL, 2007).

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.

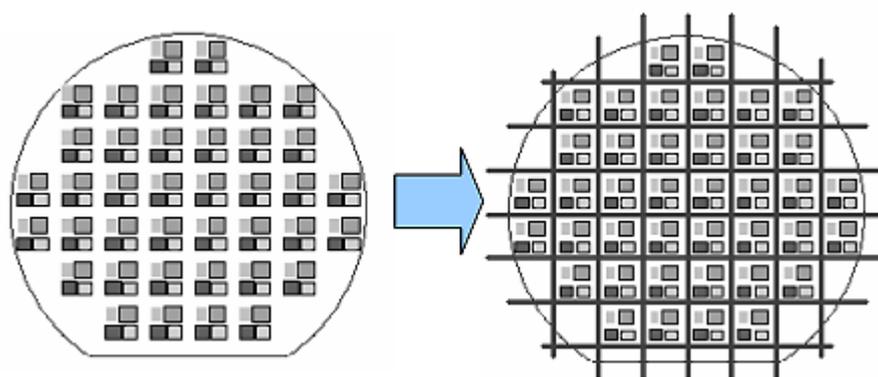
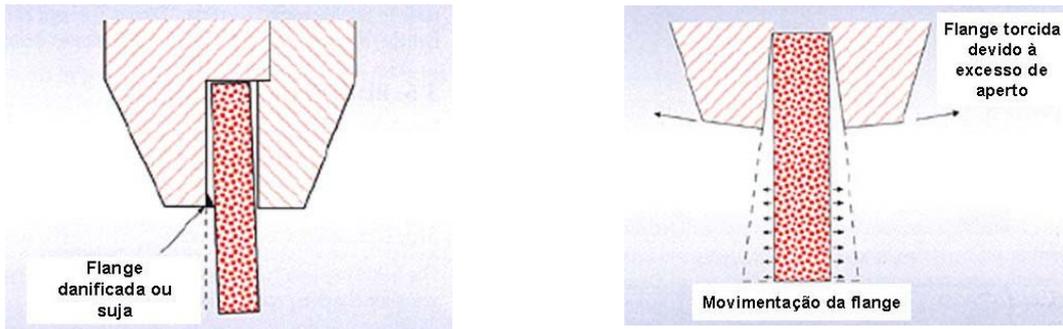


Figura 2.46 - Processo de corte de filmes finos (Disponível em: <http://www.disco.co.jp/eg/products/description/description01.html>). Acessado em: 18/06/2007).

O perpendicularismo e linearidade do corte são de extrema importância. Quase todos os parâmetros podem afetar a geometria do corte: valor da faixa de amortecimento da máquina, desbalanceamento do *spindle*, disco mal instalado na flange (Figura 2.47), desbalanceamento da flange, velocidade de avanço alta, rotação do disco baixa, falta de refrigeração, flange suja ou danificada, outros.

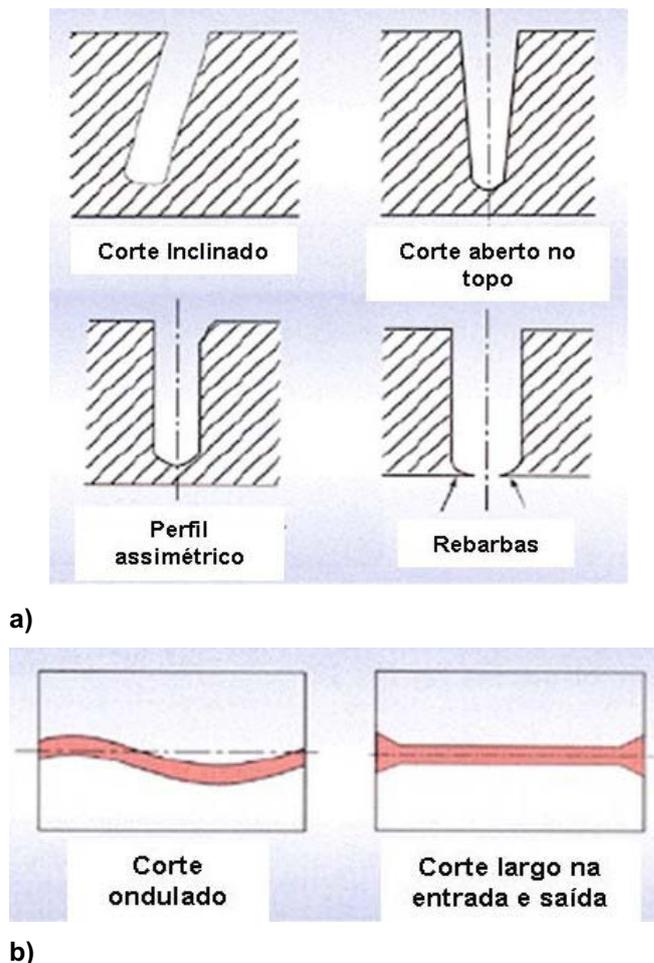


a)

b)

Figura 2.47 – Problemas de inclinação do disco de corte decorrente de: a) imperfeições da flange e b) excesso de torque no aperto da flange (GIDEON, 2008).

Os fatores citados, quando agindo de forma danosa, geram esforços desbalanceados ao disco de corte, fazendo com que este incline sua aresta cortante e produza cortes tendenciosos (Figura 2.48). (MIZUNO, IYAMA e ZHANG, 2008; LUO e WANG, 2008; KIM, S., LEE e KIM, N. 2007).



a)

b)

Figura 2.48 – Cortes gerados por inclinação do disco de corte: a) perda de perpendicularismo com relação ao topo e base e b) perda de linearidade (GIDEON, 2008).

Quando em uma escala menor, esses efeitos podem gerar um aumento da largura de corte (*kerf width*). Essa condição é pouco desejada quando se tem larguras de corte pré-definidas.

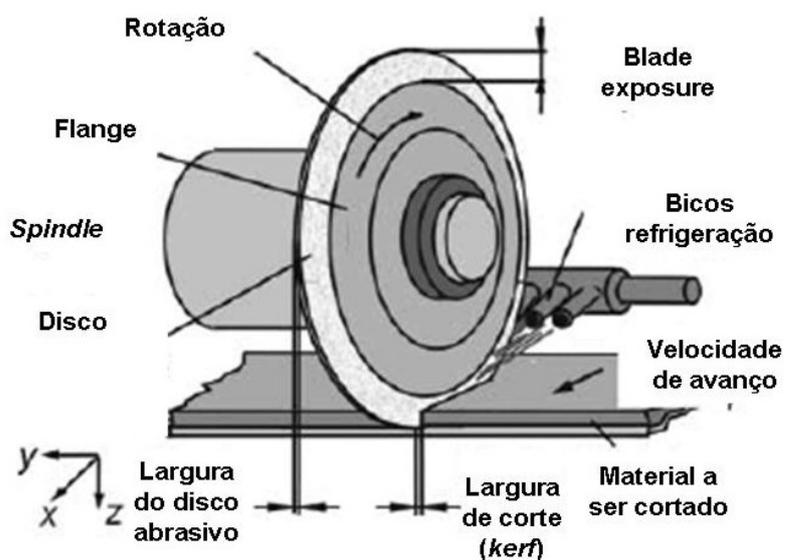


Figura 2.49 – Largura de corte (*kerf width*) e espessura do disco (*blade width*) (GATSEN, 2001).

Alguns fabricantes de *dicing saw* sugerem que a área de exposição do disco abrasivo na flange (*blade exposure*) não deva ultrapassar 30 vezes a espessura do disco, isso garantiria rigidez ao conjunto, diminuindo a possibilidade de cortes sem a geometria esperada.

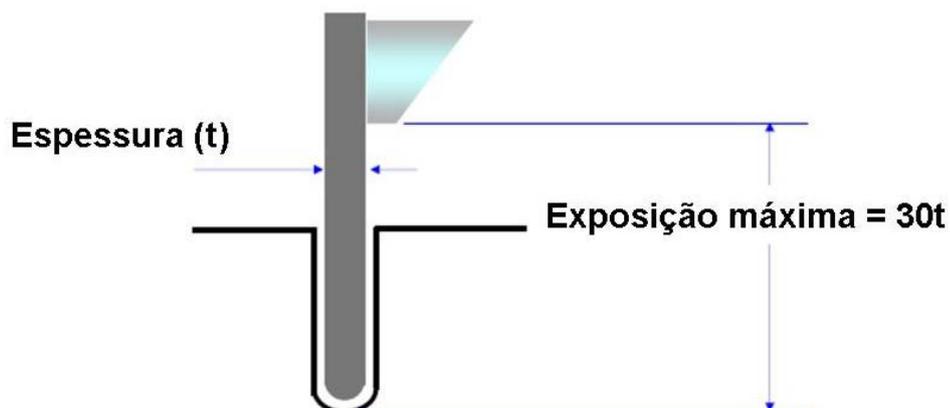


Figura 2.50 – Relação entre área exposta do disco abrasivo montado na flange e sua espessura (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

O processo de corte, muitas vezes serve como meio de se conferir uma geometria específica ao material ou corte.

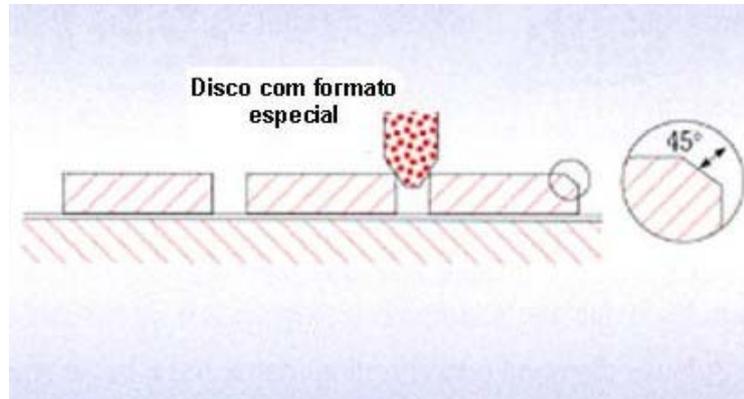


Figura 2.51 – Geometrias especiais (GIDEON, 2008).

O ângulo de aproximação (Φ) é uma grandeza geométrica relevante na geração das forças de corte. Quanto maior o diâmetro do disco, menor o ângulo de aproximação.

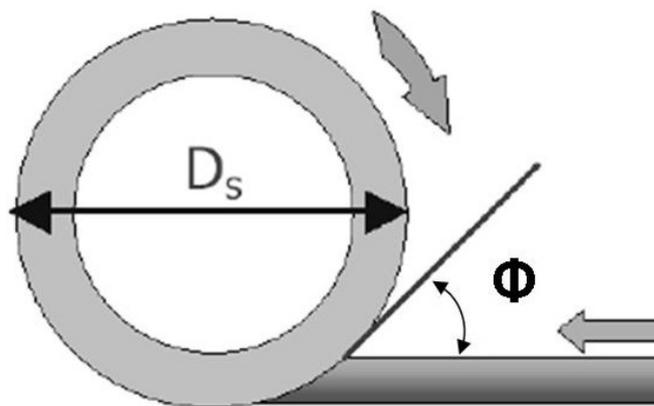


Figura 2.52 – Ângulo de aproximação (Φ) (GIDEON, 2008).

O acabamento superficial do corte é função das características do material que está sendo trabalhado, juntamente com o disco abrasivo e os parâmetros da máquina. Em muitos dos casos de corte de materiais frágeis, o acabamento superficial também afeta os cantos superior e inferior do material. Dependendo da qualidade dimensional exigida para a peça, associa-se ao processo de corte o processo de retificação das superfícies. Esse conjunto de operações é conhecido como DBG (*Dicing Before Grinding*) e foi desenvolvido pela DISCO CORPORATION. Normalmente é aplicado no corte de silício para a produção de circuitos integrados.

A primeira etapa do DBG é o corte parcial do silício de forma que não ultrapasse o substrato em sua espessura. Seguido da colagem de uma lâmina de contato para que o conjunto possa ser manipulado e posicionado inversamente. Na etapa seguinte, um disco de retificação consome o substrato até atingir as ranhuras do pré-corte, segregando o substrato em inúmeras pequenas partes. As duas últimas etapas consistem na colagem de filmes adesivos para manipulação e posicionamento das peças.

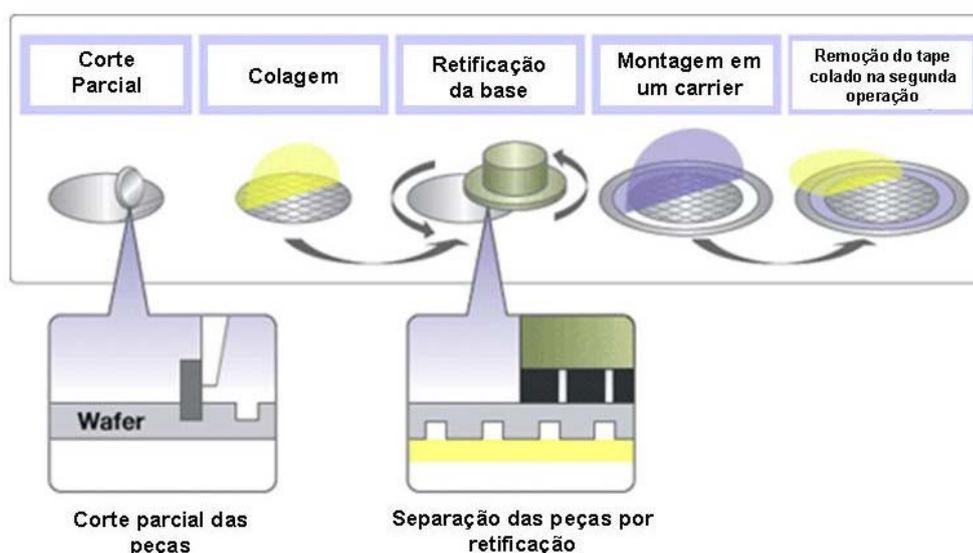


Figura 2.53 – DBG (Disponível em: <<http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dbg.html>>. Acessado em: 18/06/2007).

2.3.2.2 Forças de corte

A elaboração de modelos matemáticos que expliquem o comportamento das forças geradas durante o processo de corte é fundamental na previsão de defeitos.

Os estudos feitos por Kim et al. (2007), são significativos quanto à relação entre os parâmetros de:

- Qualidade do material, como espessura e acabamento superficial;
- Dureza do material ligante do disco abrasivo;
- Refrigeração e remoção do cavaco;
- Velocidade de avanço;
- Rotação do cabeçote de corte.

Nesse trabalho, a força de corte foi medida por um dinamômetro, enquanto a velocidade de avanço e a rotação foram alteradas. O sinal foi transferido a um amplificador de carga e um filtro passa-baixa. Os dados foram salvos em PC. O material cortado foi *wafer* de silício de superfícies polidas.

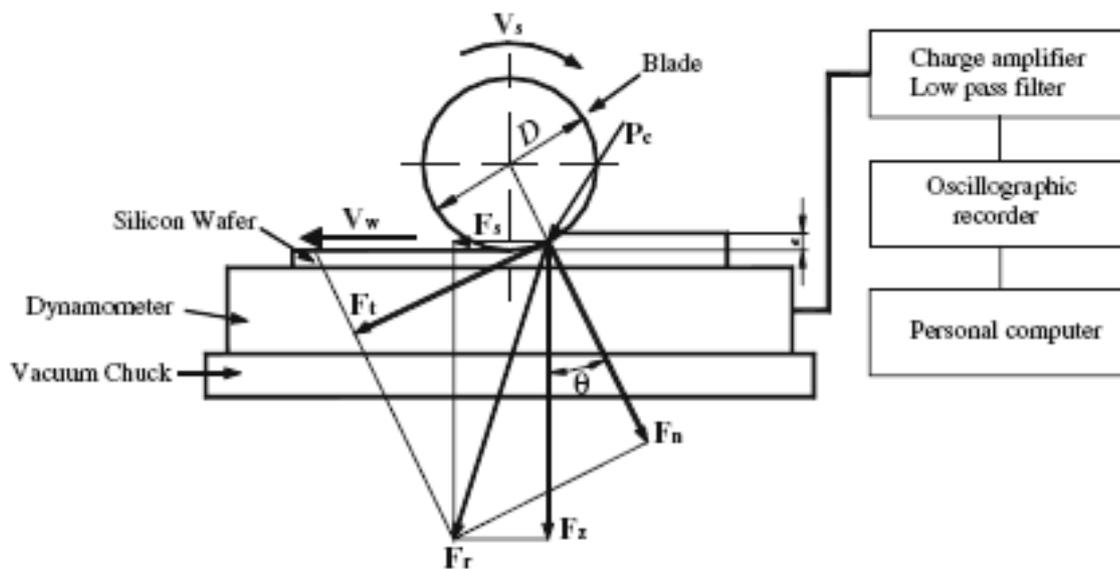


Figura 2.54 – Sistema de aquisição de dados de força de corte com dinamômetro junto à mesa de corte (KIM et al., 2007).

Sendo:

V_s	–	velocidade do disco de corte [rpm];
V_w	–	velocidade de avanço do material [mm/s];
D	–	diâmetro do disco [mm];
a	–	profundidade de corte [mm];
F_n	–	força normal [N];
F_t	–	força tangencial [N];
F_z	–	força de corte na direção Z [N];
F_x	–	força de corte na direção X [N];
F_r	–	força resultante entre das forças F_x e F_z [N].

O modelo proposto inicialmente descreve que a penetração do disco no material gera uma força F_r que pode ser decomposta na direção X e Z e, também, em componentes tangenciais e radiais ao disco de corte, no ponto de contato (P_c). As forças são descritas da seguinte forma:

$$F_n = \lambda \cdot F_t \quad (1)$$

$$F_t = K \cdot b \cdot \left[\frac{V_w}{V_s} \cdot a \right]^\alpha \quad (2)$$

Sendo:

- λ - constante de proporcionalidade [adimensional];
- b - espessura do disco de corte [mm];
- α - fator relativo ao elemento ligante. Normalmente 1,41;
- K - constante igual a: $2,19 \times 10^6$ [adimensional];

$$F_z = F_n \cdot \cos \Theta + F_t \cdot \sin \Theta \quad (3)$$

$$F_x = F_t \cdot \cos \Theta - F_n \cdot \sin \Theta \quad (4)$$

$$F_r = \sqrt{F_t^2 + F_n^2} \quad (5)$$

Sendo φ o ângulo entre F_n e F_z :

$$\Theta = \cos^{-1} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot a}{D} \right) \quad (6)$$

Se φ for muito pequeno, é possível escrever:

$$F_z = F_n \quad (7)$$

$$F_x = F_t \quad (8)$$

No entanto, os experimentos revelaram que, dadas às condições de corte do experimento, citadas no Quadro 2, as forças de corte eram inferiores aos valores obtidos pelo modelo proposto.

Condições do experimento	
Máquina	Automatic dicing system APS-200A
Disco de corte	Tipo Hub
	Material ligante: metal
	Diâmetro externo: 55,56 mm
	Diâmetro interno: 19,95 mm
	Espessura: 0,05 mm
Material a ser cortado	Silício (espessura de 0,730 mm)
Condições de corte	Sentido anti-horário (<i>down cut</i>)
	Velocidade de avanço (<i>feed rate</i>): 7 ~ 15 mm/s
	Rotação (<i>blade speed</i>): 12.000 ~ 20.000 rpm
	Profundidade de corte (<i>depth of cut</i>): 0,5 mm
Dinamômetro	Kistler 9272
Microscópio	STM-MJS2 (Olympus)

Quadro 2 – Condições do experimento (KIM et al., 2007).

Com base nos dados experimentais, Kim et al. (2007) propõe um modelo baseado no formato $y = a \cdot x^b$. As equações 9 e 10 são F_t e F_n escritos em função de V_w , tendo V_s como 20.000 rpm. As equações 11 e 12, são F_t e F_n escritos em função de V_s para V_w de 7mm/s.

$$F_t = 0,15 \cdot V_w^{0,48} \quad (9)$$

$$F_n = 0,13 \cdot V_w^{0,79} \quad (10)$$

$$F_t = 2,56 \cdot 10^4 \cdot V_s^{-1,12} \quad (11)$$

$$F_t = 3,2 \cdot 10^6 \cdot V_s^{-1,56} \quad (12)$$

Os expoentes das equações de 9 a 12 são provenientes dos ajustes das curvas obtidas pelo experimento.

Yeo e Balon (2002) estabelecem uma correlação entre o processo de corte e o de retificação. A idéia é aproximar as características do rebolo, tais como: espessura, diâmetro, tamanho do grão, outros, às características do disco de corte. Essa abordagem é totalmente desaconselhada por Mizuno, Iyama e Zhang (2008), que propõe um modelo sofisticado, com base no antigo modelo de Matsui de 1956.

Matsui apud Mizuno, Iyama e Zhang (2008), leva em consideração que a extremidade do disco de corte não é uma geometria plana e perpendicular às laterais do disco. Ele elabora um modelo partindo da aproximação que a extremidade do disco tem formato cônico (Figura 2.55)

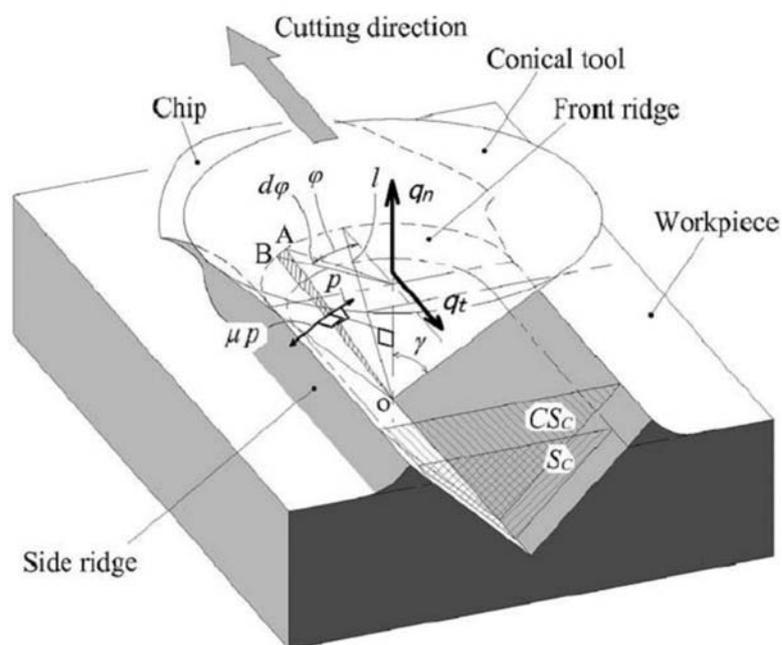


Figura 2.55 – Modelo de Matsui para o corte abrasivo (MATSUI apud MIZUNO, IYAMA e ZHANG, 2008)

Além disso, ele lança mão da hipótese de que: o cone é sempre perpendicular ao eixo da ferramenta, mantendo a força tangencial na mesma posição, ou seja, o cone nunca inclina o que representaria uma deflexão do disco e conseqüente geração de corte inclinado. Dada a hipótese e as considerações

baseadas em tal, pode-se dizer que a componente da força tangencial atuando em uma área infinitesimal OAB na superfície do cone, é:

$$dq_t = p \cdot \frac{1}{2} \cdot l^2 \cdot \text{sen} \gamma \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi + \mu \cdot p \cdot \frac{1}{2} \cdot l^2 \cdot \text{sen} \gamma \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \quad (13)$$

$$q_t = p \cdot l^2 \cdot \text{sen} \gamma \cdot \cos \gamma + \mu \cdot p \cdot l^2 \cdot \text{sen} \gamma \quad (14)$$

$$dq_n = p \cdot \frac{1}{2} \cdot l^2 \cdot \text{sen}^2 \gamma \cdot d\varphi \quad (15)$$

$$q_n = \frac{\pi}{2} \cdot p \cdot l^2 \cdot \text{sen}^2 \gamma \quad (16)$$

Sendo:

- p - área do material submetida às forças de corte;
- l - comprimento da geratriz da superfície cônica cortante em contato com o material;
- γ - metade do ângulo do cone;
- φ - posição angular de OAB com relação à direção de corte;
- μ - coeficiente de fricção entre a superfície cônica cortante em contato com o material.

Comparando com o modelo anterior, é possível dizer que a força tangencial (q_t) e normal (q_n) é equivalente às forças de corte na direção X (F_x) e Z (F_z) em módulo, respectivamente.

Mizuno, Iyama e Zhang (2008) explicam que muitos estudos referentes a processos de corte assumem a extremidade do disco de corte como sendo de uma geometria simples, isso gera imprecisão ao modelo, pois, normalmente, as extremidades dos discos de corte não possuem perfil definido.

2.3.2.3 Mecanismo de corte

Os mecanismos de remoção de materiais durante a usinagem sempre foram tema de estudo da engenharia. Nos últimos anos essa abordagem recaiu sobre materiais frágeis, devido a sua crescente aplicação na industrial e comercial. A maioria das publicações sobre mecanismos de remoção de materiais concentra-se no silício, alguns metais e cerâmicas (FUGITA et al., 2006; NIX et al., 2005; LUO e WANG, 2008).

Luo e Wang (2008), estudando os defeitos gerados pelo corte abrasivo do silício (111) e (100), explicam por meio de experimentos, que os mecanismos de remoção de material podem ser divididos em três fases:

- Fase elástica;
- Fase de deformação plástica;
- Fase de trincamento/lascamento (*cracking*).

Neste experimento, uma *dicing saw* corta o silício em pequenos trechos de quatro milímetros (4 mm), com uma profundidade de penetração de 0,4 mm e velocidade de avanço constante de 9,88 mm/min. A força de corte e a intensidade da emissão acústica do processo foram monitorados e descritos em diagramas de força de corte/distância percorrida pelo disco, por intensidade acústica. A Figura 2.56 ilustra os mecanismos em suas respectivas etapas e as Figuras 2.57 a), b), c) e d) são ampliações do perfil gerado pelo corte na fase plástica e de lascamento.

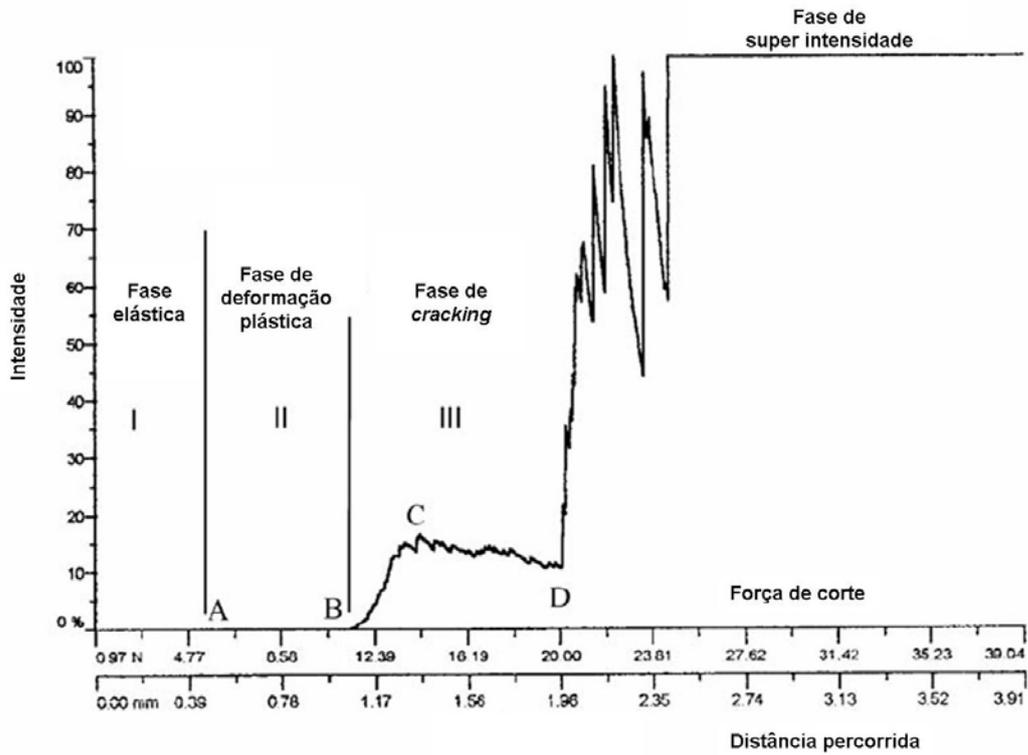


Figura 2.56 – Mecanismos de corte no silício (111) (LUO e WANG, 2008).

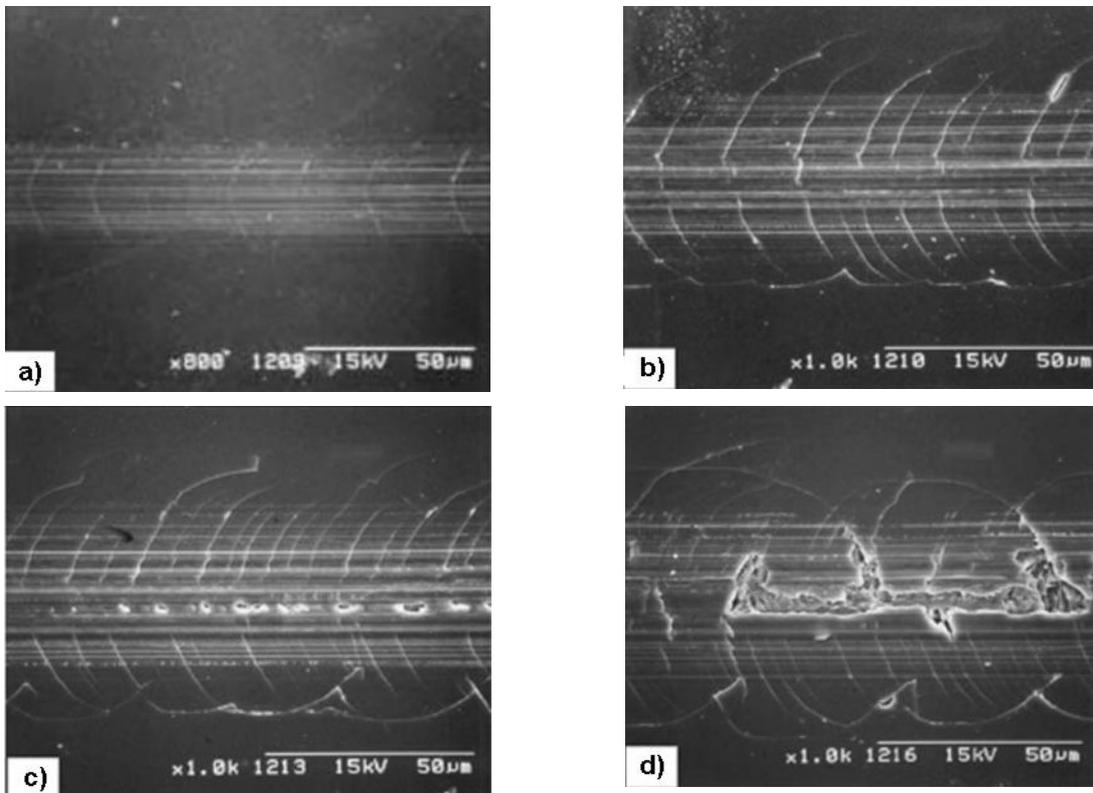


Figura 2.57 – Mecanismos de corte no silício (111). Em a) fase elástica, em b) fase de deformação plástica, em c) fase de *cracking* e em d) fase de super intensidade acústica / grandes lascas (LUO e WANG, 2008).

Fugita et al. (2006) e Mamalis et al. (2002) desenvolveram trabalhos sobre retificação de materiais cerâmicos, chegando às mesmas fases sugeridas por Luo e Wang (2008): fase elástica, plástica e lascamento.

Segundo Mamalis et al. (2002), a grande dificuldade de se usinar materiais frágeis e duros, como a cerâmica, se dá pelas suas características e estrutura cristalina, formada por fortes ligações covalente e iônica.

Óxidos de alumínio (Al_2O_3) e carbeto de silício (SiC) são cerâmicas (óxido e não óxido, respectivamente) com estrutura fechada, resistentes ao ataque químico e elétrico (isolantes).

A Tabela 1 é um resumo dos óxidos e não óxidos cerâmicos mais comuns. A rigidez é indicada pelo alto valor do módulo de Young (E).

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas de cerâmicas avançadas (MAMALIS et al., 2002).

Características físicas e mecânicas de cerâmicas avançadas							
	Densidade g/cm ³	Dureza Vickers (HV)	Módulo de elasticidade E (GPa)	Resistência à fratura K _{1c} (MP√m)	Resistência à torção (MPa)	Condutividade térmica (W mK ⁻¹)	Rigidez (N mm ⁻¹)
Al ₂ O ₃	3,8 ... 4,2	16,5	344	4	304	25	360
ZrO ₂	5,9	13	206	5	980	28	420
SiC	3,1 ... 3,2	25	392	3,6	490	59	700
B ₄ C	2,5	26	300	7,5	700	29	400
Si ₃ N ₄ HPSN	3,2	15	294	6	588	30	690
Si ₃ N ₄ RBSN	2,5	17	345	6	750	17	215
C45	7,8	-	210	120		50	600

HPSN: *hot-pressed Si₃N₄* (Nitreto de Silício prensado à quente)

RBSN: *reaction-bonded Si₃N₄* (Nitreto de Silício sintetizado por reação química)

Fica claro que, materiais com diferenças tão significativas, possuirão diferenças nos mecanismos de remoção quando comparados a outras famílias de materiais, como aços, polímeros, outros.

O estudo dos mecanismos de remoção do material é uma abordagem microscópica da interação entre o disco abrasivo e o material. As características da abrasividade do disco foram descritas no item 2.3.1 sobre discos de corte.

2.3.2.4 Defeitos de corte

Os estudos citados nos três itens anteriores convergem para um único objetivo: compreender os mecanismos geradores de defeitos de corte.

Um dos grandes problemas do corte de materiais frágeis é a geração de trincas, em especial, lascas (*chipping*). Esse defeito é totalmente indesejado por interferir diretamente na geometria e estrutura do material.

Segundo Gideon (2008), o *chipping* pode ocorrer no topo e na base do corte (Figura 2.58)

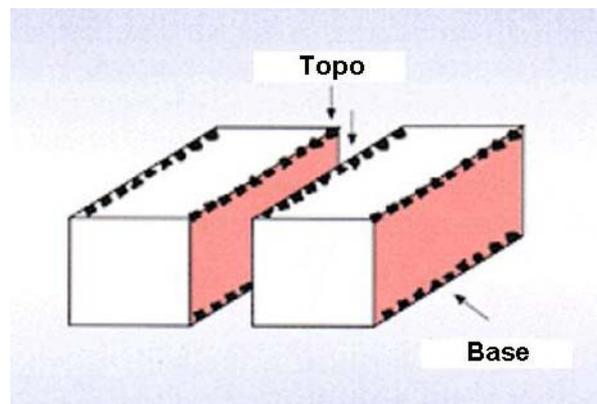
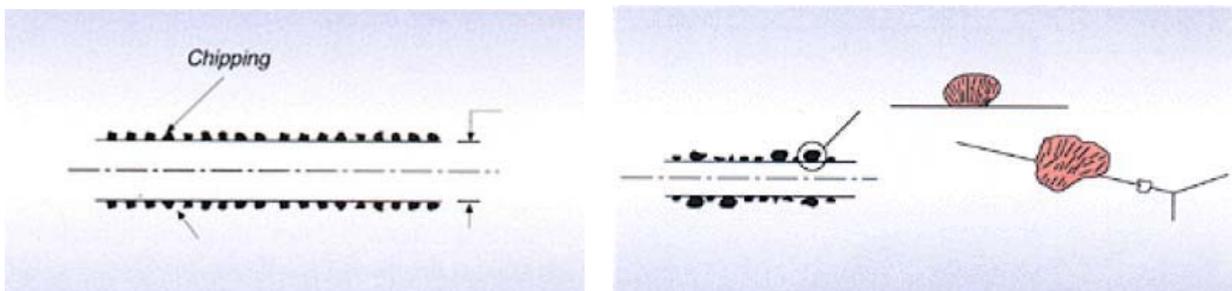


Figura 2.58 – Regiões de *chipping* (GIDEON, 2008).

Diferentes tipos de lascas, em diferentes intensidades (tamanho), podem ocorrer no lado superior do material. Os tipos mais comuns são: uma linha contínua de pequenas lascas com tamanhos similares (Figura 2.59 a) e uma linha de grandes lascas em forma de concha (Figura 2.59 b).



a)

b)

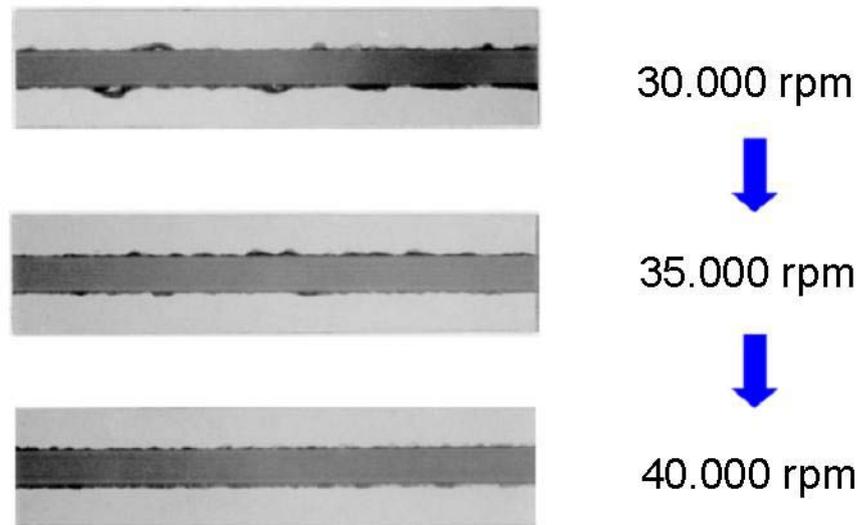
Figura 2.59 – *Chippings* mais comuns do lado superior: a) seqüência de pequenas lascas e b) seqüência de lascas maiores (GIDEON, 2008).

As causas principais são:

- Impacto do grão abrasivo no material durante o corte. Grãos maiores geram maiores lascas;
- Velocidade de avanço do corte (*feed rate*). Maiores velocidades fazem com que cada grão remova mais material a cada giro do disco abrasivo. Isto gera aumento de temperatura e maiores forças de corte;
- Má refrigeração;
- Vibrações de fontes diversas;
- Má fixação do *carrier* na mesa ou do material. Uma montagem inadequada (desalinhada, com excesso ou pouco torque na união) possibilita que o material se mova durante o corte.

Segundo a Apresentação sobre discos de corte da empresa DISCO CORPORATION (1997). O *chipping* também pode ser gerado por:

- Tensões internas do material;
- Baixa rotação do disco abrasivo (Figura 2.60), sendo importante ressaltar que isso depende das condições de corte;
- Tamanho do grão: quanto maior o grão maior a probabilidade de defeito;
- A concentração do disco influi pouco no *chipping*;
- O material ligante. Ele tem grande influência, pois define o grau de solidez dos grãos, ou seja, permite, ou não, vibração dos grãos durante o corte;
- Altas velocidades de avanço. Quanto maior o avanço, maior será a quantidade de material removido em um curto período de tempo, em alguns casos, superando os limites de bom desempenho do disco abrasivo. O esforço de corte também será maior, como é possível verificar na Figura 2.61, que correlaciona velocidade de corte (*feed rate* ou *feed speed*) com força de corte;
- Quanto maior a exposição da aresta cortante do disco, menor rigidez.



Blade type: ZH2050 27HECC
Feed speed: 70mm/sec

Figura 2.60 – Geração de lascas por baixa rotação (APRESENTAÇÃO SOBRE DISCOS DE CORTE DA EMPRESA DISCO CORPORATION, 1997).

A Figura 2.61 mostra a relação que existe entre a velocidade de corte e a força de corte e a influência sobre o *chipping*.

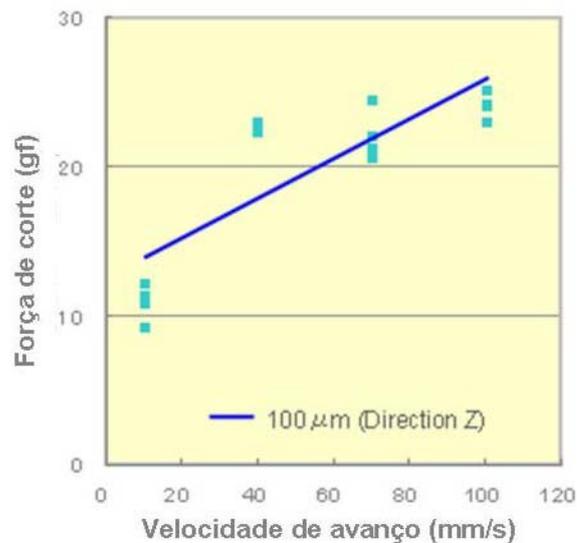


Figura 2.61 – Velocidade de corte por força de corte (Disponível em: <http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dicing_thin.html>. Acessado em:18/06/2007).

Pode-se observar que a força de corte nesse tipo de processo é baixa, quando comparada a outros processos. Porém, é suficiente para gerar defeitos no material cortado, fato que também evidencia a fragilidade do filme fino. A figura a seguir mostra uma trinca gerada por esforço excessivo de corte (Figura 2.62).

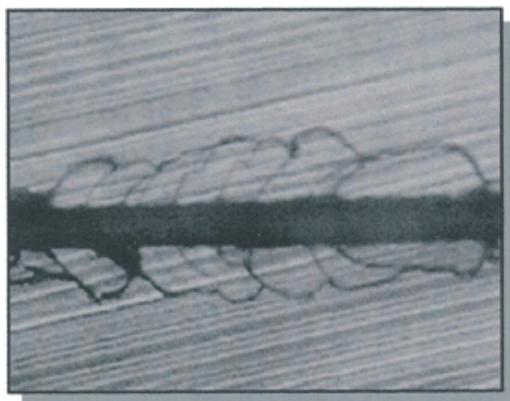


Figura 2.62 - Silício trincado por esforço de corte excessivo (Disponível em: <http://www.disco.co.jp/eg/solution/library/dicing_thin.html>. Acessado em:18/06/2007).

Kim et al. (2007), em seus experimentos, mediu a máxima largura de corte de cada experimento e correlacionou esse dado com o “grau de lascamento” (*degree of chipping*).

Analisando a força tangencial (F_t) pela máxima largura de corte (D_w), e assumindo que a máxima largura de corte pode ser representada por uma função do tipo: $y = A + B.x$, sendo que a variável x pode assumir os valores de V_w e V_s , obtêm-se as seguintes relações:

$$D_w = 71,03 + 0,53 \cdot V_w \quad (17)$$

$$D_w = 85,65 - 10^{-4} \cdot V_s \quad (18)$$

Lembrando que:

- V_s – velocidade do disco de corte [rpm];
- V_w – velocidade de avanço do material [mm/s];

Substituindo (9) e (10) na (17),

$$D_w = 71,03 + 0,53 \cdot \left[\frac{F_t}{0,15} \right]^{1/0,48} \quad (19)$$

$$D_w = 71,03 + 0,53 \cdot \left[\frac{F_n}{0,13} \right]^{1/0,79} \quad (20)$$

Lembrando que:

- F_n – força normal [N];
 F_t – força tangencial [N];

Estas equações (19 e 20) são uma estimativa do “grau de lascamento” de acordo com as forças de corte F_t e F_n . As diferenças entre o modelo proposto e os valores de máxima largura de corte podem ser observadas na Figura 2.63, onde a linha tracejada é o gráfico da equação 19 e a linha cheia, são os valores de $F_t \times D_w$ obtidos experimentalmente (para $V_s = 20.000$ rpm).

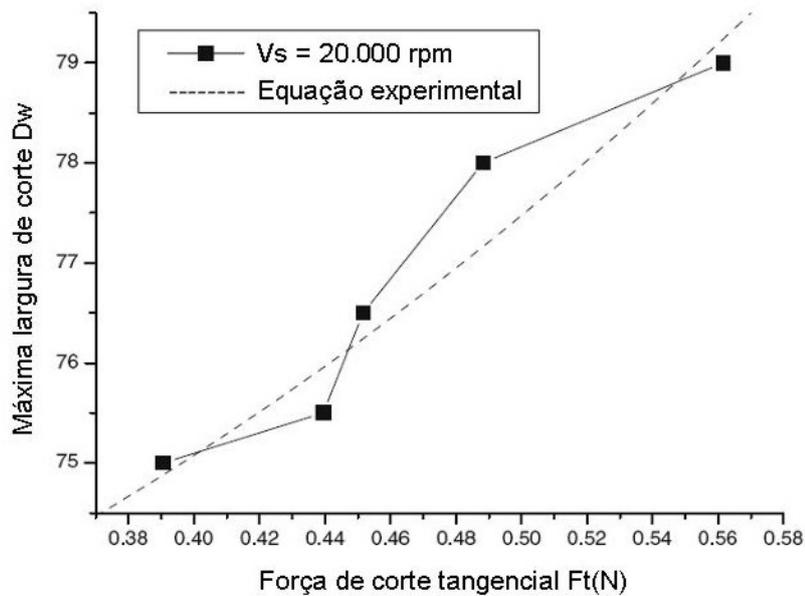
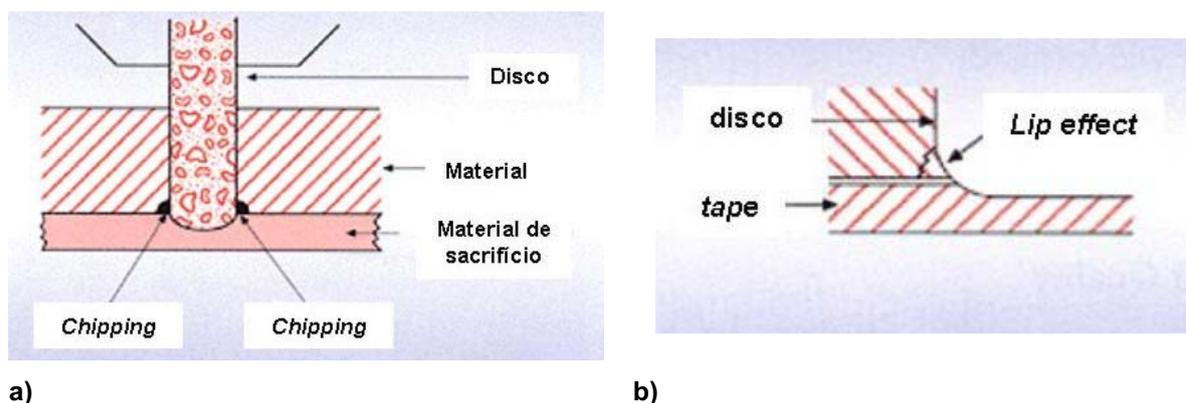


Figura 2.63 – Equação experimental da máxima largura de corte (KIM et al., 2007).

Lascas na parte inferior também podem ocorrer. Em vários casos, o substrato está sob pressão (interna ou externa) no lado inferior. No instante que o disco abrasivo penetra na região tensionada, há um relaxamento. Esse alívio, em alguns casos pode gerar uma lasca no material. Além disso, altas temperaturas, pouca penetração do disco abrasivo (*lip effect*) e os fatores citados como causa para *chipping* no lado superior, também podem ocasionar o defeito no lado inferior.



a) b)
Figura 2.64 – Geração de lascas na parte inferior do material. Em a) lascas na parte inferior e em b) *The lip effect* (GIDEON, 2008).

Rebarba é um problema comum quando se trabalha com materiais dúcteis ou de baixa dureza. Nesses casos, recomenda-se, principalmente: a correta seleção do disco abrasivo, evitando o uso de grãos grandes. Baixa rotação do disco e velocidade de avanço, possibilitando a limpeza do disco e remoção do material que impregna o disco após o corte. Refrigeração eficiente, de tal forma que haja grandes variações de temperatura no contato entre o disco e o material a ser cortado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como foco no processo de corte de precisão de materiais frágeis, é proposta uma estratégia para o projeto de uma minimáquina. Dentro dessa estratégia, são aplicadas técnicas para o estudo de possíveis configurações e tomada de decisões em cada etapa do projeto conceitual. O fluxograma proposto, baseado em modelos propostos no capítulo de revisão bibliográfica, é apresentado na Figura 3.1.

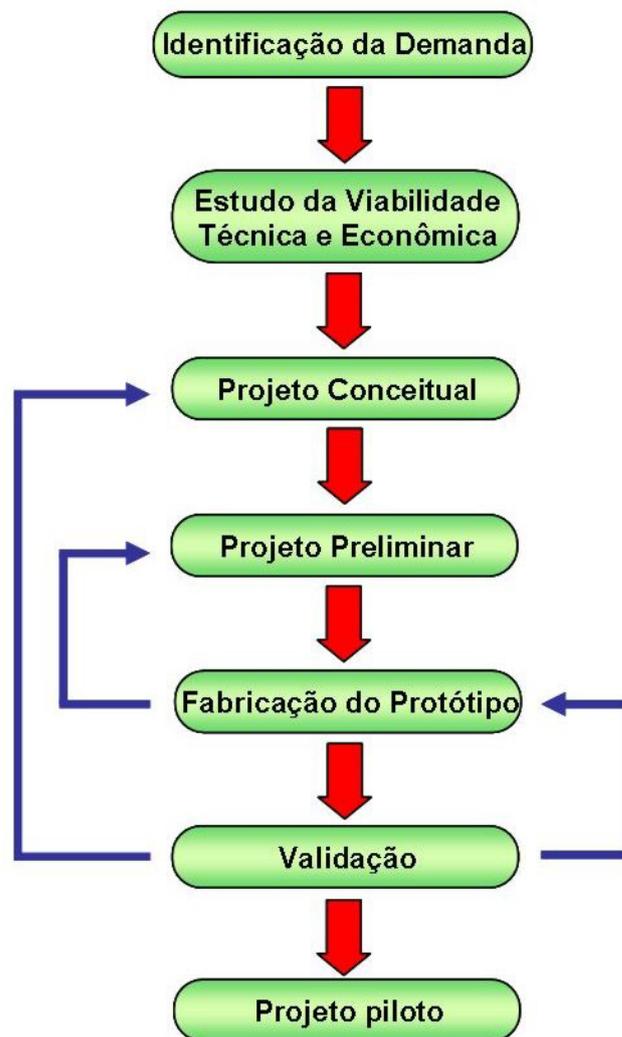


Figura 3.1 – Estratégia de projeto proposta.

3.1 Etapas de Projeto

A maioria das etapas do modelo proposto possui interações, iterações e retroalimentação.

Em quase todo o projeto, foi adotado o seguinte procedimento de tomada de decisão resumido, baseado nas propostas de Pahl et al. (2005) e Baxter (1998): dado o elemento motivador, é feito um levantamento das opções e a seleção da melhor em vista dos recursos, demanda ou algum outro fator de relevância.

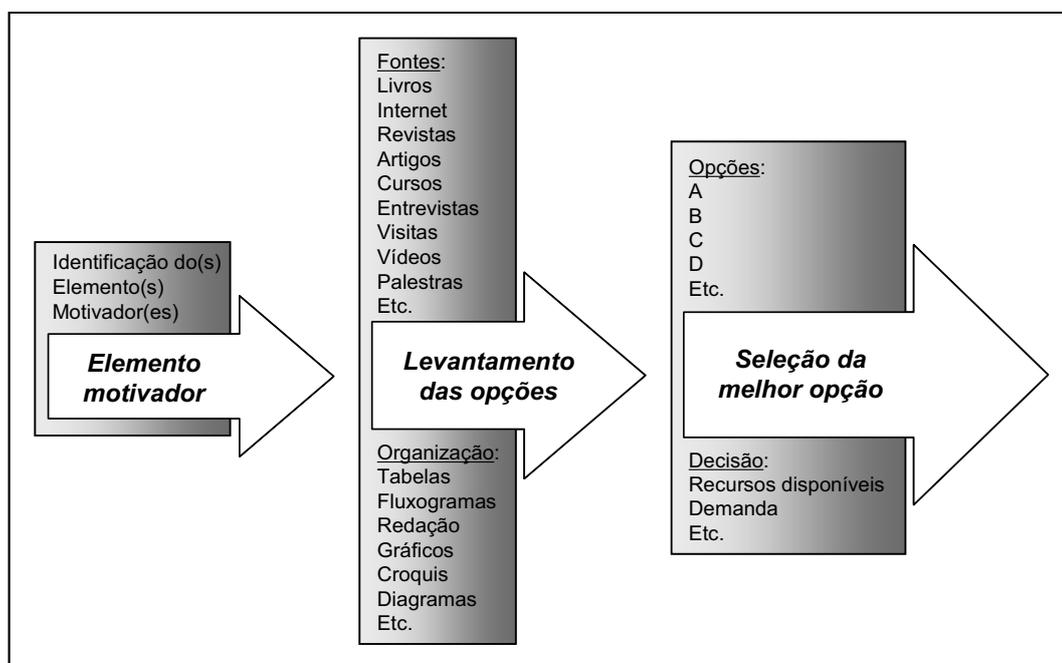


Figura 3.2 – Procedimento de tomada de decisão resumido.

3.1.1 Identificação da demanda

Como exposto no capítulo 2, é de interesse do Brasil gerar riqueza, não apenas agrícola ou petrolífera, mas também industrial e tecnológica. Situações em que os produtos se encontram em elevado estágio de desenvolvimento, como o caso de componentes eletrônicos, há a necessidade de absorver o desenvolvimento dos países de vanguarda, adaptando ao Brasil novas tecnologias e acelerando o desenvolvimento. Faz-se necessário não só investir em novas tecnologias, mas também trazê-las de fora. A tecnologia eletrônica tem tido expressivo crescimento mundial e é totalmente desinteressante abrir mão dos frutos que essa tecnologia pode trazer ao país.

O Brasil vem se mobilizando pelo domínio da fabricação de componentes eletrônicos, incluindo *chips* eletrônicos. Neste sentido, o domínio das técnicas de *dicing* é imprescindível e oportuno.

O país desenvolveu capacidade nas áreas de usinagem convencional e também em áreas específicas, como, a retificação e o corte de placas cerâmicas para pisos e revestimentos, porém, praticamente não há publicações sobre o processo de *dicing*.

Portanto, o projeto de uma máquina de corte de precisão e estudo do processo de usinagem de corte em diferentes tipos de substratos finos e frágeis é oportuno e vem de encontro com a motivação do país em alcançar capacidade na área de componentes eletrônicos e explorar as condições de usinagem desta categoria de máquina.

3.1.2 Estudo da viabilidade técnica e econômica

Nessa etapa foi feito um estudo de viabilidade técnica e econômica de se projetar e produzir um protótipo de uma máquina de corte abrasivo de materiais frágeis. Foram adotadas sugestões da literatura citada na revisão bibliográfica: o reconhecimento da fase do ciclo de vida do equipamento e da capacidade de produzir o protótipo (PAHL et al., 2005).

3.1.2.1 Reconhecimento da fase do ciclo de vida das *dicing saw*

O levantamento técnico sobre o equipamento (*dicing saw*) foi feito com base em manuais, catálogos, patentes, visitas técnicas a fabricantes, cursos, literatura referente ao processo de corte e projeto de máquinas de precisão. Observou-se que existe uma grande variedade de modelos, com diferentes níveis de sofisticação, porém, a grande maioria possui elementos em comum:

- 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;
- Cabeçote de corte de alta rotação. Um grau de liberdade na ação de corte;
- Refrigeração.

A movimentação linear em três direções tem o objetivo de criar um volume de trabalho para o disco de corte, o que confere versatilidade ao equipamento, expandindo sua capacidade de corte para peças com diferentes dimensões.

O giro da mesa de corte abre espaço para cortes em diferentes direções na peça, mantendo uma geometria precisa e ganho de tempo de processo. Também aplicado no alinhamento de alguns substratos para o máximo aproveitamento do corte, sem a necessidade de reposicionamento.

Existem diferentes configurações mecânicas que admitem essas características. O custo contabilizado nestas configurações pode variar muito, principalmente quanto ao uso dos mancais para movimentação das partes.

O uso de sistema de movimentação acionado por motores se deve à precisão, força e controle de velocidade e aceleração que estes podem oferecer. Os custos destes sistemas também podem variar dependendo da configuração.

Um projeto ideal teria um alto custo de fabricação. Cotações iniciais foram resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Cotações iniciais para o projeto

Componente	Descrição	Fornecedor	Custo aproximado*
Sistema de movimentação e posicionamento motorizado	Sistema servo acionado de movimentação MP2300 de 3 drives e 3 servo motores de 2,5N.m	YASKAWA Auto elétrico do Brasil	R\$ 25.000,00
Movimentação (fuso + castanha)	Fuso de esferas ECS 08015 de 320mm de comprimento, diâmetro 8mm x passo 1,5mm	KALATEC AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	R\$ 1.240,00/unid. + R\$ 1.200,00 de usinagem das extremidades.
Superfície de sacrifício	Adwill D-510T UV Dicing Tape	LINTEC OF AMERICA, INC	US\$ 1,750.00/100m
Cabeçote	Gantry Dicing SP – D05716/3	LOADPOINT LIMITED	£ 7.000,00

* Valores obtidos no período de Janeiro à Junho de 2007.

Os cabeçotes das *dicing saws* em geral são sustentados por mancais aerostático e atingem uma rotação de até 60.000rpm. Um *spindle* da LOADPOINT, citado na Tabela 2, é inviável a um protótipo, não só pelo custo, mas também pela

sua potência. Rotações menores do que 60.000 rpm são perfeitamente admissíveis nesse projeto, visto que se trata de uma minimáquina. A pretensão não é construir uma máquina com capacidade de produção equivalente das máquinas comerciais.

Em processos de alto desempenho, a refrigeração deve ser eficiente, o que implica o uso de bombas para pressurização do fluido líquido.

Neste trabalho, foi decidida a elaboração de um projeto de baixo custo. Para isso, algumas adaptações foram necessárias, como pode ser visto na Tabela 3. Evidentemente, essa decisão não foi baseada apenas no aspecto de custos, a maior contribuição ficou por conta da inclusão do conhecimento de sistemas de movimentação no projeto, tornando assim, o projeto mais completo, pois abrange quase todos os componentes da máquina.

Tabela 3 – Cotações para o projeto

Componente	Descrição	Fornecedor	Custo aproximado*
Sistema de movimentação e posicionamento motorizado	Drive fabricado pelo LTC. Motores de passo. Computador para controle do drive. Software TurboCNC.	Projeto do drive acessível na internet. Motores KALATEC. Computador propriedade do LTC. Software TurboCNC <i>freeware</i>	Drive (montagem): R\$ 170,00 Motores: R\$ 150,00 / cada
Movimentação (fusos e guias)	Barra roscada e buchas de latão	Componentes comerciais	R\$ 200,00
Superfície de sacrifício	Vidro	-	-
Cabeçote	Precise da Chapman Laboratory	Propriedade LTC	-

* Valores obtidos no período de Junho de 2008 à Fevereiro de 2009.

Alguns dispositivos auxiliares, tais como sistemas de visão, usados para alinhamento do corte de peças que necessitem de posicionamento, ou sensores para verificação de quebra ou desgaste de disco, não foram aplicados neste projeto. O estudo de cortes desse trabalho restringe-se apenas à geometria. Evidentemente, características como repetibilidade e resolução dos eixos de movimentação são importantes para o posicionamento do disco de corte. A medição eletrônica de desgaste do disco também se faz relevante, porém, não foi considerada.

A tecnologia evoluiu muito em operações de alinhamento da linha de corte, construção dos mancais aerostáticos, espessura do disco de corte, etc. Já é possível encontrar máquinas com mancais excitados por transdutores, o que reflete diretamente na qualidade do corte. Discos que suportam grandes profundidades de corte e máquinas totalmente automáticas que integram operações de retificação, corte e polimento.

A verificação econômica do processo de corte 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* para fixação do material à mesa de corte.

Existem muitas publicações sobre o produto a ser cortado e suas condições de corte, gerando várias opções de operação ao equipamento, principalmente para o caso do silício. Na literatura científica brasileira foram encontradas poucas citações, reforçando mais uma vez a relevância deste projeto. A literatura internacional tende a ser maior, pois a maior parte dos desenvolvimentos no ramo está fora do Brasil.

A metodologia de projeto também foi avaliada nessa etapa. Apesar de haver fontes sobre metodologias de projeto, existem poucas aplicações dentro país. Produtos de tecnologia nem sempre são desenvolvidos inteiramente dentro do país, tornando-se impraticável o uso de metodologias de geração de novos conceitos e ideias. Fato que reforça os objetivos desse projeto.

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.

3.1.2.2 Percepção da capacidade EESC / USP São Carlos

Nessa etapa do projeto foram observadas as competências profissionais e de infraestrutura do local em que o projeto será desenvolvido. Duas frentes foram criadas:

- Avaliação das competências oferecidas pela EESC, LTC e outros laboratórios;
- Aumento das competências dos envolvidos no projeto sobre o assunto *dicing saw*.

O laboratório LTC-USP reúne trabalhos nas áreas de projeto de equipamentos e manufatura com materiais cerâmicos e compósitos. O Departamento de Engenharia Mecânica tem dezenas de publicações nas áreas de corte de materiais frágeis utilizando ferramenta de ponta única de diamante e retificação. O Laboratório de Processos de Fabricação está equipado com máquinas ferramentas universais de alta precisão, além do Laboratório de Metrologia, capaz de aferir erros de fabricação. No ambiente do campus São Carlos – USP existe à disposição equipamentos tais como: microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia óptica. Foi necessário o uso da infraestrutura do DEMA / UfsCar para o tratamento térmico da estrutura. Treze itens foram verificados e documentados na tabela 10 no APÊNDICE B.

Na segunda frente foi feito um levantamento de cursos relevantes para o desenvolvimento desse projeto: cursos sobre *dicing saws* (operação e manutenção), sistemas servo-acionados e projeto de máquinas de precisão.

O curso sobre operação e manutenção foi oferecido pela DISCO HI-TECH AMERICA, INC. Sistemas servo acionados foi oferecido pela DELTA TAU Data Systems, INC. e Yaskawa do Brasil LTDA. O curso de projeto de máquinas de precisão foi oferecido pela Pós-graduação da EESC. Essa segunda frente está organizada na tabela 11 no APÊNDICE C.

3.1.2.3 Conclusão da análise de viabilidade

Verificou-se a viabilidade técnica e econômica da máquina. Os ganhos à tecnologia brasileira serão substanciais, visto que o projeto agrega temas como metodologias de projeto, máquinas de precisão, corte de materiais frágeis e conceitos de *dicing machine* e *dicing saw*. Formas de se elaborar o projeto, de produzir o protótipo mostram-se viáveis, tendo em vista a tecnologia e recursos

disponíveis. A avaliação do estado da arte é perfeitamente acessível, com o estabelecimento de contatos com empresas do ramo.

3.1.3 Projeto conceitual de uma mini *dicing*

Nessa etapa, várias opções de projeto de *dicing saws* foram elaboradas. A seleção dos melhores conceitos também se encontra nesse item.

O uso da análise morfológica como ferramenta para tomada de decisão apresentou um volume de idéias significativo.

3.1.3.1 Delimitação do projeto

Na concepção da mini *dicing*, foi preciso definir algumas restrições de projeto:

Não há a necessidade de o equipamento possuir resolução na escala submicrométrica, alguns décimos de micrômetros são perfeitamente aceitáveis, pois a qualidade de corte é um dos fatores mais relevantes neste estudo. A precisão dimensional da peça pode ser obtida com o uso de sistemas de movimentação mais sofisticados e mais caros. Acurácia e repetibilidade são erros que podem ser minimizados com a seleção adequada de fusos, acoplamentos, guias lineares e o sistema de movimentação (motores e drives).

A opção inicial foi o uso de um sistema de movimentação comercial. Esse foi o primeiro conceito gerado, no entanto, em meio a reuniões de grupo, verificou-se um novo conceito: as opções de construir o sistema de movimentação.

O interesse é fatiar substratos quadradas de até 100 x 100 mm, com espessura de até 10 mm. O *spindle* deve possuir capacidade de giro de 30.000 rpm e admitir discos abrasivos de até 4 polegadas.

Cada peça cortada tem duas dimensões, portanto, o equipamento deve ter pelo menos dois graus de liberdade quando se fala de posicionamento da peça a ser cortada. Mais um grau de liberdade para ajuste da profundidade de corte e um giro na mesa para cortes perpendiculares na mesma fixação, totalizando quatro graus de liberdade para movimentação e posicionamento.

3.1.3.2 Quadro morfológico

Nessa etapa, foi usada uma ferramenta de geração de novos conceitos: a análise morfológica. Na seleção dos melhores conceitos foi usado o procedimento de tomada de decisão citado em 3.1.

O procedimento explica que a seleção da melhor opção se dá em vista dos recursos, demanda ou algum outro fator de relevância. No caso deste projeto, são: materiais usados, formato da estrutura, deformações aceitáveis, custos de matéria prima, custo e facilidade de fabricação.

O quadro 3 resume as funções mais relevantes do projeto (coluna) contra as possíveis soluções empregáveis (linha). O caminho traçado pela linha tracejada vermelha indica as soluções selecionadas pelos critérios adotados, gerando um conceito satisfatório à demanda identificada em 3.1.1.

- **Movimentação** – Optou-se por um equipamento capaz de movimentação X, Y, Z e Θ . Essa é a movimentação possível da maioria das *dicing saw* industriais. Conceber um equipamento com menor capacidade fica aquém dos objetivos de projeto. Uma máquina capaz de movimentação em três direções aumenta o número de variáveis de controle, como: profundidade de corte, distância de um corte ao outro, outros, podendo ser elaborado estudos mais detalhados e que contribuam mais no estudo do processo de corte abrasivo de materiais frágeis. A movimentação angular em Θ também se faz relevante o bastante para 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 com bom perpendicularismo.
- **Material da estrutura** – A escolha do material adequado tem grande relevância. Máquinas de precisão trabalham com diferentes concepções. Tradicionalmente, estruturas de máquinas convencionais ou de precisão são feitas em ferro fundido, que passou por processo de cementação, normalização ou envelhecimento secular. Uma segunda opção é fabricação da estrutura em chapas de aço soldadas (KOENIGSBERGER, 1978). Existem também alguns projetos que admitem a estrutura em granito sintético.

Análise Morfológica – Mini-máquina de corte de substrato de materiais frágeis						
Movimentação	XY	XYZ	XYZ θ			
Material da estrutura	• Aço-SAE 1020	Aço SAE 1045	Aço inox	Alumínio	Granito Sintético	Ferro Fundido
Forma da estrutura	“L” parafusado	• “C” simétrico	Ponte	XYZ θ com <i>spindle</i> estacionário		
Material mesas X, Y e Z	Aço SAE 1020	Aço SAE 1045	• Aço inox	Alumínio	Granito Sintético	Ferro Fundido
Material macais	Aço SAE 1020	Aço SAE 1045	Aço inox	• Alumínio	Granito Sintético	Ferro Fundido
Rolamentos eixo X	Esfera simples	• Alto compensador	Rolete			
Rolamentos eixo Y	Esfera simples	• Alto compensador	Rolete			
Rolamentos eixo Z	Esfera simples	• Alto compensador	Rolete			
Guias eixo X	• Guias lineares com patins de esfera	Guias lineares com patins de roletes	Guias cilíndricas			
Guias eixo Y	• Guias lineares com patins de esfera	Guias lineares com patins de roletes	Guias cilíndricas			
Guias eixo Z	• Guias lineares com patins de esfera	Guias lineares com patins de roletes	Guias cilíndricas			
Fuso eixo X	Esfera recirculante	Esfera simples	• Esfera recirculante com malha	Esfera sem malha	• Barra roscada com bucha de latão	Barra roscada com bucha de bronze
Fuso eixo Y	Esfera recirculante	Esfera simples	Esfera recirculante com malha	Esfera sem malha	• Barra roscada com bucha de latão	Barra roscada com bucha de bronze
Fuso eixo Z	Esfera recirculante	Esfera simples	Esfera recirculante com malha	Esfera sem malha	• Barra roscada com bucha de latão	Barra roscada com bucha de bronze
Eixo Theta (giro)	Motor (direto)	• Ajuste manual trava parafuso	Ajuste manual trava vácuo	Não equipar a mini máquina com theta	Redutor de precisão	
Acoplamentos	Sanfonado	Mandíbula	Rígido	• <i>Bean</i>		
Parafusos	Sextavado	• Allen	Fenda			
Cabeçote	Aerostático	• Rolamento	Hidrodinâmico			
Sistema de movimentação (Drives + Controlador + Motores)	YASKAWA	BOSCH	DELTA τ	• CNC 3AX + motores KALATEK + PC		

Quadro 3 – Análise morfológica da minimáquina.

Tomando como referência o que foi exposto por Koenigsberger (1978), opta-se por adotar o aço 1020 como o material da estrutura. Essa decisão foi tomada em conjunto com a forma da estrutura (próximo item), pois está diretamente relacionada à facilidade de usinagem e construção da máquina, gerando uma economia considerável. Além disso, as características estruturais do aço ABNT 1020 não são tão distantes dos aços de alto carbono. As peças foram cortadas em sistema de oxi-acetileno, com 5mm de sobremetal. O aço ABNT 1020, após o corte, não tem sua superfície endurecida em excesso pelo resfriamento.

O uso do aço inoxidável se faz inviável devido ao alto custo e dificuldade de usinagem e soldagem. O alumínio, na sua composição comercial mais comum e econômica, não é muito recomendado na aplicação de estruturas de máquinas de precisão, pois apresenta módulo de elasticidade relativamente pequeno e alto coeficiente de expansão térmica. O ferro fundido implicaria numa estrutura maior e mais cara, pois incluiria o processo de fundição da estrutura além do custo do material. O quadro a seguir resume este estudo de caso:

Quadro comparativo entre materiais para a estrutura da máquina (fonte: NORTON, 2006)						
Material da Estrutura	Aço SAE 1020	Aço SAE 1045	Aço inox (302)	Alumínio	Granito Sintético	Ferro Fundido (cinzento classe 20)
Resistência máxima à tração	379 MPa (laminado quente)	565 MPa (laminado quente)	621 MPa (chapa recozida)	159 MPa (fundido em molde permanente)	-	152 MPa
Resistência ao escoamento	207 MPa (laminado quente)	310 MPa (laminado quente)	276 MPa (chapa recozida)	62 MPa (fundido em molde permanente)	-	-
Usinabilidade	Fácil	Difícil	Difícil	Fácil	Difícil	Fácil
Solda	Fácil	Fácil	Fácil	Difícil	-	Fácil
Observações	Após o corte com maçarico, não tempera ao ar.	Após o corte com maçarico, tempera facilmente, dificultando a usinagem	Muito duro, dificultando a usinagem	Muito mole e com propriedade pouco atrativas para a aplicação	Necessita de etapas de preparação muito longas, como: preparação dos insertos, do molde, da massa. Tempo de secagem e retirada do molde. Por fim, usinagem de acabamento	A peça equivalente será muito grande quando comparada ao aço.

Quadro 4 – Materiais da estrutura.

- Forma da estrutura - Observando as estruturas das *dicing saw* comerciais é possível concluir que não existe um padrão a ser seguido. Tomando como exemplo a DAD3350 da DISCO CORPORATION ou a MicroAce da LOADPOINT LIMITED, que podem ser entendidas como máquinas de mesmas características operacionais, não existe quase nenhuma similaridade estrutural. A DAD3350 usa estrutura tipo “ponte” (Figura 2.23 a) e a MicroAce tem o *spindle* em balanço, portanto, estrutura em “L”.

O tipo de estrutura, nomeada neste projeto como: estrutura em “L” é citada por Slocum (1992) como uma estrutura de grande volume de trabalho, ideal para pequenas máquinas, porém com grande dificuldade de fabricação. Se adotada, essa estrutura seria fabricada em duas partes parafusadas ou soldadas. Mesmo que soldada, não há uma continuidade estrutural, fator de grande influência na rigidez da máquina (KOENIGSBERGER, 1978).

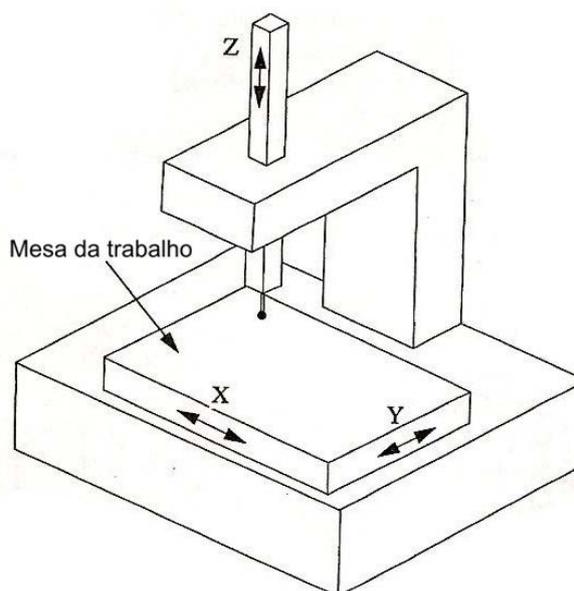


Figura 3.3 – Estrutura em “L” (SLOCUM, 1992).

Slocum (1992) recomenda o uso de estrutura do tipo ponte para aplicações de precisão devido à divisão dos esforços em dois pontos de apoio. Porém, o tamanho da estrutura limita o volume de trabalho, influenciando sua escolha até mesmo em questões de operação na mesa de trabalho.

Este projeto tem forte conotação inovadora, além da característica miniaturizada e compacta do equipamento. Este tipo de estrutura é interessante, todavia muito grande e de alto custo.

A estrutura tetragonal, usada por máquinas como a PicoAce da LOADPOINT LIMITED, é imensamente estável e admite grandes esforços de usinagem em diferentes direções, mas é algo que não se aplica ao projeto, pois o corte é unidirecional.

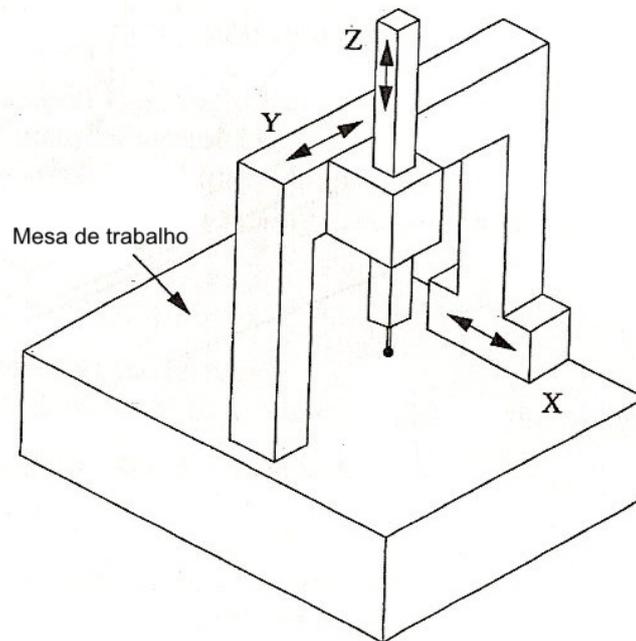


Figura 3.4 – Estrutura tipo Ponte (SLOCUM, 1992).

Uma estrutura com *spindle* estacionário gera uma boa área de trabalho (envelope de trabalho ou volume de trabalho para a ferramenta), porém é necessária uma construção um pouco mais sofisticada. Uma mesa de altura regulável é perfeitamente projetável e fabricável, apesar disso seria um dispositivo relativamente grande quando comparado ao que outras arquiteturas podem oferecer.

O Quadro 5, resume esses levantamentos.

Estrutura da máquina <i>dicing</i>				
Arquitetura da estrutura	"L" parafusado (SLOCUM, 1992)	"C" simétrico	Ponte	XYZ Θ com <i>spindle</i> 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	Simples.	Simples.	Limitada .	Simples.
Fabricação	Complicada, pois deve haver um casamento entre o "L" e o resto da estrutura.	Simples, 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 do 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.	<i>Spindle</i> estático, delimitando problemas de geometria de corte apenas ao sistema de movimentação.

Quadro 5 – Estrutura da máquina *dicing*.

- Material Mesas X, Y e Z – O conceito admitido pelo grupo de projeto, durante esse trabalho, sobre uma mesa de movimentação, é de um mecanismo formado por guias e patins, um mecanismo de acionamento tipo fuso de esferas recirculantes e a mesa de movimentação ou carro. Normalmente, a mesa de movimentação é fabricada em alumínio. No entanto, a escolha da melhor opção de material para as mesas seguiu alguns critérios.

Máquinas de corte trabalham com água para refrigeração e lubrificação do corte, portanto, a fim de evitar possíveis problemas de oxidação devido à alta umidade e também, inconvenientes relacionados à falta de rigidez, optou-se pelo uso de aço inoxidável em praticamente todas as mesas. Um conceito que foi amplamente questionado foi o uso de um material de menor rigidez

que pudesse passar por um tratamento superficial que evitasse possíveis oxidações, no entanto, foi abolido em vista dos grandes benefícios que o aço inoxidável oferece.

- Material dos Mancais – A diversidade muito grande de materiais na máquina não é algo interessante. Diferentes coeficientes de dilatação podem gerar folgas, mesmo que pequenas. Porém, no caso do alojamento dos mancais de junção e apoio do sistema de transmissão (fuso - motor) não foi detectado nenhum grande problema. Portanto, trabalhando na redução dos custos do projeto, optou-se por mancais de alumínio.
- Mancais de rolamento eixo X, Y e Z – Os mancais de rolamento projetados para os eixos X, Y e Z são todos esféricos de contato angular, pois quando montados um contra o outro (configuração em “O”), eliminam folgas axiais. Esse projeto já foi usado anteriormente e com sucesso por trabalhos realizados no LTC.
- Guia eixos X, Y e Z – Optou-se por guias lineares com patins de esferas recirculantes, pois são guias de precisão e de custo relativamente baixo. Além disso, os esforços não são exagerados, não demandando o uso de patins de roletes. Nem ao menos existem grandes solicitações transversais à guia linear, fato que abriria questionamentos ao uso de guias cilíndricas. Mancais de escorregamento, neste caso, são mais caros, tanto no aspecto construtivo, quanto no seu funcionamento, que exigiria o uso de um motor de maior potência, tendo em vista a maior área de contato e atrito.
- Fusos dos eixos X, Y e Z – O passo do fuso, com a resolução do motor (passo / servo) e acoplamento definem a resolução sistema de movimentação (SLOCUM, 1992).

$$\text{Resolução} = \frac{\text{Passo do fuso}}{\text{Número de pulsos do motor}} \quad (21)$$

Segundo Slocum (1992), a resolução é a menor mudança de posição possível que um equipamento pode realizar ou que o seu sistema de controle pode perceber. Existe a resolução mecânica e a resolução do sistema de movimentação (associada aos motores e à eletrônica do sistema de movimentação).

Existem mais dois termos muito relevantes para máquinas de precisão, que definem erros de posicionamento, são definidos por Slocum (1992):

- Acurácia (*Accuracy*): também conhecido como exatidão, é a habilidade do equipamento em alcançar uma posição no espaço. É o erro entre o ponto de interesse (programado) e o ponto atingido.
- Repetibilidade (*Repeatability*): também conhecido como precisão, é a habilidade do equipamento em retornar a uma posição previamente alcançada (nuvem de pontos ao redor do ponto 1 ou do ponto 2).



Figura 3.5 – Definição de resolução, acurácia e repetibilidade (SLOCUM, 1992)

O interesse do projeto é de um equipamento de precisão. Segundo a Figura 2.10, uma máquina considerada de precisão trabalha produtos na faixa de 5 a 0,5 μm . Considerando que não haja perdas de tolerância pelo disco de corte (flexão do disco, inclinação, outros) é perfeitamente recomendável o uso de fuso de esferas pelas suas características de resolução (passo), acurácia e repetibilidade (folgas na castanha). Porém, seu custo é alto (Tabela 2), o que tornou sua aplicação, no momento, inviável. O uso de barra roscada com bucha de latão ou de bronze é uma boa opção. Esse dispositivo tem o inconveniente de desgaste rápido, dependendo do grau de esforço sobre os

fios de rosca e velocidade de acionamento e maior torque requerido, devido ao atrito, porém atende bem às necessidades do protótipo.

- Eixo Θ - As opções sugeridas para esse dispositivo foram extremas, partindo do não uso do eixo, até o uso de um motor, o que implicaria no emprego de mais um motor ligado ao sistema de movimentação. Esta última opção foi descartada pelo alto custo. A primeira também foi eliminada por resultar num equipamento limitado em relação às direções de corte. O ajuste manual com fixação por vácuo é pouco preciso. O uso de um redutor de precisão encareceria mais ainda o sistema, mesmo que acionado manualmente. A melhor opção se mostrou no ajuste indexado da mesa. A grande maioria das aplicações se restringe a cortes ortogonais. Um ajuste fino na angulação é aplicado no alinhamento do corte com a parede do substrato, ou com os componentes montados sobre o substrato. Neste projeto, foi decidido que o alinhamento fosse feito com o reposicionamento manual do substrato sobre a mesa, fixando a peça a ser cortada junto a mesa, através de vácuo. Esse fato facilitou em muito o projeto no aspecto técnico e econômico, pois esse dispositivo foi resumido em apenas uma mesa giratória indexada em ângulos de 90° .
- Acoplamento - Para aplicações de movimentação com precisão, nos dois sentidos de giro (horário e anti-horário), a prática recomenda o uso de acoplamentos do tipo sanfonado. A faixa de torque transmitida é bem abrangente para este modelo. No caso do acoplamento *bean*, fabricados em alumínio, têm-se o ganho no custo, de R\$ 159,00 (sanfonado) para R\$ 59,00, para a mesma faixa de torque e dentro da faixa de trabalho do nosso equipamento.

Acoplamentos tipo mandíbula são para transmissão de alto torque, como bombas hidráulicas, perfuratrizes, outros, além disso, apresentam alta histerese na inversão de rotação. O acoplamento rígido demanda usinagem de fabricação de altíssima precisão ou com ajustes, o que não se aplica nesse projeto.

- *Spindle* – Cabeçotes de corte equipados com mancais aerostáticos são os mais recomendados pela literatura, devido à alta rigidez e rotação (SLOCUM, 1992), porém, são equipamentos de alto custo. Cabeçotes com mancais hidrodinâmicos, apesar de alta rigidez, trabalham com baixa rotação. A melhor opção para o projeto do protótipo foi o uso de um cabeçote com mancais de rolamento, já existente no LTC da EESC com capacidade de 45.000 rpm.
- Sistema de movimentação – A possibilidade de se desenvolver um sistema de movimentação nas dependências do LTC, talvez tenha sido o principal fator de sua escolha. Apesar dos demais sistemas serem de alta qualidade, um sistema mais simples, acessível, que envolvesse um maior número de pessoas e difundisse o conhecimento foi o mais interessante.

3.1.3.3 Conceito

O período de geração de ideias foi farto de possíveis conceitos a serem adotados, principalmente nos aspectos de melhor combinação dos eixos (Figuras 3.6 a e b) chegando por fim no conceito de movimentação no plano horizontal XY e Θ (giro), completando o volume de trabalho com Z na vertical (Figura 3.6 c).

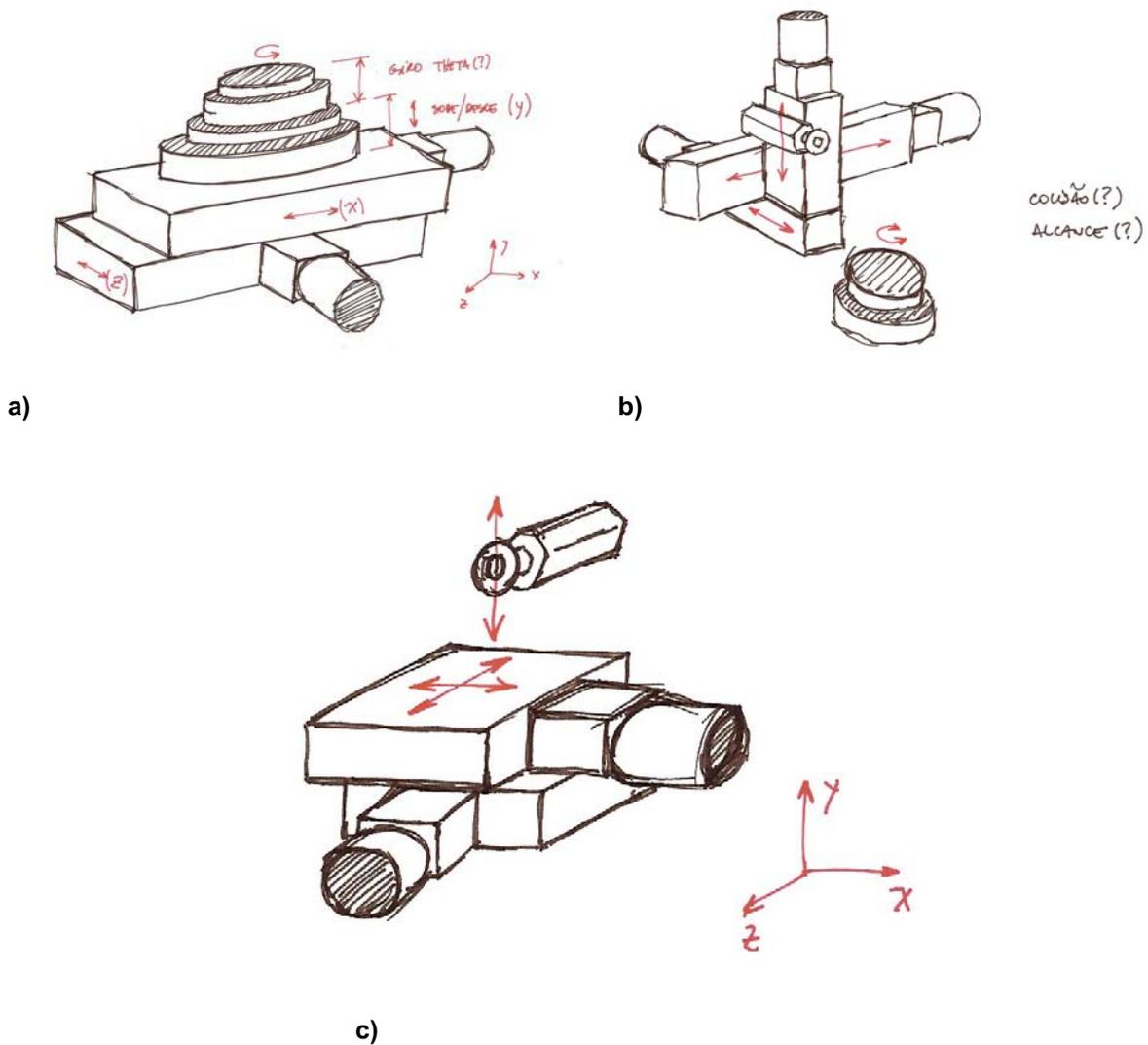


Figura 3.6 – Ideias sobre organização da movimentação dos eixos. Em a) movimentação XYZ e Θ no mesmo conjunto de mesas. Em b) movimentação XYZ em um conjunto e Θ na mesa. Em c) movimentação no plano horizontal (ZX) e vertical (Y), faltando o giro Θ .

O formato da estrutura foi um processo intenso de estudo de antigos conceitos e novas ideias (Figura 3.7)

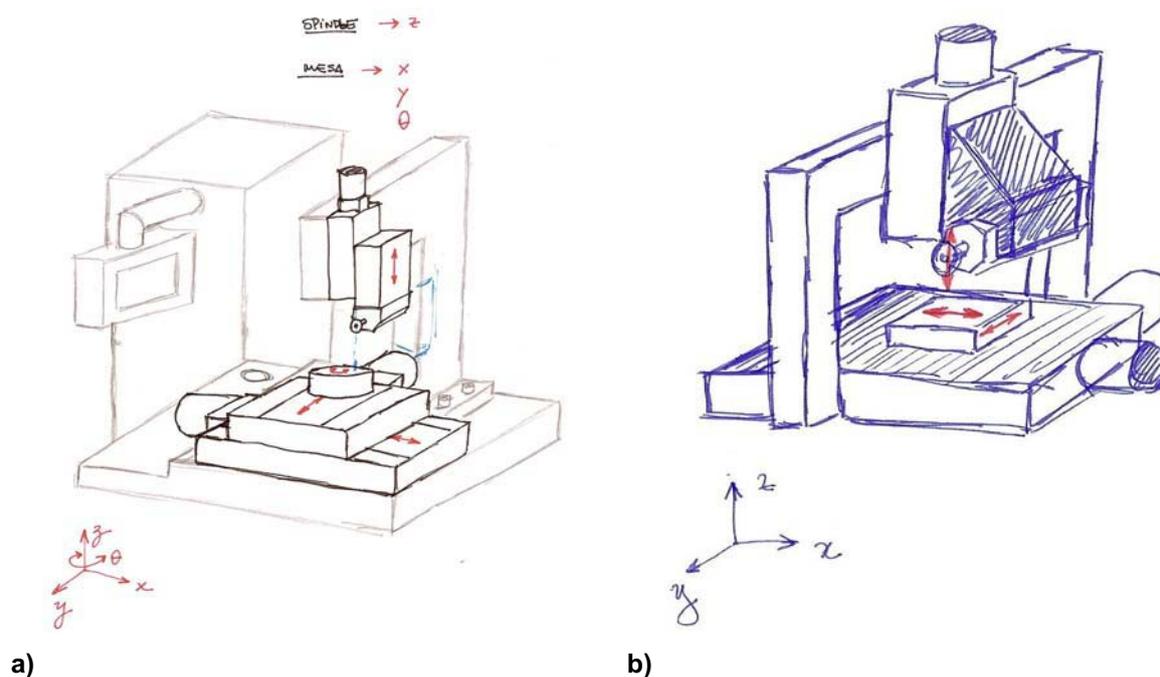


Figura 3.7 – Conceitos de minimáquinas de corte. Em a) estrutura em “L”. Em b) tipo ponte.

Chegando por fim no conceito adotado para esse projeto: Figura 3.8.

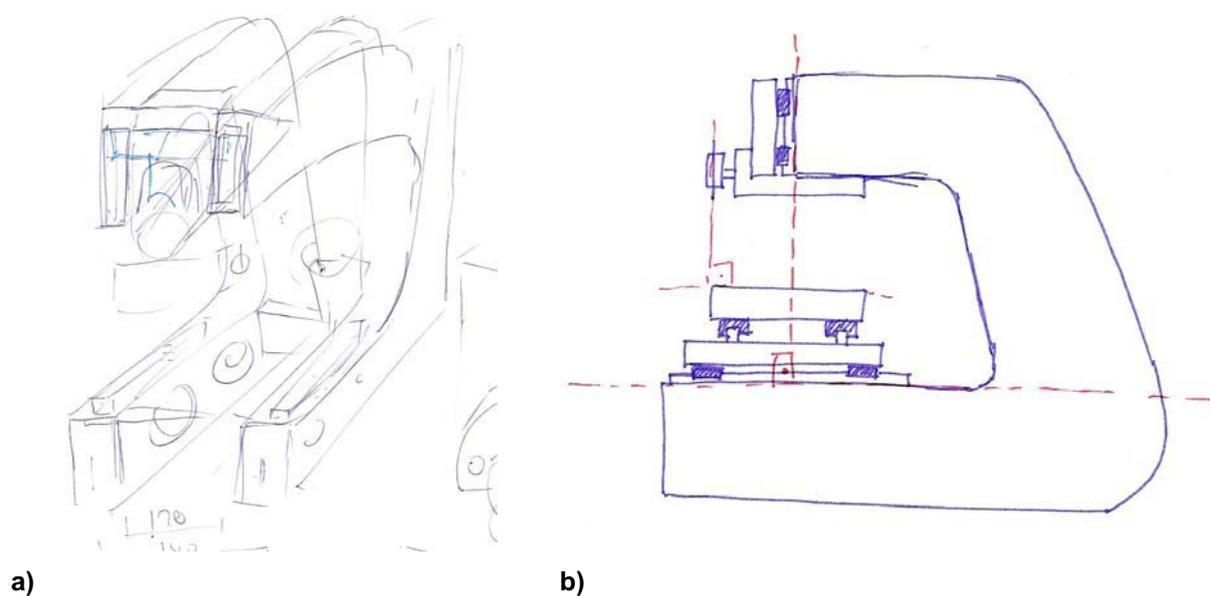


Figura 3.8 – Conceito escolhido para o projeto do protótipo de uma minimáquina de o corte de substratos de materiais frágeis. Em a) primeira ideia. Em b) evolução da ideia.

Foi tomada a decisão por este conceito partindo dos seguintes princípios:

- A estrutura não possui uniões por parafusos;

- Os trilhos são montados diretamente na estrutura, reduzindo o número de peças e melhorando a acurácia;
- A face de montagem do eixo Z foi usinada na mesma fixação que do eixo Y (aonde as guias foram assentadas), garantindo o mínimo de perpendicularismo;
- A estrutura conta com apenas um superfície de referência e duas funcionais, facilitando significativamente a usinagem.

3.1.4 Projeto Preliminar

Essa etapa consiste do detalhamento do melhor conceito selecionado. Usando a análise morfológica (Figura 3.1) como orientadora na especificação dos itens de projeto, foi possível organizar o memorial de projeto da seguinte forma:

- Projeto das mesas: as informações selecionadas nos itens de materiais das mesas X, Y e Z, mancais, rolamentos, guias (eixo X, Y e Z), fusos (eixo X, Y e Z), eixo Θ , acoplamentos, sistema de movimentação e graus de liberdade, são base para o projeto e seleção do sistema de movimentação completo (mecânico e eletrônico);
- Projeto da estrutura da minimáquina: esse tópico aglutina o que foi discutido em movimentação, material da estrutura, forma da estrutura e *spindle*;
- Conjunto montado

A opção de iniciar o projeto preliminar pelo projeto das mesas se dá pelo fato de que as informações geradas são de extrema relevância no volume de trabalho da minimáquina. Um volume de trabalho grande implica em uma estrutura grande, o mesmo para um volume pequeno, portanto o projeto das mesas define, em parte, o dimensional da estrutura.

3.1.4.1 Projeto das mesas

Para o relato dos procedimentos de dimensionamento, torna-se conveniente dividir esse item em: guias lineares, fusos, mancais e sistema de movimentação.

3.1.4.1.1 Guias Lineares

Guias lineares serão usadas na movimentação das mesas que constroem o volume de trabalho. A minimáquina deveria ter a capacidade de cortar peças de 100 x 100 x e até 10 mm de altura como definido na delimitação do projeto. Nestas condições, o comprimento de cada guia linear deveria ser:

$$L_{gl} = L_{cl} + L_{tp} + L_{dp} \quad (22)$$

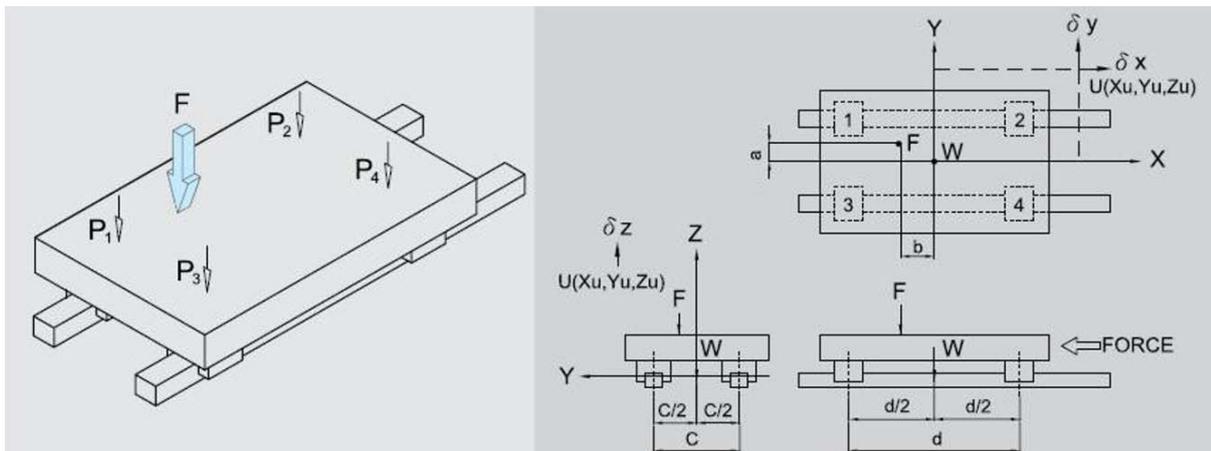
Sendo:

L_{gl}	-	Comprimento da guia linear;
L_{cl}	-	Comprimento curso livre;
L_{tp}	-	Comprimento total patim;
L_{ep}	-	Comprimento entre patins.

O L_{tp} depende do patim escolhido.

A referência para o dimensionamento das guias e patins das mesas está baseada no esforço de corte. Segundo o artigo de Kim et al. (2007), as forças tangenciais tendem a ser maiores em baixas rotações (V_s) e altas velocidades de avanço (V_w). Na velocidade de rotação de 12.000 rpm, velocidade de avanço de 15mm/s e nas dadas condições de corte do artigo citado, haverá força tangencial de até 1N. A força normal chegaria até 2N e F_z até 2,24N, nas dadas condições. Com base nesse estudo é possível perceber a grandeza dos valores de força. É evidente que o valor das forças mudará se as condições mudarem, porém valores elevados, na casa de centenas de Newtons, estão longe da realidade.

Segundo o catálogo do fabricante de guias lineares HIWIN, a montagem sugerida de quatro patins, duas guias e força aplicada no centro, estaria submetida à forças normais, transversais e momentos (em cada patim). Sendo P1, P2, P3 e P4, uma composição da força externa aplicada F , do peso próprio da placa W e dos momentos gerados a partir da força F .



a)

$$P_1 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d}$$

$$P_2 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} + \frac{F \cdot a}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d}$$

$$P_3 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a}{2c} + \frac{F \cdot b}{2d}$$

$$P_4 = \frac{W}{4} + \frac{F}{4} - \frac{F \cdot a}{2c} - \frac{F \cdot b}{2d}$$

b)

Figura 3.9 – Segundo o manual de guias lineares e patins da HIWIN, a) a montagem horizontal de quatro patins sob a mesa deve adotar patins que suportam a b) carga P (1, 2, 3 e 4) segundo as equações citadas.

Para W (peso da própria mesa) aproximadamente 100N e F (força aplicada proveniente do corte, portanto Fz) aproximadamente a 10N, termos:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = 25 + 2,5 = 27,5N$$

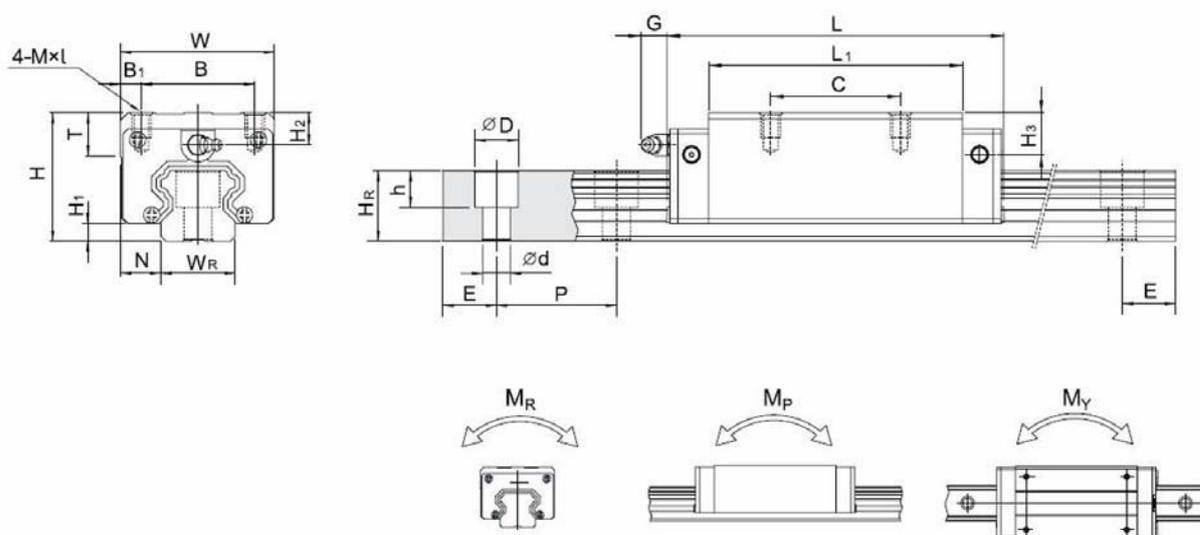
A carga em cada conjunto de movimentação (X e Y) aplicaria sobre cada patim uma carga de aproximadamente de 2,8 kg. Esse valor é muito baixo em comparação à capacidade da menor guia linear e patim do catálogo, seja carga dinâmica ou estática. No entanto, aspectos de rigidez e estética ainda não foram considerados nessa seleção. O dispositivo selecionado foi o de menor capacidade. O modelo é: HGH 15CA (Figura 3.10).

Os valores adotados poderiam ser mais pessimistas e mesmo assim existe margem para excessos.

Portanto $L_{tp} = 66,7$ mm.

O L_{ep} é a distância entre patins. Não existe uma regra exata para esse tipo de dimensionamento. O interesse é evitar estruturas em balanço, evitando submeter os trilhos à força de flexão. O tamanho da peça a ser cortada é uma área de 100 x 100 mm, assim a mesa de corte deve ter pelo menos essa dimensão. Porém, a colocação de dois patins HGH 15CA em série no mesmo trilho supera essa medida. Parte dos patins ficaria à mostra. Seria uma situação técnica e esteticamente inviável. Portanto, o tamanho da mesa de corte foi aumentado proporcionalmente para 145 x 145 mm ($L_{cl} = 140$ mm), aumentando o volume de trabalho. O L_{ep} adotado foi de 20 mm. É interessante observar que os bicos de engraxar estarão à mostra, facilitando futuras manutenções.

(1) HGH-CA / HGH-HA



Model No.	Dimensions of Assembly (mm)		Dimensions of Block (mm)										Dimensions of Rail (mm)						Mounting Bolt for Rail (mm)	Basic Dynamic Load Rating C (kN)	Basic Static Load Rating C _s (kN)	Static Rated Moment			Weight				
	H	H ₁	N	W	B	B ₁	C	L ₁	L	G	Mxl	T	H ₂	H ₂	W _R	H ₂	D	h				d	P	E	M _Z (kN-m)	M _P (kN-m)	M _Y (kN-m)	Block (kg)	Rail (kg/m)
HGH 15CA	28	4.3	9.5	34	26	4	26	39.4	61.4	5.3	M4x5	6	8.5	9.5	15	15	7.5	5.3	4.5	60	20	M4x16	11.38	25.31	0.17	0.15	0.15	0.18	1.45

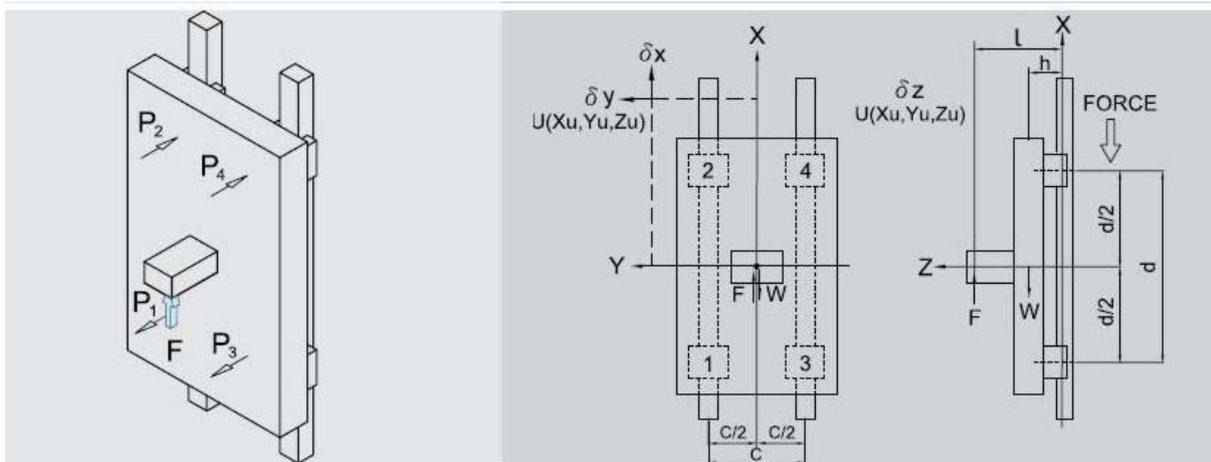
Figura 3.10 - Trilho e patim selecionado HGH – 15CA (HIWIN)

O comprimento final da guia foi:

$$L_{gl} = 140 + (2 \cdot 66,7) + 20 = 293,4 \text{ mm} \quad (23)$$

Para efeito de padronização de algumas medidas, foi adotado 300 mm de curso para X e Y.

O mesmo vale para o eixo Z, embora seja projetado para trabalhar na vertical, suportando esforços de corte e o peso do *spindle*. (Figura 3.11)



a)

$$P_1 \sim P_4 = -\frac{W \cdot h}{2d} + \frac{F \cdot l}{2d}$$

b)

Figura 3.11 - Cálculo da força aplicada em cada patim na vertical HIWIN. Em a) diagrama de montagem e distribuição de forças. Em b) a expressão que define os esforços P (1, 2, 3 e 4).

O peso de um *spindle* está em torno de 4 à 6kg. Os esforços de corte foram adotados em torno de 10N, resultando em baixa carga por patim e seleção do mesmo modelo de guias lineares e patins.

O conjunto Z deveria ter um curso livre de pelo menos 10 mm para um disco de 4". Os primeiros desenhos mostraram que o curso era muito pequeno, correndo o risco de colisões do disco durante sua movimentação. O curso foi acrescido de 10mm, melhorando consideravelmente a estética e a segurança. Os trilhos foram projetados para o comprimento de 180 mm.

Como se trata de esforços pequenos, a espessura da chapa não demanda o desenvolvimento de cálculos, no entanto, a falta de bom senso pode abrir espaço, principalmente, para problemas de amortecimento e vibrações. A espessura das chapas que formam as mesas ficou definida como de 10 mm, não se levando em conta recortes de montagem para os patins e guias lineares. A montagem desses

dispositivos também pode ser encontrada no catálogo da Figura 3.12 a. A Figura 3.12 mostra o assentamento das guias.

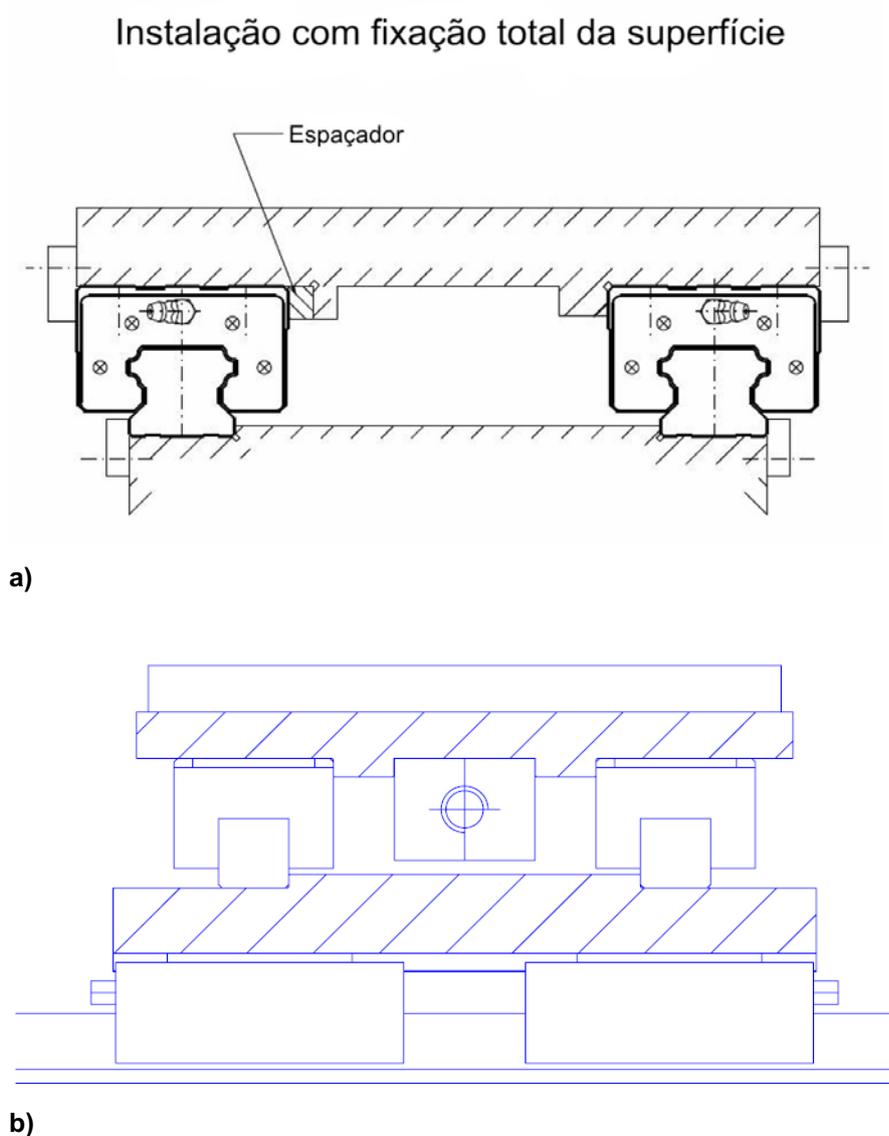


Figura 3.12 - Montagem dos patins e guias lineares HIWIN. Em a) montagem sugerida e em b) montagem projetada.

O projeto inicial previa algo parecido com a sugestão de montagem do manual HIWIN. Porém, nesse projeto houve um acúmulo de experiências em projetos anteriores do LTC, que revelaram algumas melhorias no processo de montagem dos patins. Essa alteração de projeto aconteceu na fase de fabricação, justificando os *feedbacks* de informação sugeridos pela estratégia de projeto proposta na Figura 3.1. A alteração será apresentada na Figura 3.24 deste capítulo.

Neste projeto, foi decidido o uso de vidros como superfície de sacrifício e montagem do material. O uso do vácuo é muito usado na usinagem de precisão. Segundo König et al.(1991), placas de fixação em máquinas de ultraprecisão, como tornos, devem:

- Suportar a peça com pouca ou nenhuma deformação ou distorção;
- Facilidade de manuseio;
- Proporcionar fácil montagem e desmontagem de peças;
- Permitir a centragem do eixo-árvore, da máquina e da peça;
- Proporcionar ajuste de balanceamento para peças que não têm simetria rotacional.

Neste projeto, não se aplicam algumas das características citadas, porém, várias delas são convenientes, como: facilidade de montagem e desmontagem e suportar a peça sem qualquer deformação, proporcionar alinhamento da peça a ser cortada.

König et al. (1991), ainda sugere que, fixação de peças em um único ponto, três pontos e pinças, geram tensões localizadas nas peças a serem trabalhadas. O embutimento e as placas de vácuo são boas opções por gerarem boa fixação e tensões distribuídas.

Este trabalho junta essas duas técnicas, criando um procedimento de preparação da peça quando cortada. Esse procedimento consiste em embutir ou colar o material a ser cortado sobre uma folha de vidro, grande o bastante para sobrepor toda a mesa de corte que fixa o vidro por meio de vácuo.

O projeto de placas de vácuo também é sugerido por König (1991) com a seguinte configuração, Figura 3.13.

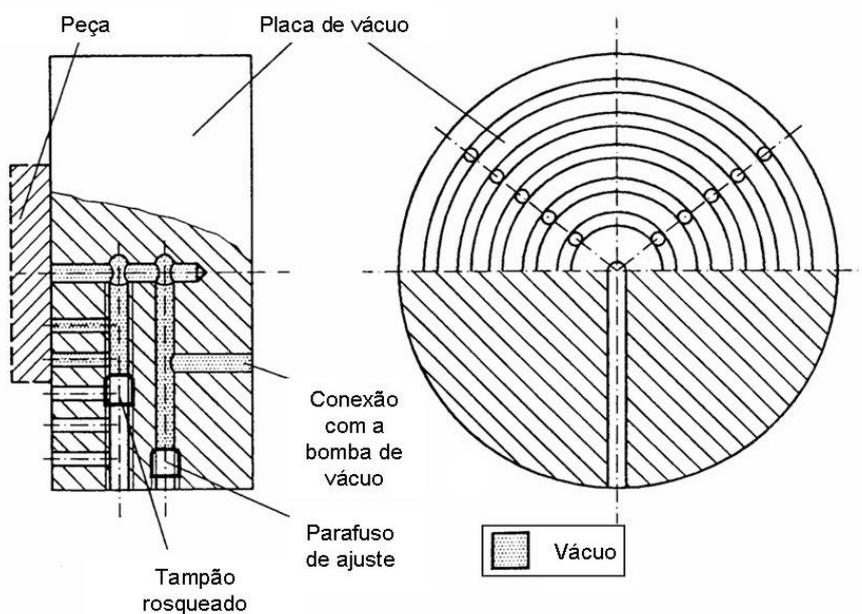


Figura 3.13 - Princípio de uma placa de vácuo (KÖNIG et al., 1991)

Dependendo da folga no contato das superfícies e da espessura da peça montada, podem ocorrer grandes distorções na superfície a ser usinada. Para minimizar este problema, pode-se trabalhar com menos vácuo.

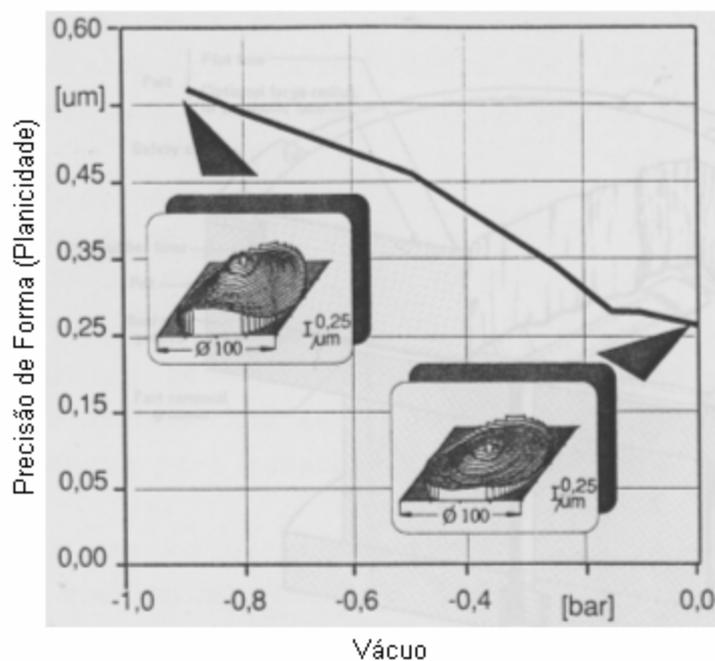


Figura 3.14 - Distorções devido às forças geradas pela placa de vácuo (KÖNIG et al, 1991)

3.1.4.1.2 Fusos

No projeto conceitual, houve muita discussão sobre que tipo de fuso adotar. O custo de um fuso de esfera é alto, superando o orçamento previsto. Considera-se ainda que o eixo Y, que incrementa os cortes, deve ter precisão e pouca folga. O eixo X, responsável pelo avanço de corte, não precisa de precisão de posicionamento, mas sim, movimentação contínua e sem ruído. O eixo Z, responsável pela penetração do disco de corte deve transpassar o material e penetrar na superfície de sacrifício, não havendo a necessidade de precisão de posicionamento. Conclui-se que, apenas o eixo Y, necessariamente deve ser um fuso de esferas recirculantes. Os demais também podem, caso haja disponibilidade econômica. Como se trata de um protótipo, não fazia sentido grande investimento financeiro. A opção adotada foi o uso de um conjunto bucha e barra roscada, conhecido como: “parafuso de força” ou “parafuso de potência”. A principal desvantagem é a baixa eficiência (entre 30 e 40%), porém, é um mecanismo perfeitamente funcional, de baixo custo, usado até hoje em alguns equipamentos. Neste projeto, foi adotada rosca métrica 10, com passo de 1,5 mm.

3.1.4.1.3 Mancais

O projeto dos mancais foi reaproveitado de trabalhos anteriores, incluí a montagem dos rolamentos esféricos de contato angular e a seleção do acoplamento (*beam*).

3.1.4.1.4 Sistema de movimentação

O sistema de movimentação adotado foi o projeto da placa CNC3AX, capaz de movimentar até três motores de passo, via controle numérico computadorizado CNC (*Computer Numeric Control*). O uso de um computador pessoal (PC) fez-se necessário no processamento, compilação e realização de tarefas. O software usado é o Turbo CNC, versão 4.01 versão gratuita. Existem hoje, softwares comerciais e livres, destinados ao controle e movimentação de diferentes tipos de máquinas CNC, comunicando-se com drives, via porta paralela. O modelo de programação mais

comum é o código G ou “G-code”. O “G-Code” confere apenas uma parte da programação do controle numérico (NC). Informações referentes ao intertravamento do equipamento, ferramentas e outros são de responsabilidade dos códigos como M, T, S, F e D.

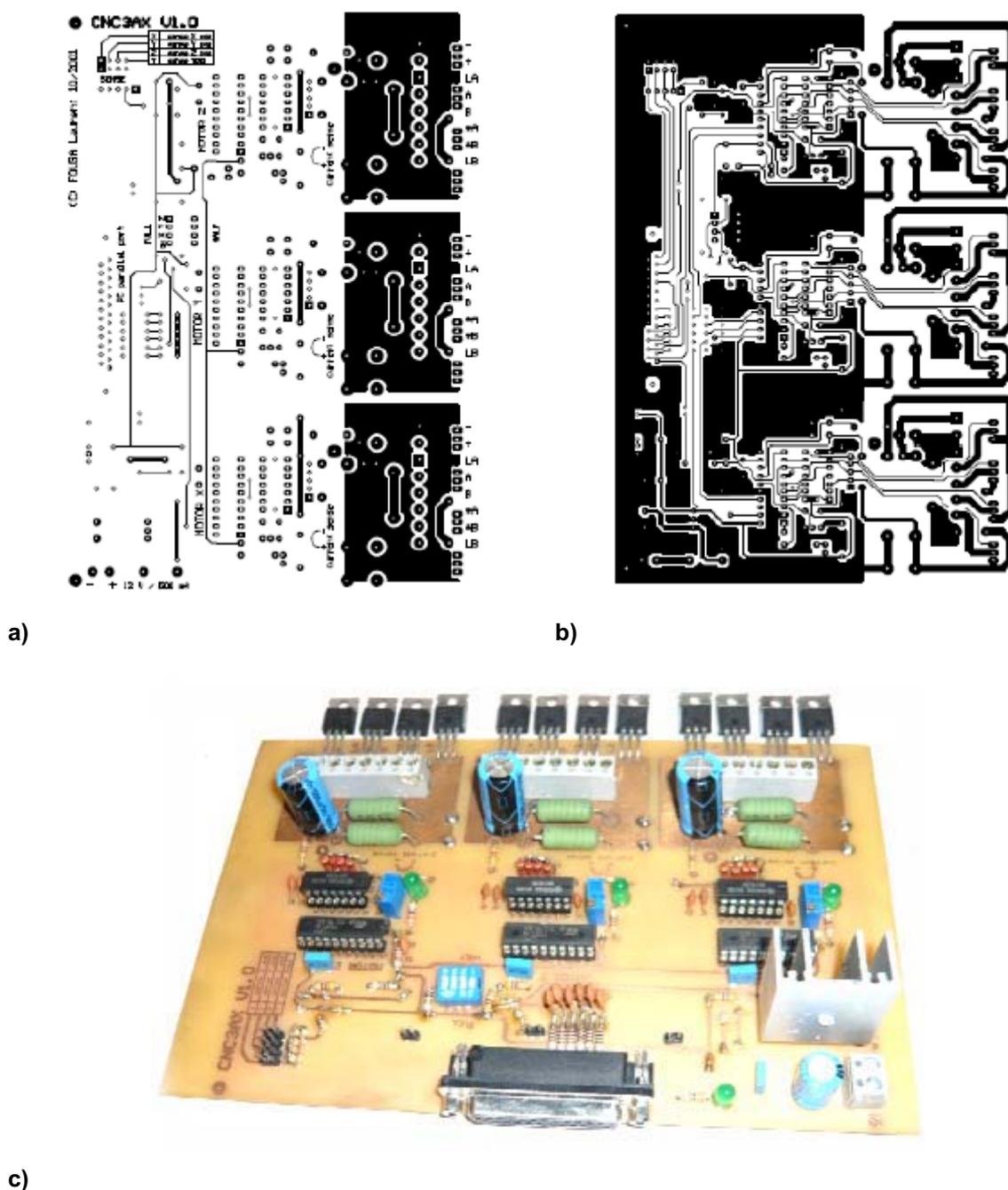


Figura 3.15 – Placa CNC 3AX, a) layout da face superior e b) layout da face inferior. Em c) a placa pronta.

A interface de controle CNC 3AX usa como elemento base o circuito integrado L297. Ele gera quatro sinais de acionamento de fase para duas fases

bipolares ou para quatro fases unipolares, com a possibilidade de acionamento do motor em meio passo ou passo normal.

3.1.4.2 Projeto da estrutura da minimáquina

A opção de estrutura selecionada foi o “C”, simétrico em aço ABNT 1020, com movimentação nas direções cartesianas X, Y, Z e Θ (apesar de Θ ter sido incluído no projeto das mesas, ele é citado nesse item, devido à sua importância no dimensionamento da estrutura).

O dimensional inicial da mesa foi contabilizado pelo volume que ocupava o conjunto de movimentação XY, mesa de corte, o *spindle* e o eixo Z.

O cálculo de deflexões da estrutura foi baseado no teorema de Castigliano. Adotando um sistema simplificado de uma chapa em “U” hiperestática (Figura 3.16), foi calculada a largura (L) da chapa com espessura de 25 mm e solicitações de 100N em três direções no ponto p. Para as dadas dimensões iniciais, a deflexão no ponto p deveria ser aproximadamente de 100nm em qualquer das 3 direções. A carga de 100N, usada no dimensionamento, foi obtida em analogia ao cálculo dos patins. A largura L é a mesma em todo o perfil.

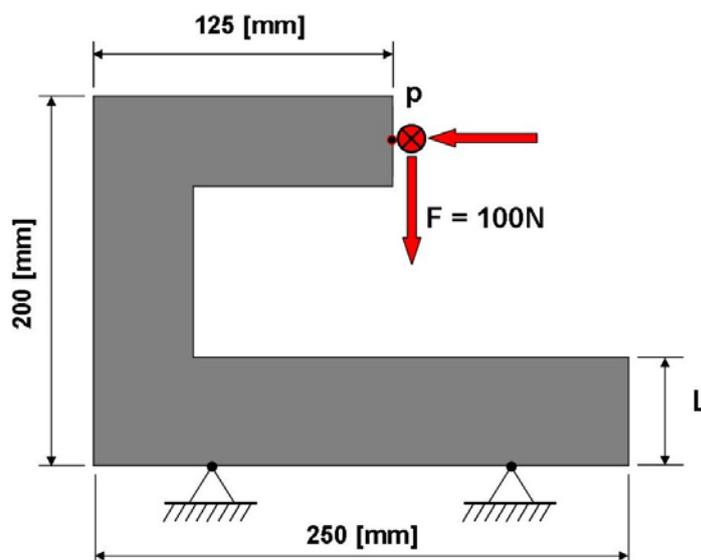


Figura 3.16 – Modelo para cálculos de deflexões.

Os cálculos indicaram que a largura L para chapas simétricas de 25 mm de espessura, nas dadas condições do modelo proposto foi de 115 mm. Além dos cálculos, as travessas foram posicionadas segundo orientações de Koenigsberger (1978) para o aumento da rigidez do equipamento.

Uma das grandes vantagens da estrutura adotada nesse projeto é a sua simplicidade dimensional. Apenas uma superfície de referência (superfície A, Figura 3.17) e duas funcionais (B e C, Figura 3.17), garantem o funcionamento preciso do equipamento.

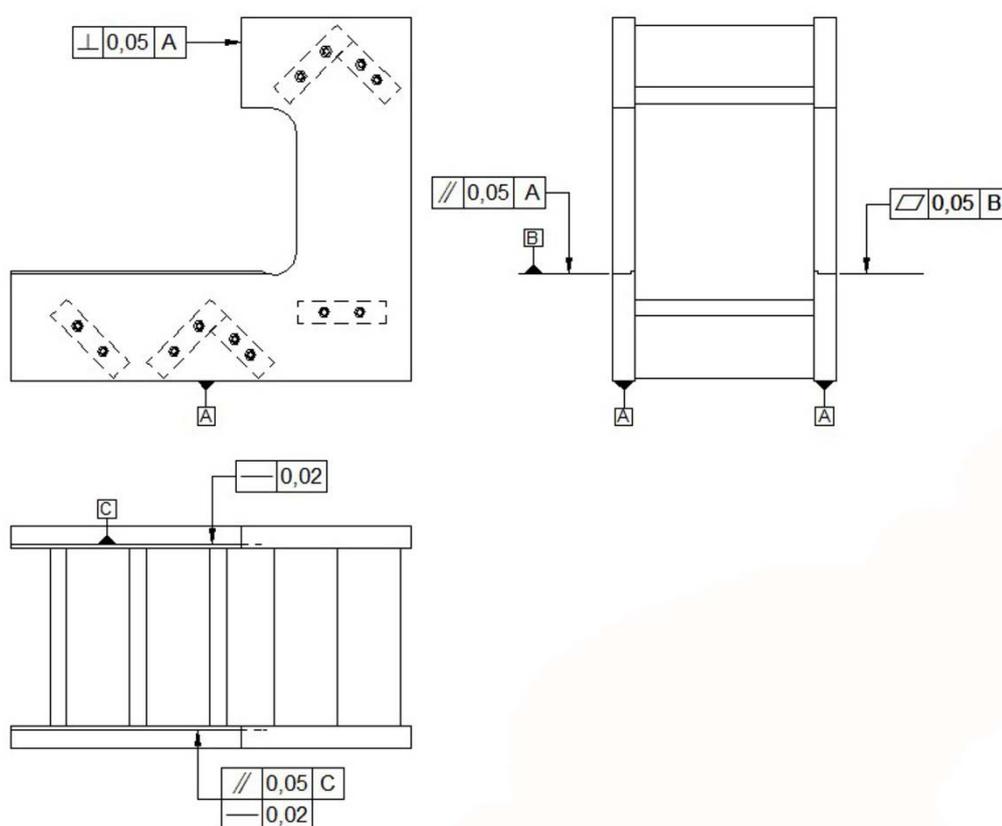


Figura 3.17 – Tolerâncias da estrutura.

3.1.4.3 Conjunto montado

O conjunto montado proposto ficou da seguinte forma:

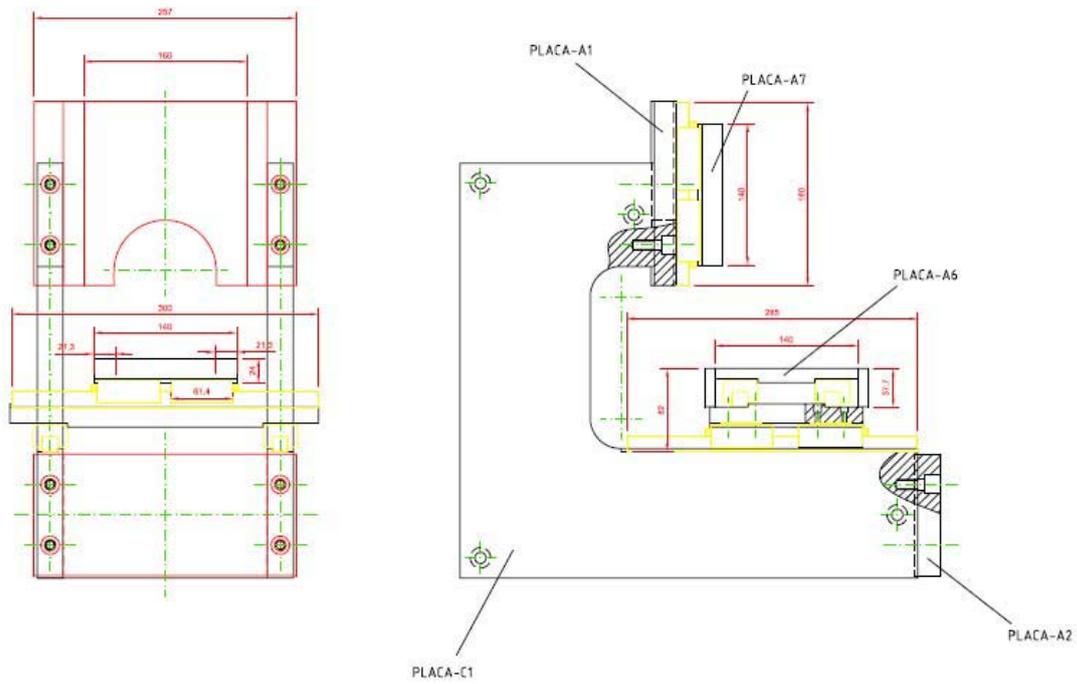


Figura 3.18 – Desenho do conjunto montado: protótipo minimáquina de corte.

Em perspectiva o protótipo adquiriu a seguinte aparência:

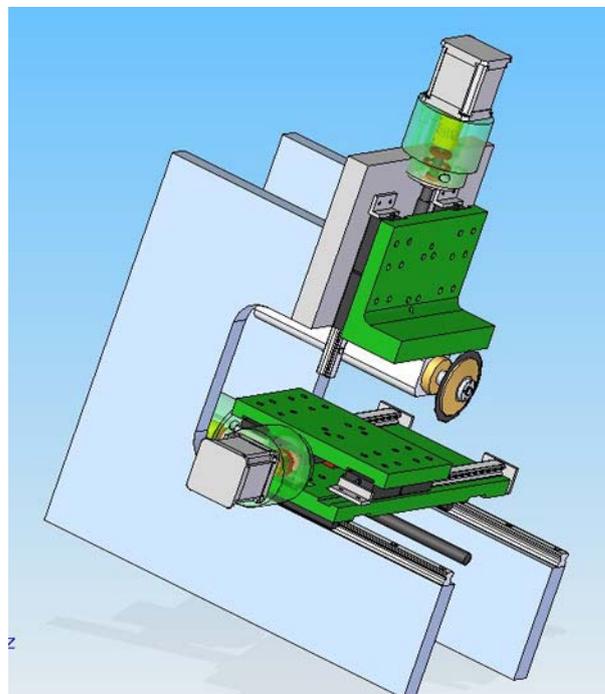


Figura 3.19 – Desenho do conjunto montado em perspectiva: protótipo minimáquina de corte.

3.1.4.4 Planejamento da fabricação do protótipo

Após a seleção do melhor conceito e especificação do mesmo, iniciou-se a fase de planejamento da fabricação do protótipo. A previsão do tempo que a fabricação consome também faz parte de um projeto. Com o uso de ferramentas como MS Project foi possível elaborar um plano de fabricação organizado em tarefas (ou operações) de 30 semanas. Evidentemente, o tempo gasto nas tarefas de usinagem, a dependência de terceiros, as alterações e correções de projeto, entre outros, são tempos obtidos pela experiência prática dos envolvidos e compromissos de fornecedores. Os longos períodos citados nesse planejamento não refletem o grau de dificuldade da operação. Tarefas como usinagem da estrutura são compostas de subtarefas, realizadas não necessariamente na sequência, mesmo por que, os funcionários envolvidos neste projeto conduziram os trabalhos paralelamente a outros projetos. Feriados e períodos de férias também contribuíram para um maior número de semanas.

A fabricação do protótipo foi dividida em duas frentes de trabalho por uma questão de conveniência: frente mecânica e frente eletrônica.

A frente mecânica aborda a compra de matéria prima mecânica, usinagem e montagem. A frente eletrônica diz respeito à compra de material e fabricação da placa de controle dos motores de passo. Vale ressaltar que a segunda frente foi realizada em parte por alunos de graduação, obedecendo ao ideal de difusão da tecnologia de sistemas de movimentação.

As tarefas foram listadas e organizadas, como é possível verificar no gráfico de Gantt no APÊNDICE D.

3.1.5 Fabricação do Protótipo

Durante a fabricação do protótipo houve alterações de projeto decorrente de sugestões e o surgimento de parcerias no fornecimento de alguns componentes.

Tomando como referência o planejamento de fabricação, é conveniente comentar algumas tarefas de projeto.

3.1.5.1 Estrutura

Duas chapas com formato “C”, praticamente simétricas, foram esquadrejadas e perfuradas em posições previamente definidas para a montagem com parafusos. As chapas intermediárias também foram esquadrejadas e furadas, recebendo por fim o trabalho de rosqueamento (rosca M10). A planicidade admitida nessa etapa de fabricação foi de até 10 μm em toda a extensão usinada. Os equipamentos utilizados foram: plaina ESZTERGOM, modelo GH5601M e furadeira PERRIN, modelo AV3.



Figura 3.20 – Chapas entregues para usinagem.

Após essa etapa, o conjunto foi montado e levado para a soldagem nas próprias dependências da EESC. Segundo Koenigsberger (1978), a estrutura soldada apresenta maior rigidez do que estruturas apenas parafusadas.



Figura 3.21 – Estrutura montada com parafusos.

Foi selecionada para a soldagem o processo MIG com gás inerte, sendo empregado o arame MIG ER-7056 (AWS A5.18/ A5.18M2005) de bitola 0,8mm (Gerdau, corrida 92446600, Jan/2008) e gás inerte ATAL 25 produto M21, de acordo com a norma européia pr EM 439 (Air Liquide Brasil Ltda). A seleção do processo MIG, com o referido arame e mistura de gases é recomendada para soldagem de aço carbono e aços de baixa liga. Neste projeto o material soldado foi o aço ABNT 1020 com partes de grande espessura (chapas com 25 mm de espessura) e cordões contínuos de 6 mm.

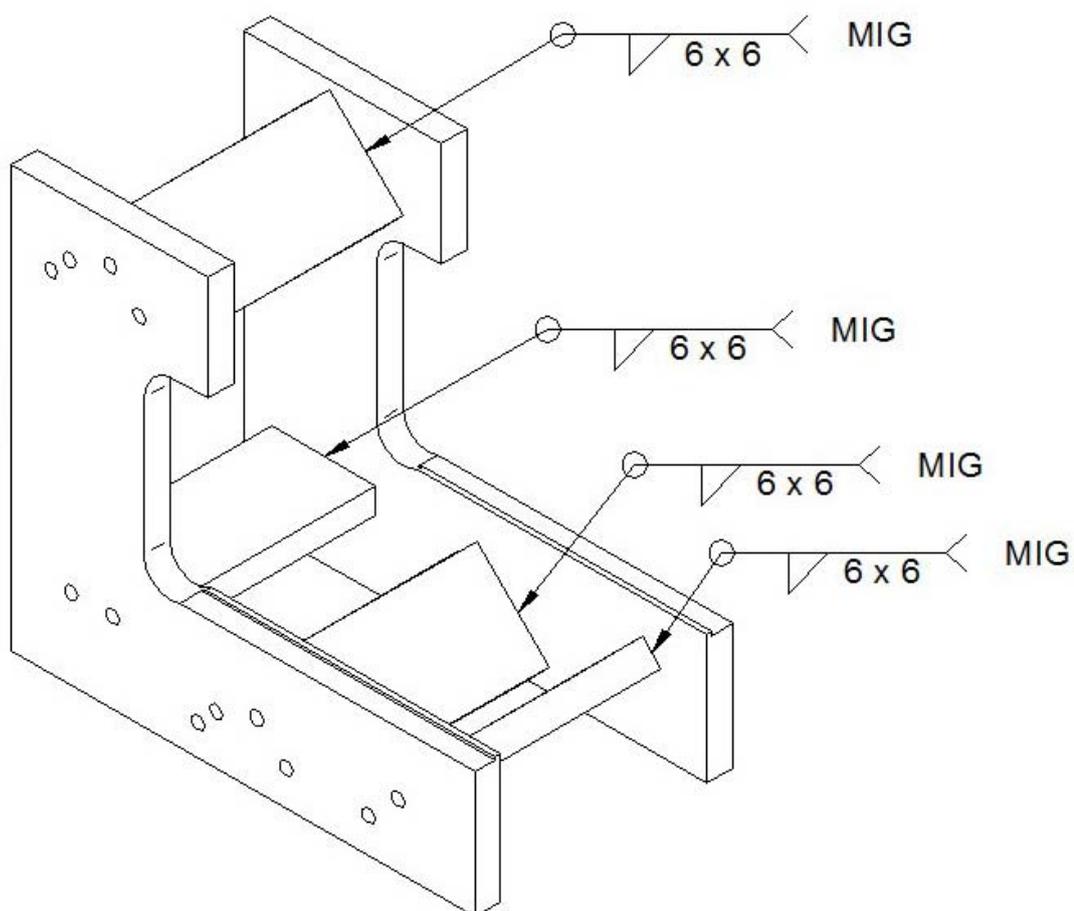


Figura 3.22 – Solda da estrutura – especificação de projeto.



a)

b)

Figura 3.23 – Estrutura montada com parafusos e soldada. Em a) visão geral. Em b) detalhe do cordão.

Após a soldagem, a estrutura passou por um tratamento térmico para alívio de tensões provenientes da solda, a fim de eliminar futuras distorções geométricas. Segundo o diagrama de temperatura de alívio de tensões por alívio inicial do *stress* do material (%), verificamos que a estrutura terá alívio de tensões maior do que 50% se permanecer por mais de 6 horas em temperatura de cerca de 300°C.

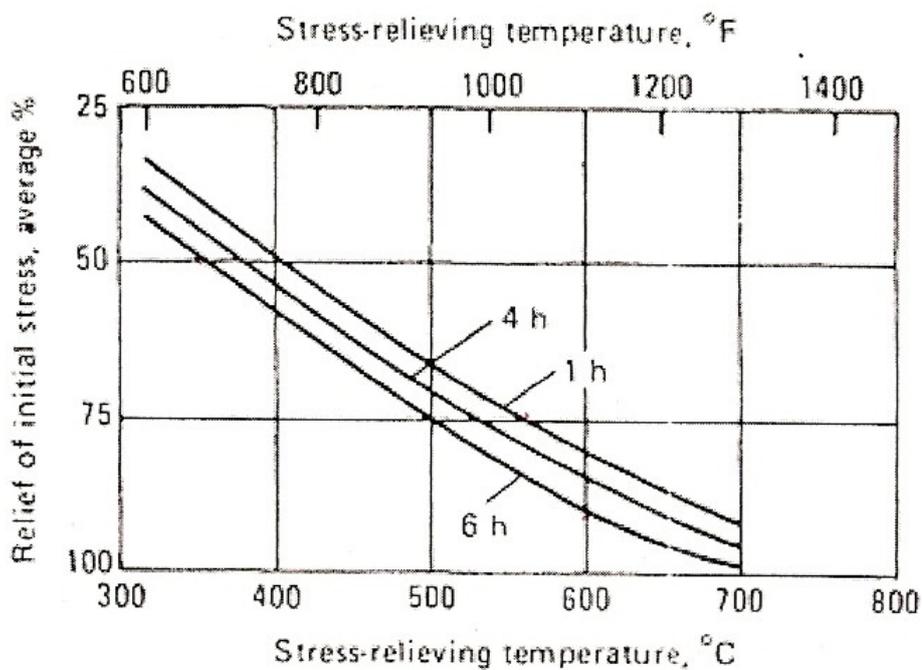


Figura 3.24 – Diagrama de tempo e temperatura no alívio de stress residual em aços (Metals Handbook V4, ASM).

Segundo Colpaert (1965), esse tratamento pode ser considerado como um revenido, pois a temperatura não ultrapassa a zona crítica do aço em questão.

Finalizado o tratamento térmico, a estrutura foi encaminhada para uma usinagem de desbaste e de acabamento, segundo desenho de projeto, Figura 3.25.

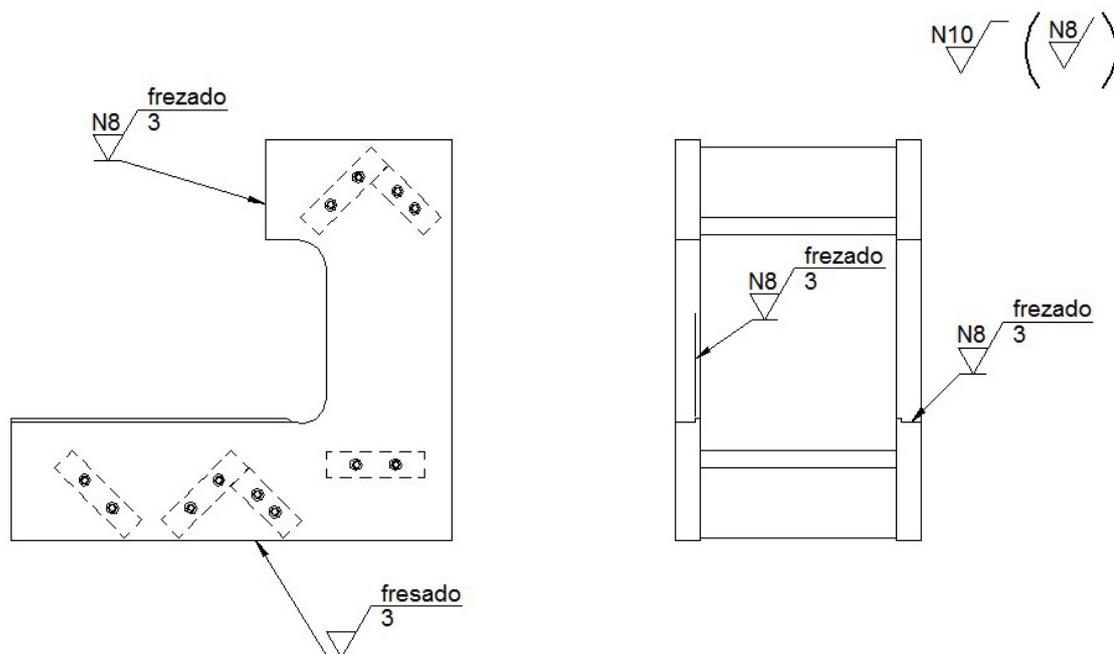


Figura 3.25 – Acabamento superficial

A usinagem fina dos assentos das guias foi realizada em operação de fresamento, com fresa de topo trabalhando em profundidade de corte de 0,05 mm e avanço de 100 mm/min. Garantindo planicidade do apoio em até 0,02 mm. Foram usadas as seguintes máquinas operatrizes: fresadora universal CSEPEL, modelo MUL320, para usinagem pesada e mandrilhadora (universal) SCHAUBLIN, modelo 53N, para usinagem fina.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.26 – Usinagem de desbaste (após soldagem). Em a) fresamento de uma das faces. Em b) detalhe para o degrau de apoio dos trilhos. Em c) pré-montagem e por fim, d) início da etapa de pintura.

3.1.5.2 Mesas

A usinagem dos materiais das mesas consta basicamente de duas chapas de aço inoxidável e uma de aço ABNT 1020, fresadas e perfuradas para fixação de trilhos e patins.

O processo de fabricação dos canais de assentamento das guias e patins foi alterado nessa etapa de projeto. Experiências anteriores demonstraram que as máquinas ferramentas disponíveis para fabricação do protótipo trabalham com

tolerância igual ou menor que a solicitada no manual HIWIN. O projeto foi alterado para o seguinte formato: Figura 3.27.

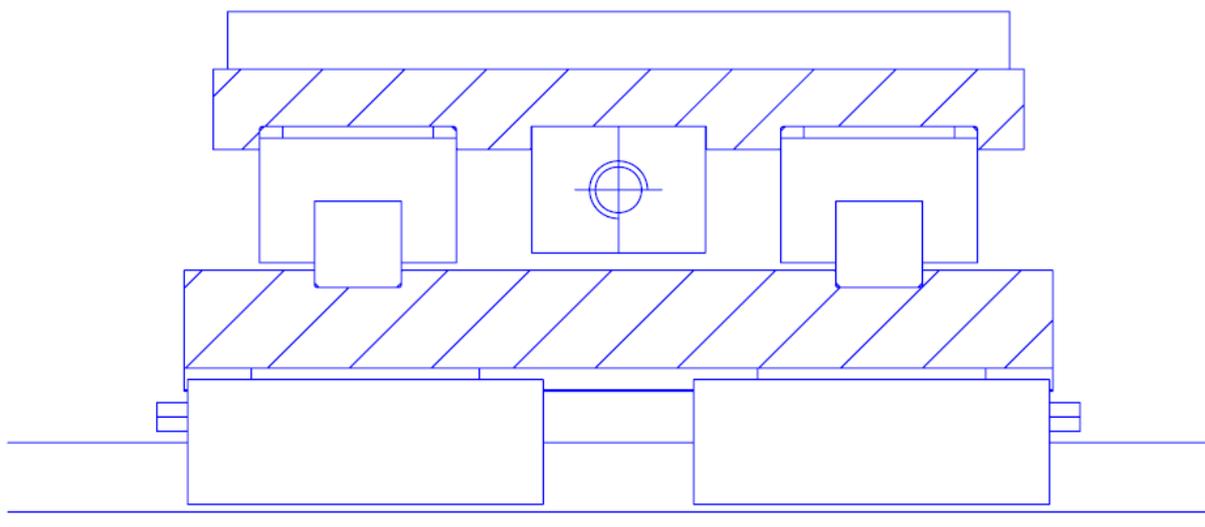


Figura 3.27 – Usinagem do assento dos trilhos (detalhe).



Figura 3.28 – Usinagem do assento dos trilhos (detalhe).

3.1.5.3 Alojamento dos mancais

O alojamento dos mancais foi manufaturado em alumínio 6351 (uso industrial). A peça foi torneada e fresada.



Figura 3.29 – Carcaça mancal.

3.1.5.4 Mesa de corte

O material foi torneado e retificado no topo e na base, gerando planicidade adequada à fixação do vidro por vácuo.

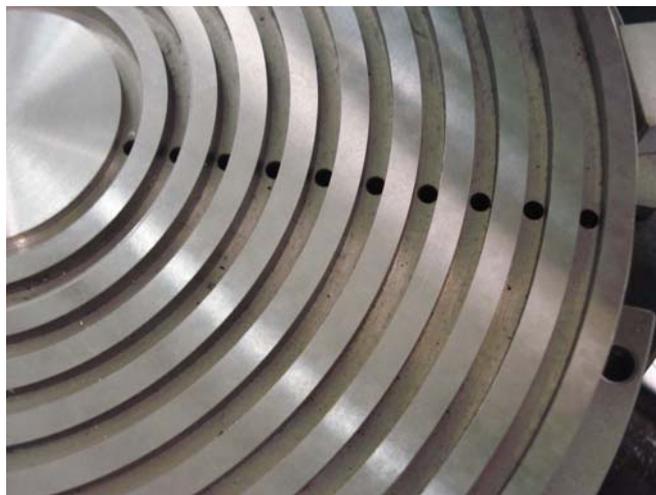


Figura 3.30 – Mesa de corte à vácuo, detalhe de canais de captação do ar.

3.1.5.5 Motores

Os motores foram montados adequadamente, visto que seguiam padrão de flange NEMA 23. Apesar de apresentarem 8 fios e o drive de controle (CNC 3XA) possuir 6 entradas, a ligação foi feita de forma segura. O modelo de motor selecionado, KTC HT23 – 401F, é composto de 4 bobinas com terminais independentes, sendo necessária a ligação em série de alguns destes. Este modelo oferece 1,8 N.m de torque.

3.1.5.6 Fusos

Rebaixos foram torneados na região dos mancais, para apoio dos rolamentos e fixação do acoplamento entre fuso e motor. O mancal foi fixado por porca e contraporca de um dos lados e anel elástico do outro.

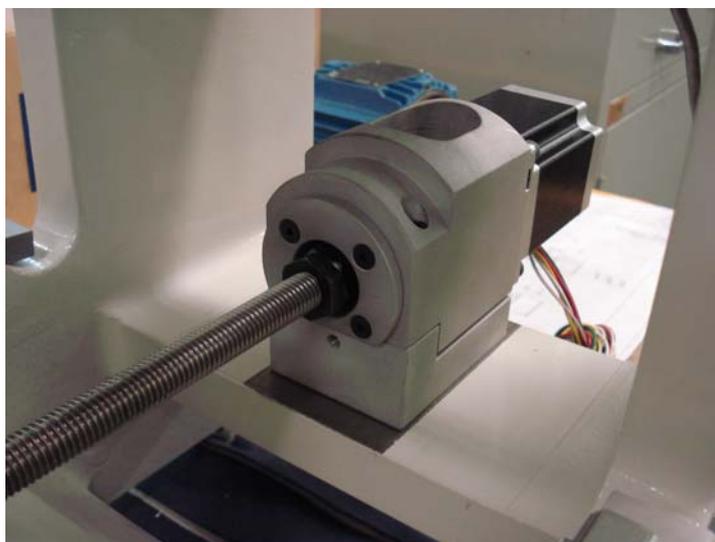


Figura 3.31 – Mancal montado

3.1.5.7 Sistema de movimentação

O drive CNC 3AX foi montado em uma caixa elétrica para maior conveniência e aparência do conjunto.

4 RESULTADOS

4.1 O protótipo *dicing saw*

O protótipo de uma minimáquina de corte para materiais frágeis (*dicing saw*) foi concluído. A Figura 4.1 ilustra o desenho de projeto da minimáquina. A Figura 4.2 mostra o equipamento montado em detalhe, e a Figura 4.3, sistema montado para ensaio.

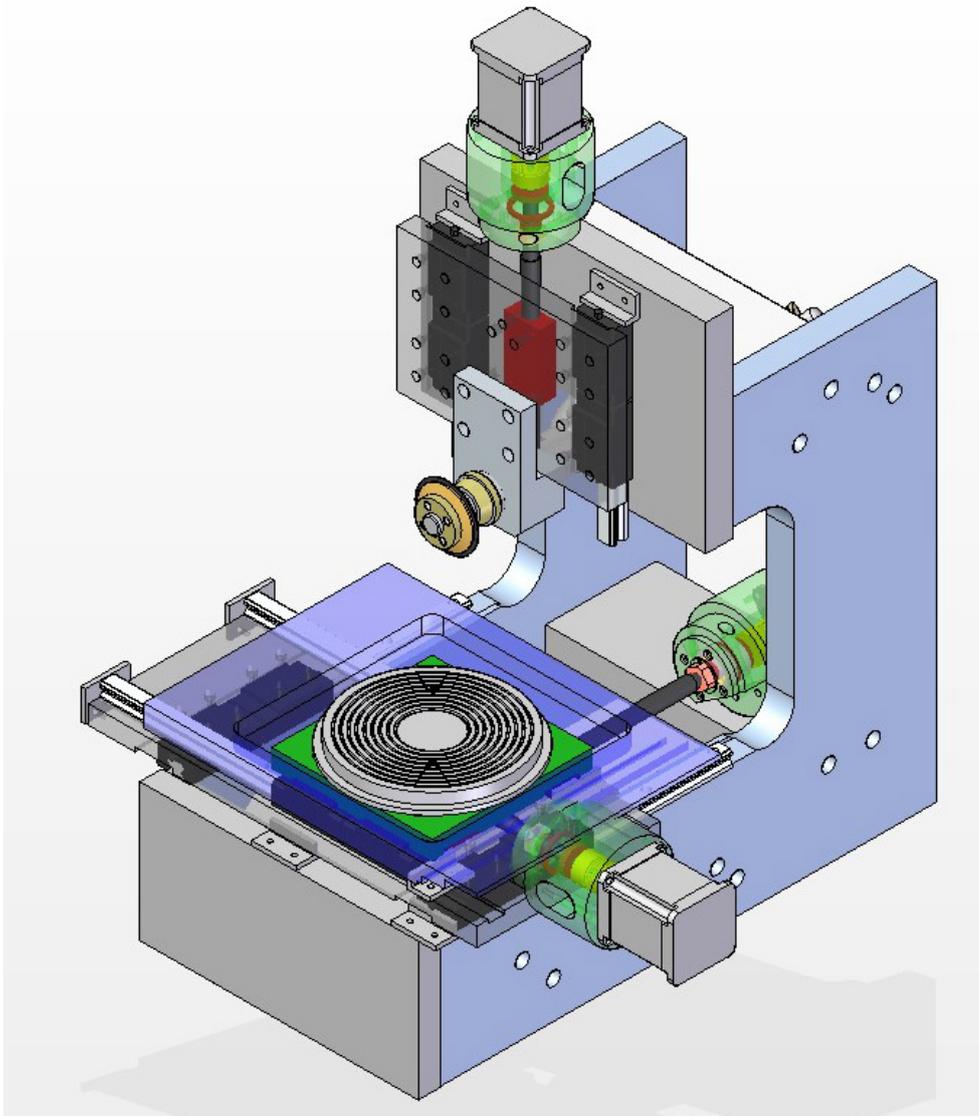


Figura 4.1 – Desenho de projeto da minimáquina de corte de materiais frágeis.

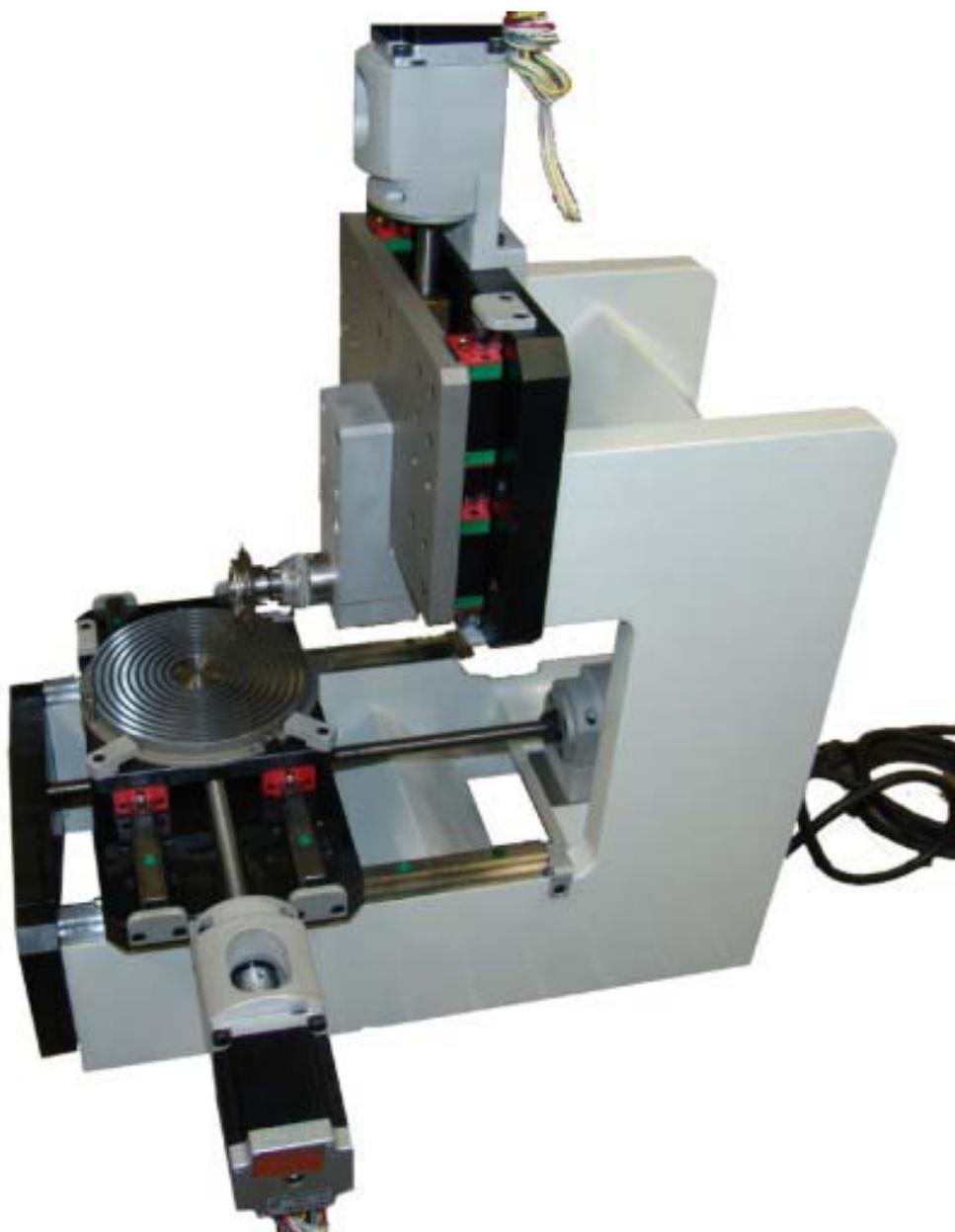


Figura 4.2 – Protótipo de uma minimáquina de corte de materiais frágeis.

4.2 Ensaio de validação

O presente trabalho também contempla 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. O mesmo material foi usado nos estudos preliminares e na validação do equipamento.



Figura 4.3 – Sistema montado para ensaio.

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.

A matéria-prima utilizada foi a alumina calcinada A1000-SG (Almatis, Inc.), com diâmetro médio equivalente de partícula de $0,4 \mu\text{m}$, área superficial de $7,7 \text{ m}^2/\text{g}$, $\rho_{\text{real}}: 3,99 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Tabela 4 – Composição Alumina Calcinada A1000-SG (fonte: Almatis, Inc.)

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	CaO	B_2O_3	MgO
%	%	%	%	%	%	%
99,8	0,03	0,02	0,07	0,02	0,001	0,04

A mistura/desaglomeração da alumina foi realizada em moinho de jarros elementos de moagem de cilindros de zircônia ($\varnothing 12\text{mm}$, h 12mm). Uma suspensão com 30 vol% de pó foi elaborada com volume líquido composto por 68 vol% de água destilada e deionizada, 1 vol% de PVAI e 1 vol% de poliacrilato de amônia (dispersal 130). Leriche et al. (1988) recomendam a combinação do uso de defloculante

associada à mistura mecânica para garantir uma adequada homogeneização da mistura $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$. O granulado do pó foi obtido pela secagem em *spray drier*.

Na conformação do pó cerâmico, placas de 40x40x10mm foram prensadas uniaxialmente a 100MPa. Em seguida foram encapsuladas a vácuo e submetidas à prensagem isostática a 100MPa. A prensagem isostática foi empregada para dar mais uniformidade de compactação às placas e garantir maior precisão na pressão de compactação.

Após secagem em estufa de 12 horas a 100°C, as placas foram sinterizadas em forno elétrico tipo câmara à 1600°C, com patamar de 2h, segundo curva de sinterização apresentada na Figura 4.3. Foi adotada a monoqueima, entretanto na região até 150°C foi aplicada taxa de 1°C minuto, para evitar gradiente térmico muito pronunciado entre emissão do elemento e condução térmica. Na região de 150°C até 600°C 1,4°C/min para queima e extração dos ligantes, valores muito conservadores, porém seguros para evitar danos nesta fase de processo.

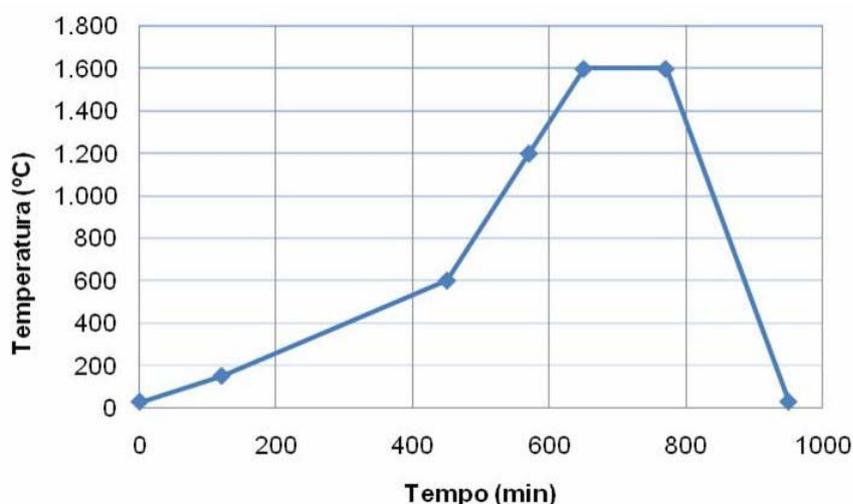


Figura 4.4 - Curva de queima aplicada nas placas de Alumina.

Na Tabela 5 são apresentados os valores das retrações lineares médias, porosidade aparente, porosidade total e razão de densificação dos corpos de prova.

Tabela 5 – Dados sobre retração e densidade das barras após sinterização

Retração Linear (%)	Porosidade Aparente (%)	Porosidade Total (%)	Densidade Total / Densidade Teórica (%)
15,12±0,14	0,54 ± 0,05	3,88	96,12 ± 0,017

É observado porosidade em torno de 4% relativamente alta, provavelmente devida a baixa pressão isostática (100 MPa) e a temperatura de sinterização também relativamente baixa para alumina 99,8% (1600°C-2h). Na observação das imagens por microscopia eletrônica de varredura da superfície, após o corte, deve ser considerada esta porosidade pré-existente.

Após a sinterização, dois grupos de nove peças foram aderidos sobre um bloco de aço ferramenta temperado e retificado com desvio máximo de paralelismo de $1\mu\text{m}$ entre as faces, sendo que uma das faces foi ranhurada para penetração e dispersão do adesivo. Foi utilizada como adesivo uma termocera composta por breu (50%); parafina (25%) e cera de abelha (25%) (% em peso). As duas faces ($34\times 34\text{mm}$) dos corpos de prova foram retificadas para garantir homogeneidade dimensional e planicidade (Figura 4.5). Foi utilizado rebolo de diamantado de liga resinóide com tamanho médio de grãos de $91\mu\text{m}$ e concentração de $0,66\text{g}/\text{cm}^3$, nas seguintes condições de remoção: velocidade periférica do rebolo $27\text{m}/\text{s}$, velocidade de avanço do rebolo $3\text{mm}/\text{min}$ e profundidade de $0,05\text{mm}$ por passe.

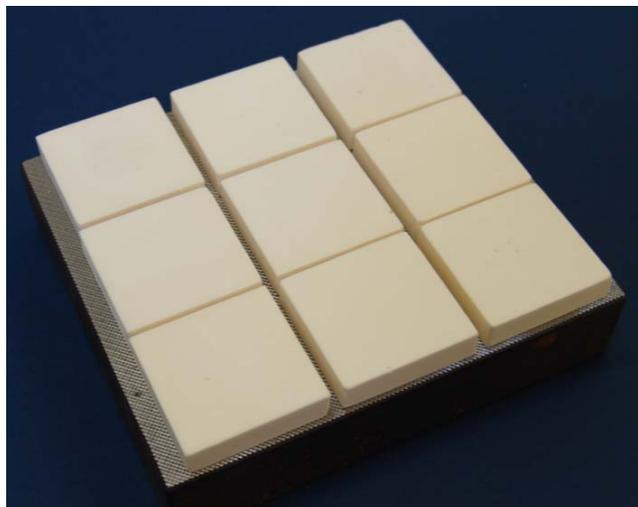


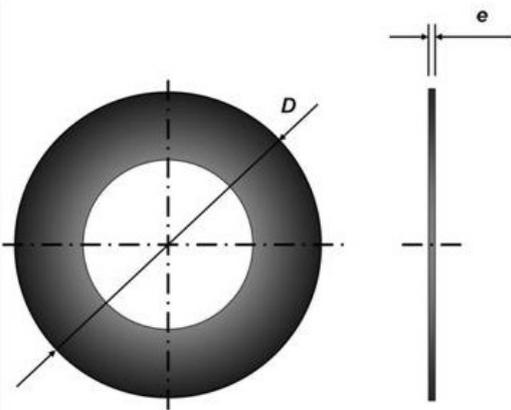
Figura 4.5 – Disposição das peças sobre base metálica para retificação.

4.2.1 Organização dos ensaios

Para os experimentos de corte foi selecionado o disco com as características apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características do disco de corte abrasivo

Características disco de corte abrasivo	
Diâmetro Externo	57,15mm
Espessura	$0,254 \pm 0,010\text{mm}$
Tamanho do grão	$54 \mu\text{m}$
Resina	Para materiais cerâmicos e cristalinos



Os corpos de prova receberam uma numeração e uma letra para ordenação e orientação do corte. Foi definido que os cortes seriam feitos paralelamente à face definida pela letra A (Figura 4.6).

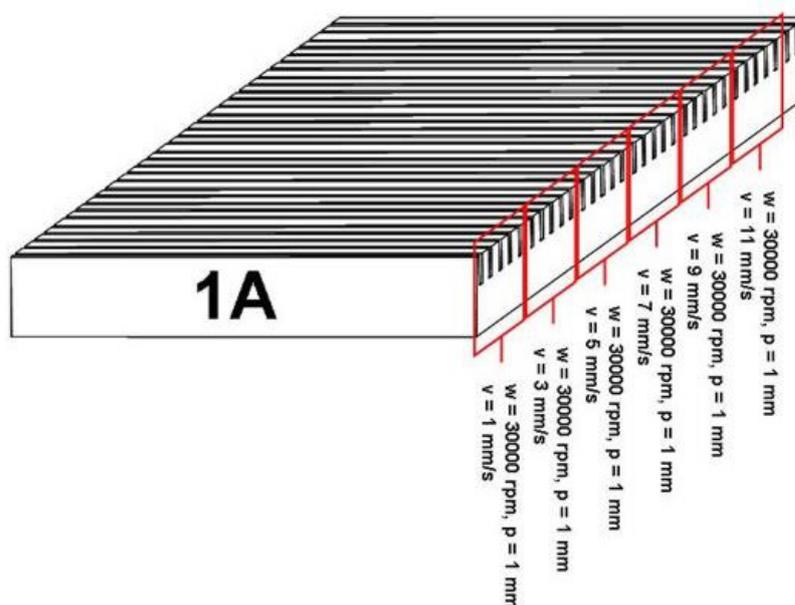


Figura 4.6 – Peça cortada

Em cada corpo de prova, os seguintes parâmetros foram variados: velocidade de rotação do disco (**w**); profundidade de corte (**p**); velocidade de avanço (**v**). Mediram-se o desgaste do disco (**d**), rugosidade superficial (**Ra** e **Rrms**) e potência de corte descrita pela corrente elétrica do motor (**A**).

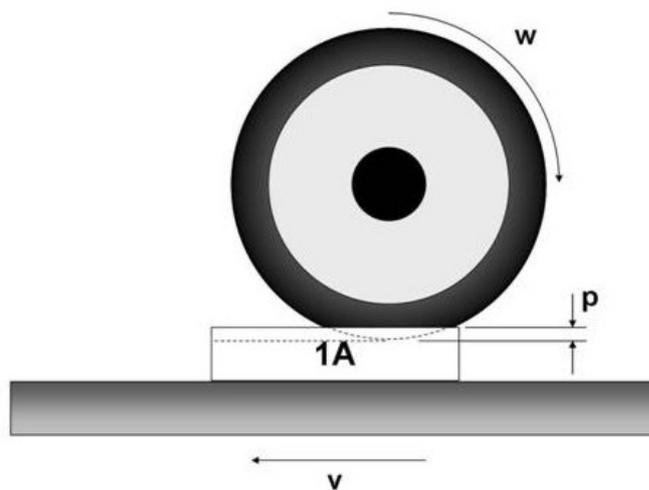


Figura 4.7 – Condições de corte.

Corpo de Prova	Teste	Velocidade de rotação do disco (w) [RPM]	Profundidade de corte (p) [mm]	Velocidade de avanço (v) [mm/s]
01	1A	30.000	1	1
	1B			3
	1C			5
	1D			7
	1E			9
	1F			11
	1G			13
	1H			15
02	2A...2H	20.000	2	1.....15
03	3A...3H		3	1.....15
04	4A...4H		10.000	1
05	5A...5H	2		1.....15
06	6A...6H	3		1.....15
07	7A...7H	10.000	1	1.....15
08	8A...8H		2	1.....15
09	9A...9H		3	1.....15
10	17I	10.000	3	17
10	17J*			19

Quadro 6 – Parâmetros experimentais.

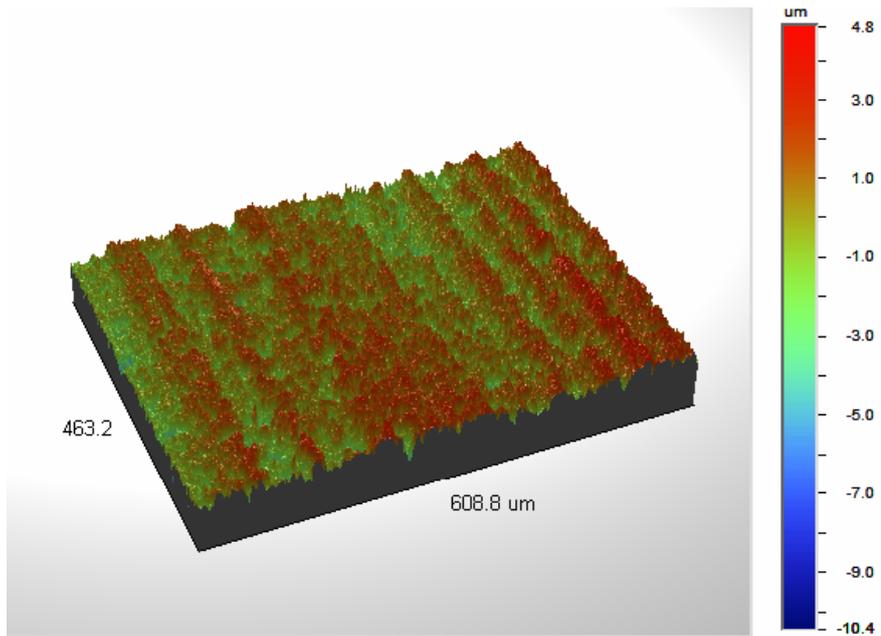
As condições de corte estão apresentadas no Quadro 6, sendo que para os corpos de prova 01 ou 10 é mostrado todo detalhamento do ensaio; para os corpos de prova de 02 a 09 as informações estão concentradas. A Figura 4.7 apresenta os parâmetros de corte variados para cada segmento.

4.2.2 Resultados e discussões obtidos nos experimentos preliminares

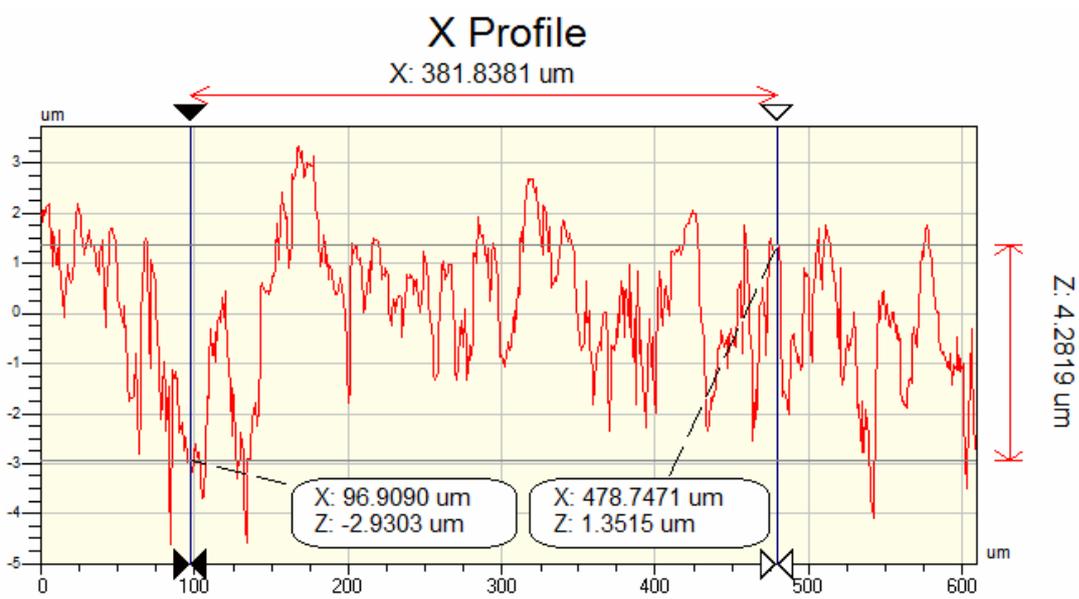
Os resultados foram divididos em dois grupos principais: a análise dos cortes e o desempenho do disco de corte.

4.2.2.1 Desempenho de corte - Análise de Imagens

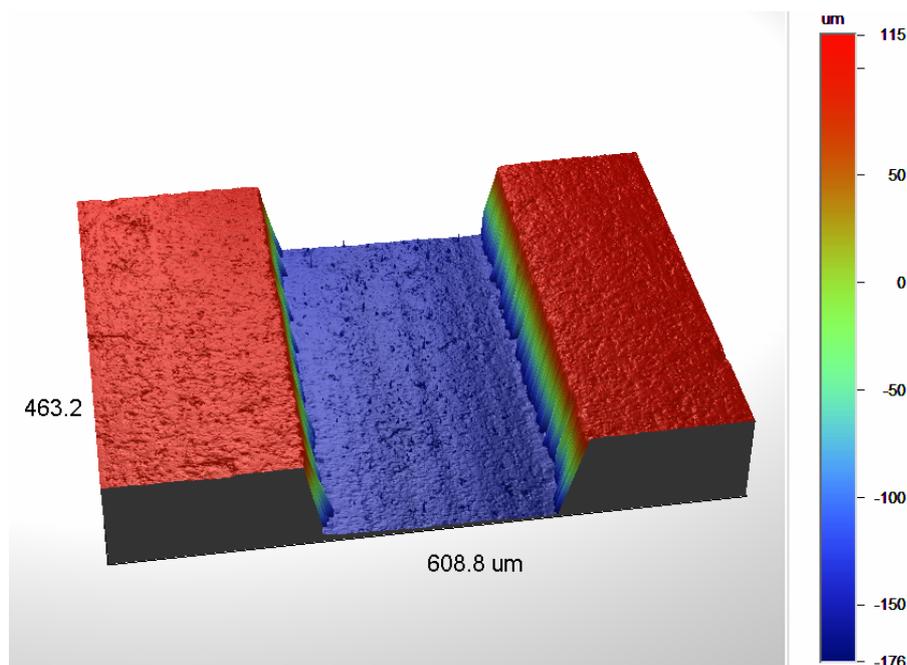
A Figura 4.8 apresenta as imagens de um corpo de prova retificado antes e após o corte. A Figura 4.8 a apresenta a imagem tridimensional da superfície retificada antes do corte e na Figura 4.8 b, o perfil da seção transversal desta superfície, nela a rugosidade medida usando filtro passa-alto foi de $R_a=0,233 \mu\text{m}$ e $R_{rms}= 0,355 \mu\text{m}$. A Figura 4.8 c mostra a imagem tridimensional da superfície com o canal gerado após o corte com profundidade programada de 0,3mm. No vale do canal foi medido $R_a=0,180 \mu\text{m}$ e $R_{rms}= 0,290 \mu\text{m}$. As medidas demonstram que o corte melhora o acabamento superficial dentro do canal (quando comparada à rugosidade obtida pela retificação da superfície). Porém, não é possível afirmar o mesmo para as bordas do canal (corte), aonde surgem diferentes rugosidades segundo as condições de corte.



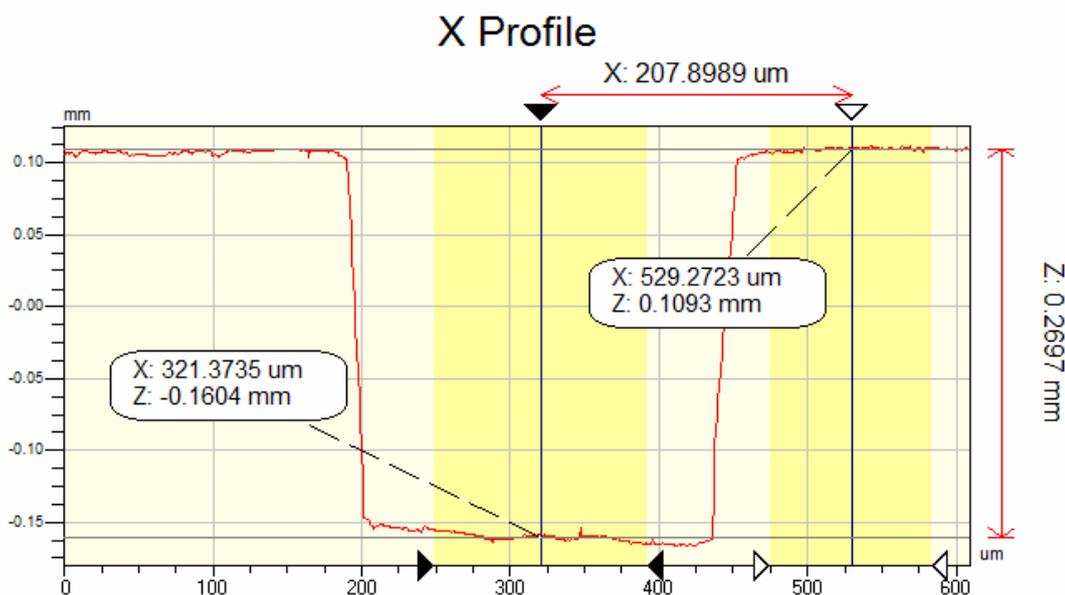
a)



b)



c)



d)

Figura 4.8 – Corpo de prova em a) após retificação da superfície, em b) perfil transversal à direção de corte, em c) superfície após um canal de corte com profundidade aproximada de 0,3mm e em d) perfil transversal à direção de corte. Perfilômetro Veeco, Wyco NT110.

Estudos sobre o formato da aresta do corte foram realizados com base na aquisição microscópica de imagens dessas regiões. Das condições experimentais, foram selecionados os ensaios 1A e 9H para aquisição de imagens. A Figura 4.9 mostra a peça 01 após sucessivos cortes 1A (a) e 9H (c) e em detalhe a aresta de corte da 1A (b) e 9H (d). É observado que a amostra 1A em condições de corte de

menor agressividade mantém a integridade da aresta quando comparado com a 9H, na qual se nota fratura de grandes proporções na forma intergranular. Com relação à linearidade, vê-se que na condição mais agressiva (9H) notam-se desvios no perpendicularismo dos canais observados pelo sombreamento da superfície lateral dos canais.

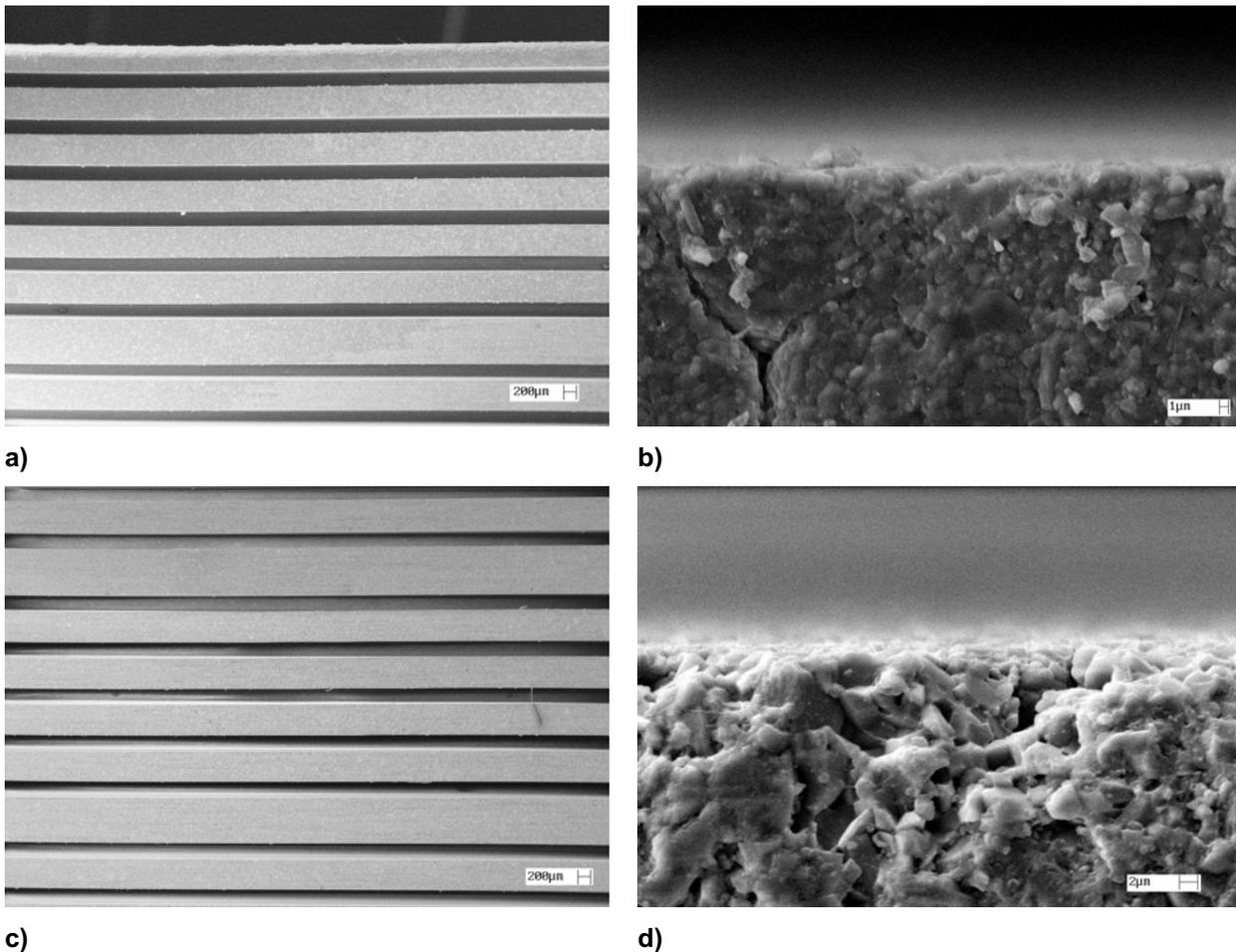
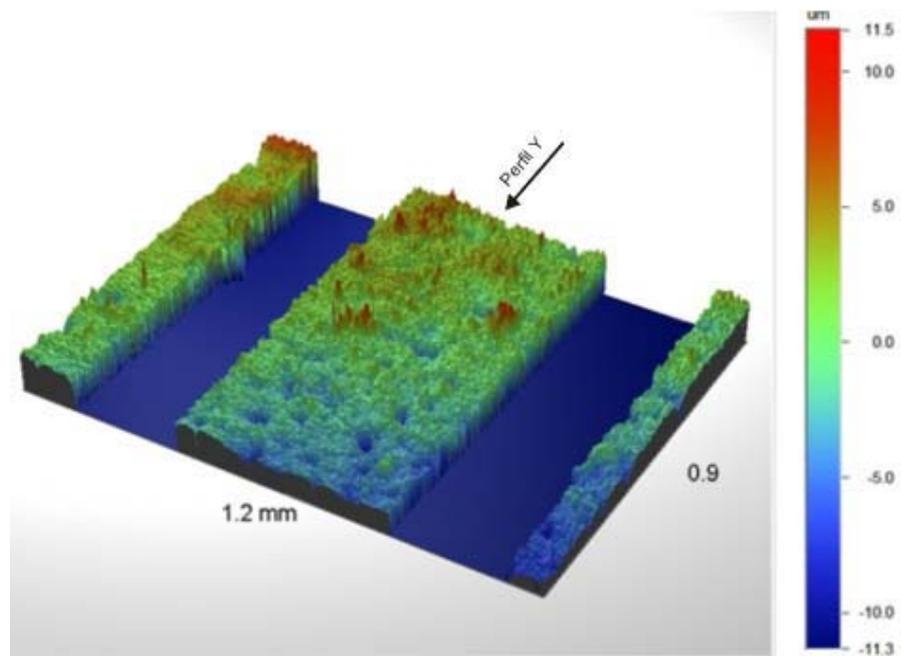


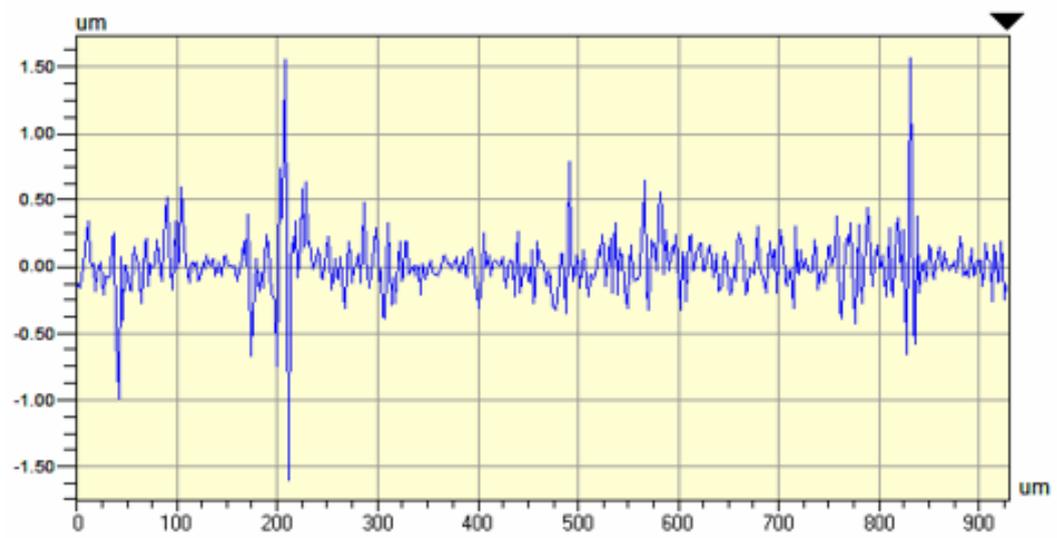
Figura 4.9 – Experimento 1A, em a) imagem dos cinco cortes 1A e início dos cortes 2A, em b) detalhe da aresta de corte.

As medidas do perfil e rugosidade das amostras 1A e 9A são mostradas na Figura 4.10, em a) o perfil do corte 1A e em b) o perfil longitudinal do corte 1A próximo ($1\mu\text{m}$) da aresta, onde é observado $R_a = 0,15\mu\text{m}$ e $R_{rms} = 0,23$; em c) o perfil do corte 9H e em d) o perfil longitudinal do corte 9H próximo ($1\mu\text{m}$) da aresta, onde é observado $R_a = 0,42\mu\text{m}$ e $R_{rms} = 0,64$. As medidas obtidas pelo perfilômetro comprovam a imagem de perda de integridade superficial observada pela imagem de MEV (Figura 4.9).

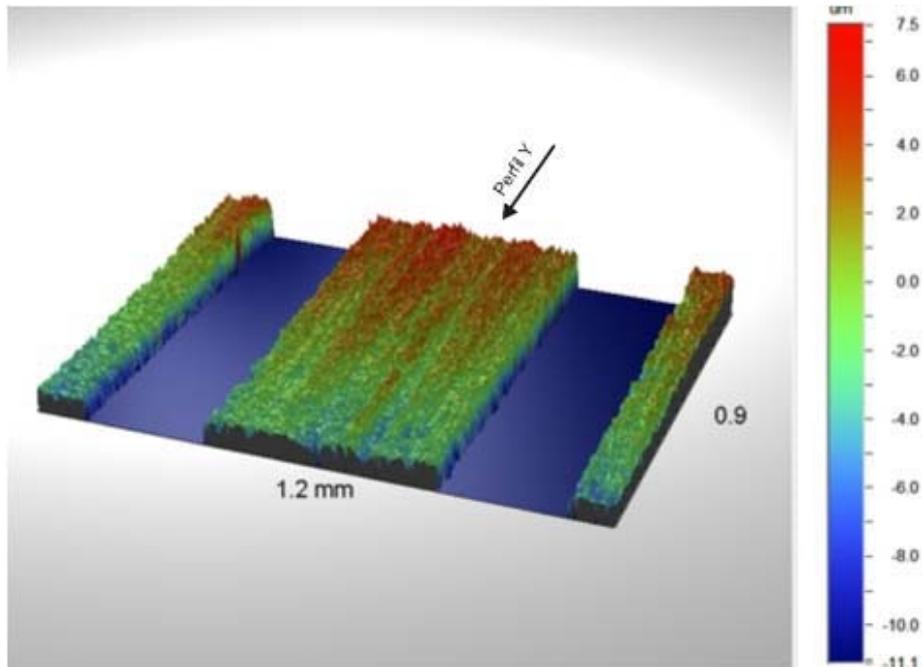


a)

Y Profile

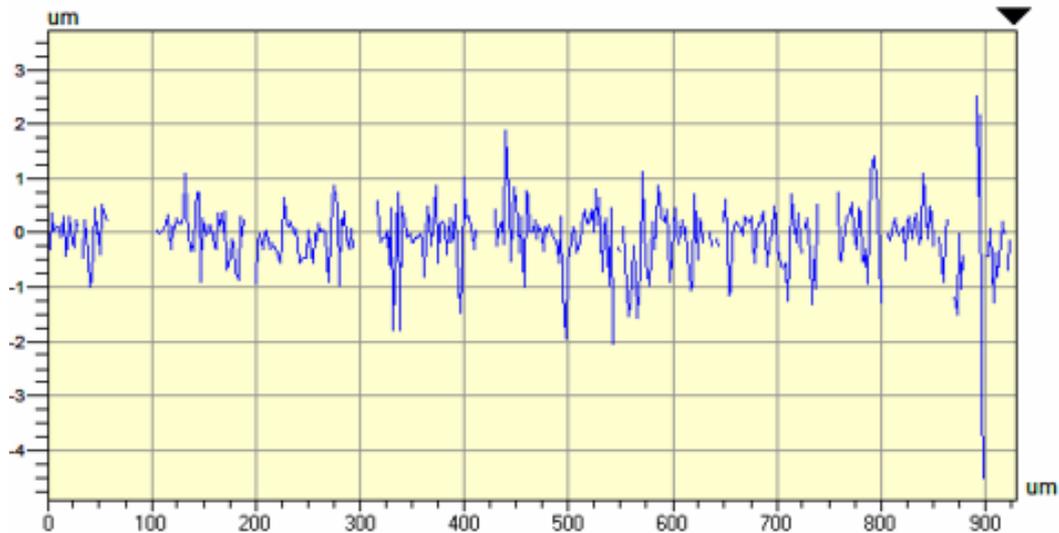


b)



c)

Y Profile

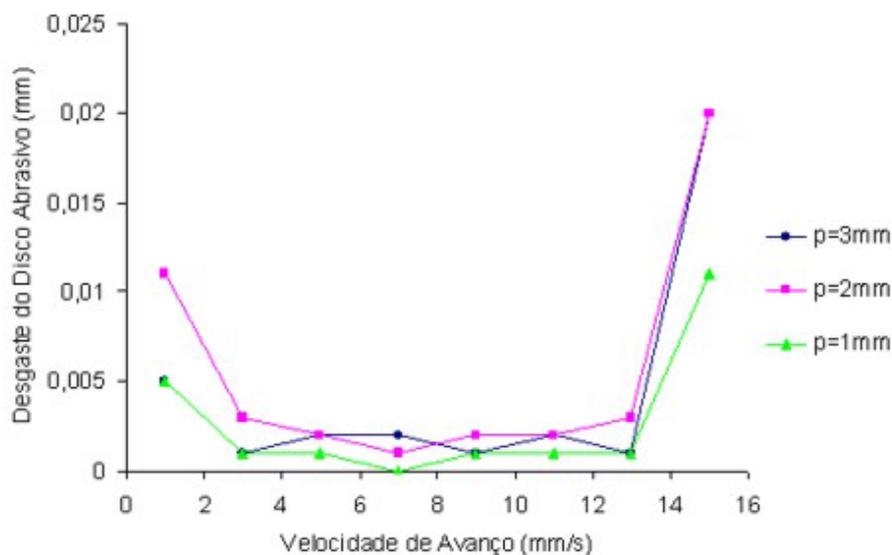


d)

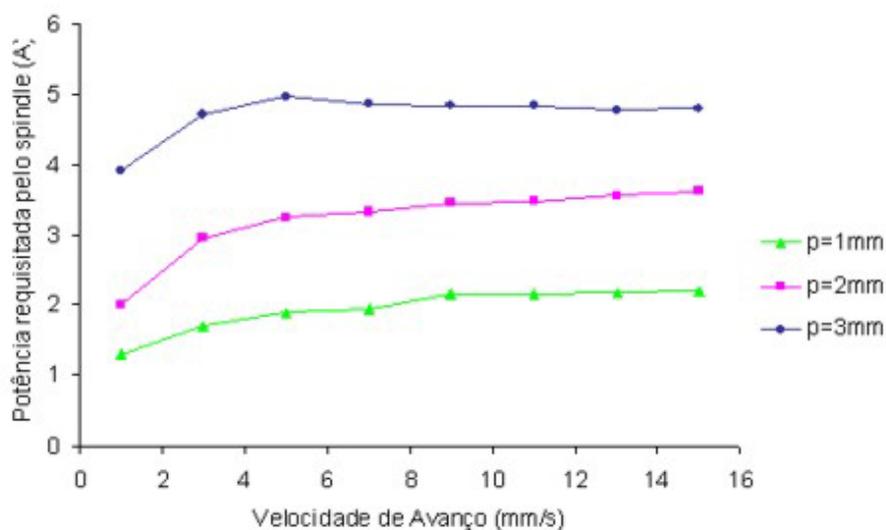
Figura 4.10 – Perfis e medidas de rugosidade, em a) e b) teste 1A e em c) e d) teste 9H.
Perfilômetro Veeco, Wyco NT110.

4.2.2.2 Desempenho de corte - Desempenho do disco

Mediu-se o desgaste do disco de corte em função da velocidade de avanço do disco e a respectiva potência exigida pelo *spindle* nesses procedimentos.



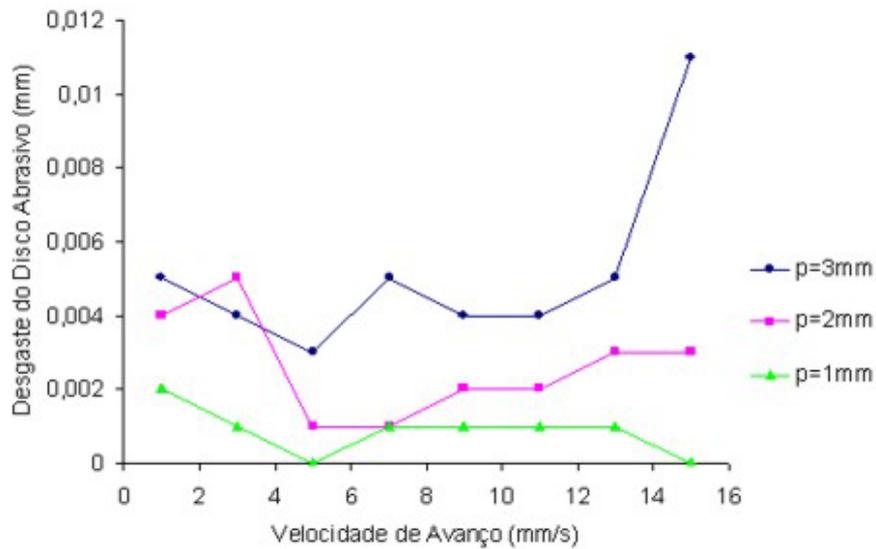
a)



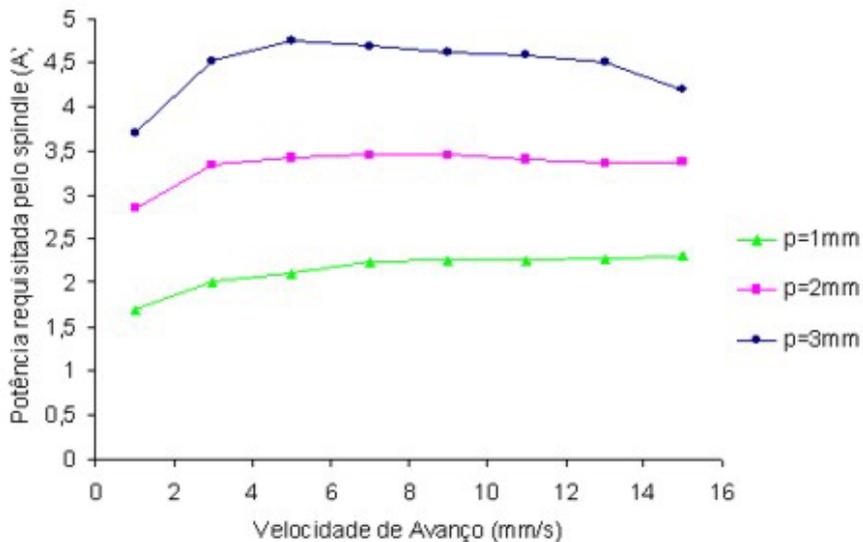
b)

Figura 4.11 – Desgaste e Potência consumida em rotação de disco de 10.000 rpm.

O diagrama da Figura 4.11 a demonstra que o disco abrasivo selecionado para o experimento (Tabela 6) apresenta desgaste regular entre as velocidades de 5 a 13 mm/s, tendendo para um desgaste mais acentuado em velocidades de avanço e profundidades maiores. O diagrama da Figura 4.11 b indica uma demanda crescente da potência requisitada pelo *spindle* segundo o aumento da velocidade de avanço e da profundidade de corte.



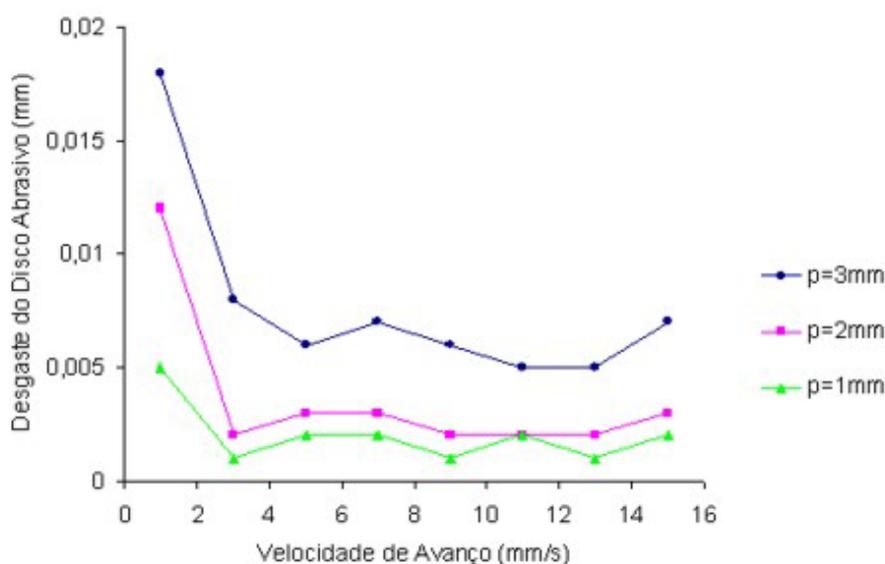
a)



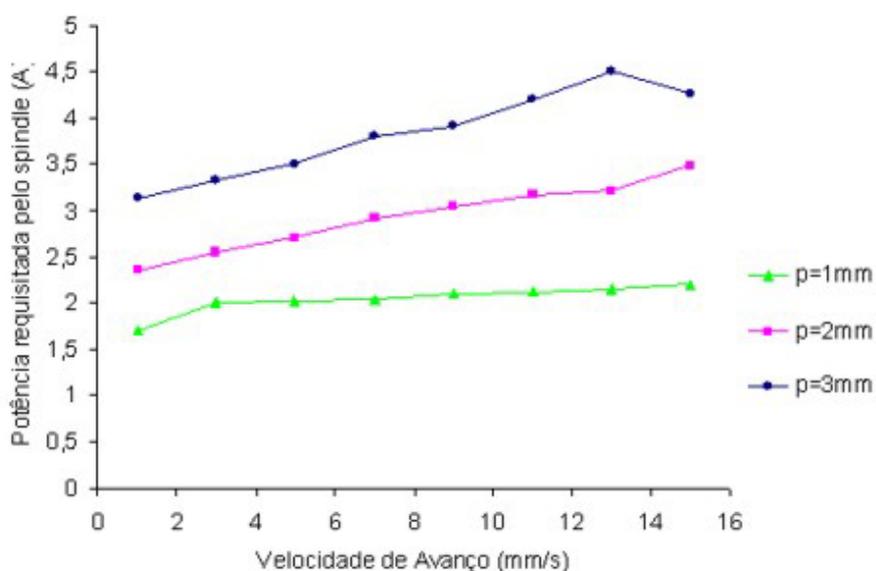
b)

Figura 4.12 – Desgaste e Potência consumida em rotação de disco de 20.000 rpm.

O diagrama da Figura 4.12 a demonstra que o disco abrasivo apresenta maior desgaste em maiores profundidades de corte. O desgaste também aparece acentuado abaixo de 5 mm/s e acima de 13 mm/s, porém, sem a mesma regularidade de desgaste da condição de 10.000 rpm. O diagrama da Figura 4.12 b indica grande similaridade com o diagrama da Figura 4.11 b.



a)



b)

Figura 4.13 – Desgaste e Potência consumida em rotação de disco de 30.000 rpm.

O diagrama da Figura 4.13 a demonstra que o disco abrasivo apresenta maior desgaste em maiores profundidades de corte, porém, o trecho de regularidade do desgaste apresenta-se maior. O diagrama da Figura 4.13 b indica grande similaridade com os diagramas anteriores (Figura 4.11 b e 4.12 b), porém existem diferenças quando se compara a potência consumida em cada profundidade e velocidade de rotação do disco abrasivo, indicando uma tendência para menores variações de potência em maiores rotações. O Quadro 7 resume essa observação.

Velocidade de rotação do disco (w) (RPM)	Velocidade de avanço (v) (mm/s)	Profundidade de corte (p) (mm)	Potência média requisitada pelo <i>spindle</i> (A)
10.000	1 ... 15	1	1,94
	1 ... 15	2	3,20
	1 ... 15	3	4,70
20.000	1 ... 15	1	2,14
	1 ... 15	2	3,33
	1 ... 15	3	4,45
30.000	1 ... 15	1	2,04
	1 ... 15	2	2,93
	1 ... 15	3	3,83

Quadro 7 – Comparativo entre potência média requisitada pelo *spindle* em cada condição de corte.

Combinando o desgaste médio das três profundidades de corte (p) em cada faixa de velocidade de rotação (w) do disco abrasivo tem-se o desempenho mostrado pela Figura 4.14.

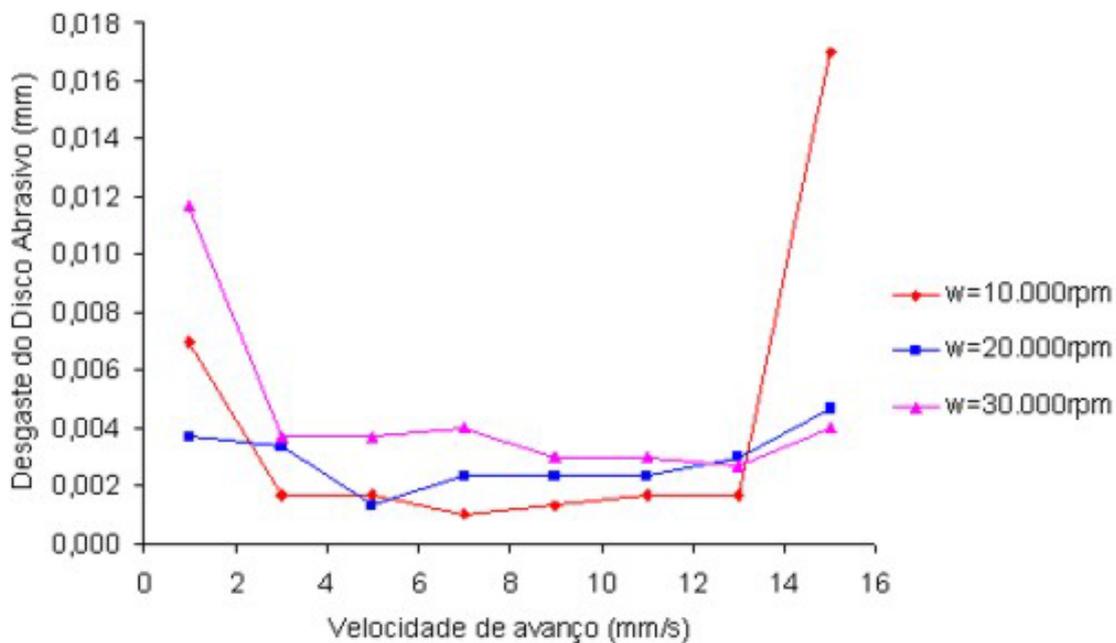


Figura 4.14 – Desgaste médio do disco abrasivo.

Observando a influência que a rotação do disco tem sobre o desgaste do mesmo, é possível concluir que os valores são próximos, tendendo a ser maiores em altas rotações e baixas velocidades de avanço, como por exemplo: o maior desgaste médio do disco ocorre na condição de 30.000 RPM até 13 mm/s, porém, acima desta velocidade de avanço, o desgaste tende a ser maior em baixa rotação, como 10.000 e 20.000 RPM.

Evidentemente, as variantes: rotação, velocidade de avanço e profundidade de corte podem atingir uma faixa de combinações ótima, aonde a integridade do material cortado e os desgastes são admissíveis. Para estes experimentos, constatou-se que a alta rotação coloca o disco em uma condição de corte estável, apesar do alto desgaste.

Foram encontrados parâmetros que ofereceram condição extrema para a integridade do disco de corte com desvios de retilidade e perpendicularismo acarretando na quebra do disco, ensaio 17J. A Figura 4.15a, ilustra que já no momento de entrada do disco no corpo de prova houve o desvio de perpendicularismo demonstrando que a força de corte atuando sobre o disco superou sua rigidez fazendo a lâmina exposta do disco se curvar e assim penetrar inclinada. Na Figura 4.15b, é observado a consequência desta inclinação de entrada que acarretou em perda de linearidade do corte e quebra do disco.



a)



b)

Figura 4.15 - Corte em desvio, em a) vista frontal de entrada do rebolo e em b) vista superior.

4.3 Validação do protótipo

O ensaio de validação foi planejado para o corte de bloco de alumina com disco de corte especificado na Tabela 6. 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. As Figuras 4.16 e 4.17 ilustram este ensaio em detalhe e ampliada, respectivamente.

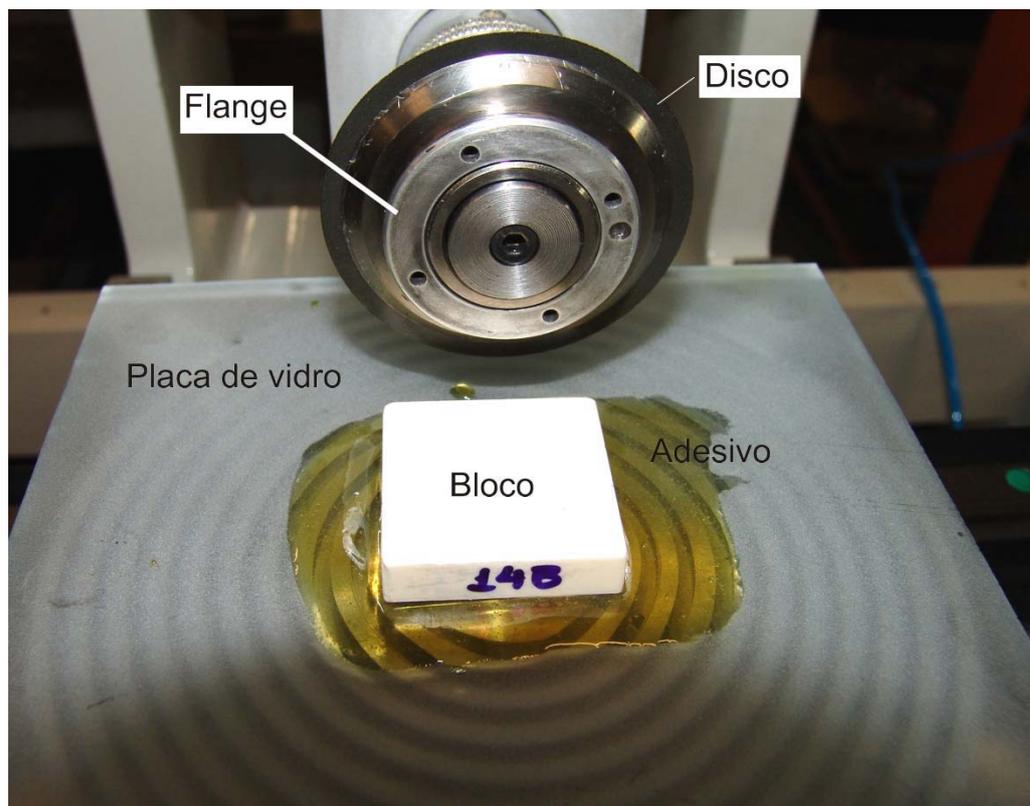


Figura 4.16 – Ensaio, em detalhe, vista do conjunto disco abrasivo e flange, placa de vidro, adesivo e o bloco (corpo de prova em Alumina).

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 “fiscamento” 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 4.18) e a linearidade foi medida identificando excelente desempenho nas condições testadas.

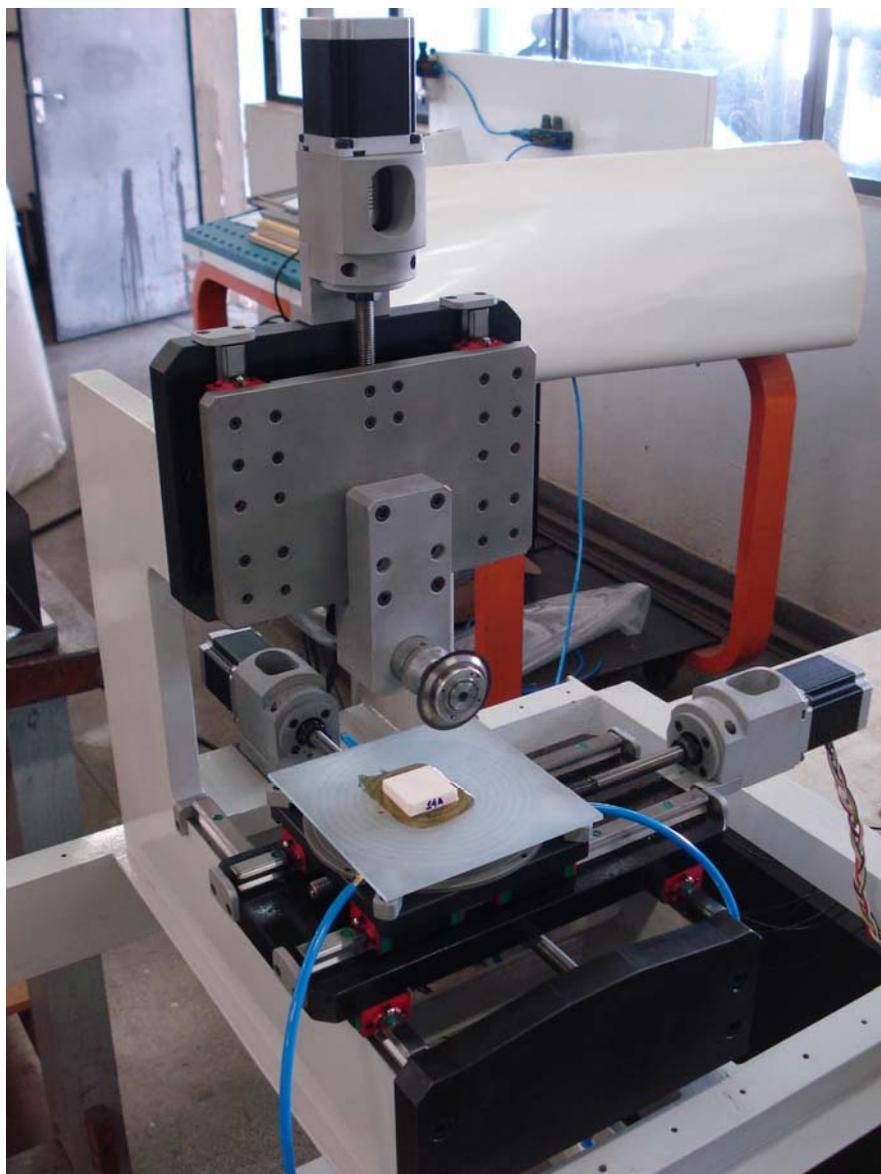
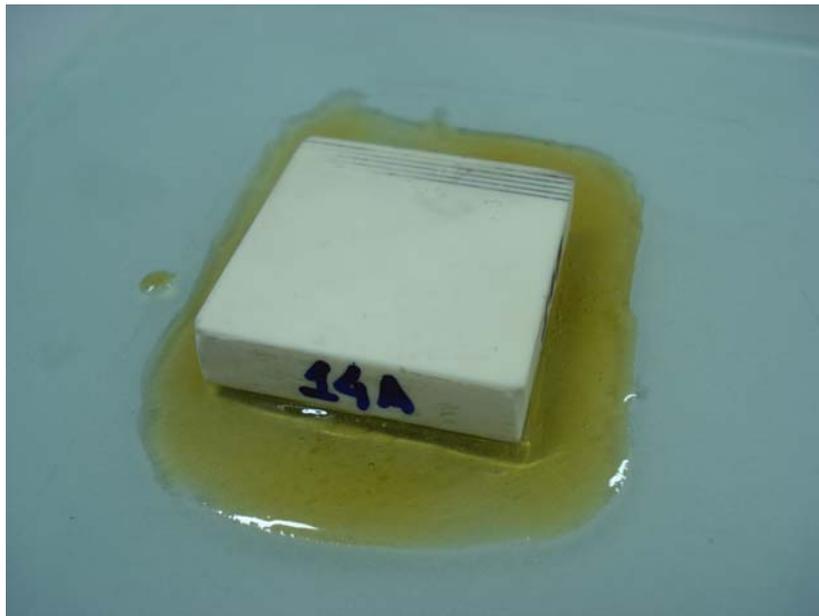


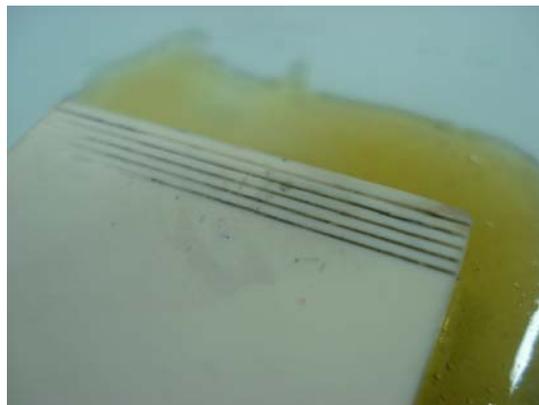
Figura 4.17 – Ensaio.



a)



b)



c)

Figura 4.18 – Corpo de prova – validação mínima máquina de corte. Em a) visão geral, b) e c) visão aproximada dos cortes.

5 CONCLUSÕES

Fabricou-se uma máquina robusta, de precisão, com máquinas operatrizes convencionais, porém precisas. A metodologia de projeto aplicada foi decisiva na geração dos conceitos que compõem o protótipo, principalmente com relação à estrutura simplificada, com uma superfície de referência e duas funcionais.

O projeto, fabricação e validação do protótipo foram obtidos com êxito. Obteve-se o corte de bloco cerâmico com 0,5 mm de profundidade à velocidade de avanço de 1mm/s. Cortes lineares, com arestas integras e espaçamento repetitivo foram observados.

O uso de metodologias de projeto na construção do projeto da minimáquina de corte foi fundamental devido à organização na concepção, nas tomadas de decisões e no andamento do projeto.

Experimentos preliminares de controle com o corte de cerâmica de alumina demonstraram que a algumas variáveis como: profundidade de corte e velocidade de avanço, quando excessivas (condições agressivas) podem acarretar danos na qualidade do corte e integridade do substrato a ser fatiado. Foi observado que bem antes da perda de linearidade houve a introdução de 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, bem como o aumento da amperagem do *spindle* (potência requerida), podendo ser um bom parâmetro de avaliação do desempenho de corte.

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, e isto se deve ao aumento da rigidez dinâmica do disco de corte com o aumento da rotação (do disco).

O corte de 1 mm de profundidade, realizado no ensaio de validação demonstrou um grande desgaste do disco, em torno de 0,05mm no diâmetro em apenas um passe de 34mm. 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.

Apesar dos cortes terem sido realizados a 1 mm/s de avanço, o que caracteriza o corte em uma zona instável, como citado nos estudos preliminares; a linearidade se apresentou de forma qualitativamente aceitável .

Neste experimento de validação do protótipo, verificou-se que, para corte de materiais duros como a alumina o torque de 0,1Nm a 45000 rpm, é insuficiente para trabalhos dentro de um regime estável em espessuras de substratos acima de 0,5mm.

O protótipo projetado e fabricado, apesar do projeto econômico, é capaz de fornecer informações acuradas para o projeto de equipamentos específicos ou de alta capacidade para um grande espectro de trabalho. Isto é devido ao projeto estrutural e a qualidade de fabricação que não foi dimensionada para baixo custo e sim para alto desempenho.

5.1 - Sugestões para trabalhos futuros

O êxito deste projeto estimula estudos nas áreas de projeto de máquinas e corte de materiais. Assim, é interessante citar:

- Aperfeiçoamento do protótipo, substituindo os fusos por fusos de esferas recirculantes. Substituição do sistema de movimentação, a fim de obter menor resolução e potencializar exatidão e precisão. Substituição do *spindle* de mancais de rolamento, por um de mancais aerostáticos de maior potência, viabilizando o corte em maiores profundidades e maiores velocidades de avanço. Aumento da potência de refrigeração do corte, aumentando a vida do disco abrasivo. Estudo do modo de vibrar da máquina;
- Corte e estudo de silício, principalmente com relação às mudanças que o processo de corte pode provocar na estrutura do material;
- Estudos sobre o processo de corte de produtos multicamadas e *fuel cell*.

6 REFERÊNCIAS

ADACHI, T.; MATSUMARU, K.; ISHIZAKI, K. Theoretical estimation of dicing blade grindability for different abrasive grain sizes. ISSN, v. 2, junho de 2006.

BACK, N. **Metodologia de projeto de produtos industriais**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1983.

BAXTER, M. **Projeto do produto**. Segunda edição revisada. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998.

BISHOP, W. L.; SUMMERS, D. M.; LICHTENBERGER, A. W. Precision techniques for whole wafer dicing and thinning of superconducting mixer circuits. **IEEE transactions on applied superconductivity**, v. 11, n 1, march 2001.

BORGES, E. N. **Dicing Machine**. Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso. EESC – USP. São Carlos. 2004.

CHEUNG, A. T. (2005). Dicing advanced materials for microelectronics. **Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces**, p.149 – 152, march 2005.

COREY, M. D. Laser material processing in microelectronics manufacturing: status and near-term opportunities. **SPIE Conference on Photon Processing in Microelectronics and Photonics** . v4. p.200-214. 20 de março de 2007.

CSILLAG, J. M. **Análise do Valor**. Editora Atlas S.A., 1995.

Cutting technology seminar. Disponível em: <www.kikuden.co.jp/company/pdf/CuttingTechnologySeminar2002.pdf>. Acessado em: 17 de novembro de 2008.

DE CONTI, H. C. **Análise da cadeia produtiva de serviços em tecnologia da informação: oportunidades de negócios e inovação**. Brasília: Fundação Getúlio Vargas, 2006. 92 p.

Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP. São Carlos: Biblioteca Central, 2004.

DISCO CORPORATION. **Operation Manual**: Automatic Dicing Saw DAD3350: catálogo. 2007. 400 p.

DISCO CORPORATION. **Data Maintenance Manual**: Automatic Dicing Saw DAD3220, 3230, 3350, 3430: catálogo. 2007. 400 p.

DISCO CORPORATION. **Technical Reference**: Automatic Dicing Saw DAD3350: catálogo. 2003. 120 p.

DUDUCH, J. G. **Notas de aula**: Projeto de Máquinas de Precisão. EESC – USP, São Carlos, 2006.

EFRAT, U. Optimizing the wafer dicing process. **Electronic Manufacturing Technology Symposium**, 1993.

FONSECA, A. J. H. **Sistematização do processo de elaboração das especificações de projetos industriais e sua implementação computacional**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

FORTULAN, C. A.; da Silva Jr., C. E.; da Silva, E. J.; Aguiar, P. R.; Bianchi, E. C.; Advanced ceramics: evaluation of the ground surface. **Revista Cerâmica**. v 49, p. 174 – 177, 2003.

FUGITA, H.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; SANCHES, L. E. A; JUNIOR, C. E. S. Contribuição ao estudo da retificação abrasiva de materiais cerâmicos **Cerâmica**, p269 – 275, 2006.

GATZEN, H. H. **Dicing challenges in microelectronics and micro electro-mechanical systems (MEMS)**. *Microsystem Technologies*, v.7, p.151-154, 2001.

GIDEON, L. Process Optimization of Dicing Microelectronic Substrates. Disponível em: <<http://www.kns.com/library/articles/process-opt.htm>>. Acessado em: 13 de outubro de 2008.

HASHISH, M. Singulation of electronic packages with abrasive waterjets. **Journal of Electronic Packaging**, v. 128, p. 479, dezembro, 2006.

ISHIKAWA, Y.; KITAHARA, T.; Present and Future of Micromechatronics. **1997 International Symposium on Micromechatronics and Human Science**. p. 13 – 20, 1997.

KIM, S.; LEE, E.; KIM, N.; JEONG, H. Machining characteristics on the ultra-precision dicing of silicon wafer. **International Journal of Advanced Man. Technology**, v. 33, p. 662 – 667. 2007.

KOENIGSBERGER, F. **Fundamentos do projeto de máquinas ferramentas para usinagem dos metais – Fascículos I, II e III**. Tradução Rosalvo T. Ruffino. São Carlos: EESC/USP, 1978. 129 p.

KÖNIG, W.; WECK, M.; SPENRATH, N.; LUDERICH, J. (1991). **Diamond Machining Tecnology**. Aachen, Fraunhofer – Institute für Produktionstecnologie (IPT), 1991

KOVACEVIC, R.; HASHISH, M.; MOHAN, R.; RAMULU, M.; KIM, T. J.; GESKIN, E. S. State of the art of research and developmente in abrasive waterjet machining. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. v. 119. novembro, 1997.

LERICHE, A.; MOORTGAT, G.; CAMBIER, F.; HOMERIN, P.; THEVENOT, F.; ORANGE, G.; FANTOZZI, G. Preparation and microstructure of zirconia-toughened alumina ceramics. In: *Advances in Ceramics*. Science and Technology of Zirconia III. **The American Ceramic Society, Inc.**, v.24, p1033-1041, 1988.

LIZOTTE, T. Laser Dicing of chip scale and silicon wafer scale packages. **IEEE/CPMT/SEMI 28th International Electronics Manufacturing**, 2003.

LÖVGREN, R. **Product development methods: Leonardo Da Vinci versus modern engineering education**. SEFIrenze, 2002.

LUO, S. Y.; WANG, Z. W. Studies of chipping mechanisms for dicing silicon wafers. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.35, p1206-1218, 2008.

MAMALIS, A. G.; KUNDRAK, J.; GYANI, K.; HORVATH, M. On the precision grinding of advanced ceramics. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2002.

MIZUNO, Masahiro; IYAMA, Toshirou; ZHANG, B. I. 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.

NIEMANN, G. **Elementos de máquinas**. v.1. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1971.

NIEMANN, G. **Elementos de máquinas**. v.2. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1971.

NIEMANN, G. **Elementos de máquinas**. v.3. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1971.

NIX, E. L.; CORBETT, J.; SWEET, J. H.; PONTING, M. (2005). Dicing and grinding of electro-ceramics. Disponível em:<www.loadpoint.co.uk/documents/Dicing_Grinding_Aug_05.pdf>. Acessado em: 12 de maio de 2008

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**. 2ª edição. Editora Bookman, 2006,

OLIVEIRA, J. F. G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação**. Reimpressão. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1998.

PAHL, G. et al. **Projeto na Engenharia**. 6ª edição. Editora Edgard Blücher, 2005.

PERROTET, D.; DURANT, P.; RICHERZHAGEN, B. Water-jet-guided laser technology a damage free dicing solution. **Advanced Packaging**, v. 15, n.6, p24 – 26. 2006.

PORTO, A. J. V.; DA SILVA, H. A. T; DUDUCH, J. G.; RÚBIO, J. C. C.; MONTANARI, L.; JASINEVICIUS, R. G.; DE ALMEIDA, R. G.; SCHROETER, R. B. **Usinagem de ultraprecisão**. São Carlos: Rima Editora, 2004, 239p.

ROZENFELD, H; VALERI, S. G. Gerenciamento de projetos. Disponível em: <http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/Gerenciamento_Projetosv2.html>. Acessado em: 20/12/2008.

SHELLENKENS, P.; ROSIELLE, N.; VERMEULEN, H.; VERMEULEN, M.; WETZELS, S.; PRIL, W. Design for precision: current status and trends. **Annals of the CIRP**. v 47. 1998.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7ª edição. Editora Bookman, 2005,

SLOCUM, A. H. Precision Machine Design. Prentice Hall, 1992.

TANIGUCHI, N. Current status and future trends of ultra-precision machining and ultrafine materials processing. **Annals of the CIRP**, v.32, n.2, p. 579-582, 1983.

UNITED STATE PATENT. BOUCHER, J.N.; BAJUNE. D.E. **Substrate dicing method**. US 2002/0193094 A1. 2002.

UNITED STATE PATENT. Takatoshi Ono. Semiconductor Wafer Dicing Machine. US 4688540, 25/08/1987.

UNITED STATE PATENT. Masayuki Azuma. Dicing Machine. US 5842461, 01/12/1998.

UNITED STATE PATENT. Yinon Degani; Dean P. Kossives. Process for fabricating an integrated circuit. US 5516728, 14/05/1996.

UNITED STATE PATENT. Neo Chee Peng; Tan Hock Chuan; Ho Kian Seng; Chew Beng Chye; Lim Guek Har; Tan Kok Chua. Method for cutting semiconductor wafers. US 6576531 B2, 10/06/2003.

UNITED STATE PATENT.. Stephen W. Smith. Two-dimensional array ultrasonic transducer. US 5329496, 12/07/1994.

UNITED STATE PATENT.. Keiichi Kajiyama; Kentaro Odanaka. Process for manufacturing a semiconductor chip. US 6939785 B2, 06/09/2005.

WESTWIND air bearing technology. Disponível em: <<http://www.westwind.com>>. Acesso em: 10 out. 2008.

YEO, S. H; BALON, S. A. P. High-speed grinding using thin abrasive disks for microcomponents. **Journal of Micromechanics and microengineering**. v12. 2002.

KÖNIG, W.; WECK, M.; SPENRATH, N.; LUDERICH, J. Diamond Machining Technology. **Fraunhofer – Institute für Produktionstechnologie (IPT)**. Aachen – Germany. 1991.

ZHANG, G. M.; KO, W. F.; NG, S. Submerged Precision Machining of Ceramic Material. Machining of Advanced Materials, 1995.

APÊNDICE A

O levantamento bibliográfico inicial pode ser visto resumidamente na tabela a seguir (Tabela 8). Foram usadas as seguintes palavras-chave: *dicing saw*, *dicing machine* e máquina de corte. As fontes foram: Biblioteca EESC / USP, Biblioteca USP (todas as unidades), UFSCAR, UNICAMP, UNESP e a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações Brasileira (IBICT) e o acervo Teses do Mundo – NDLTD.

Tabela 8 – Disponibilidade de literatura pertinente em algumas bibliotecas.

Biblioteca	“Dicing saw”	“Dicing machine”	“Máquina de corte”	“Metodologia de projeto”
EESC / USP	0	0	8	120
USP	0	0	50	1162
UFSCAR	0	0	0	1
UNICAMP	0	0	2	34
UNESP	0	0	13	153
Teses e Dissertações USP	0	1	29	220
IBICT-BDTD	0	1	41	1073
NDLTD – VTLS	0	1	3	908

É importante observar que esses dados são exatos para cada ferramenta de busca e palavra de busca. Os acervos são compostos de livros, revistas, apostilas, e principalmente, dissertações e teses. Muitos desses volumes podem ser encontrados em mais de uma universidade ou podem não ter conteúdo direcionado exatamente ao tema de pesquisa. Portanto, não é possível ter uma quantificação exata da literatura adequada ao tema.

Para verificar o número de vezes que cada tema é citado na internet, foi feita uma consulta ao site de busca GOOGLE ACADÊMICO E GOOGLE.

A Tabela 9 contabiliza os resultados.

Tabela 9 – Pesquisa na internet.

<i>Biblioteca</i>	<i>“Dicing saw”</i>	<i>“Dicing machine”</i>	<i>“Máquina de corte”</i>	<i>“Metodologia de projeto”</i>
GOOGLE ACADÊMICO	4.060	1.130	292	1.020
GOOGLE	150.000	11.000	203.000	73.200

Os sites de procura GOOGLE e GOOGLE ACADÊMICO foram adotados para essa pesquisa devido a sua grande popularidade na internet. Essa pesquisa teve caráter de quantificação inicial, o que faz o uso desses sites uma ferramenta coerente nessa etapa do projeto.

Apesar de ser uma quantificação superficial, algumas conclusões superficiais podem ser obtidas: existem poucas teses e dissertações a disposição quando se fala especificamente em *dicing saw* ou *dicing machine*. As maiores referências sobre o tema devem vir de fontes como artigos ou manuais / catálogos de máquinas, o que ressalta a importância das visitas técnicas e pesquisa detalhada a bancos de dados e revistas relacionadas aos temas. Uma pesquisa superficial sobre os materiais cortados mostrou um valor muito maior de publicações. A princípio, a técnica de corte parece ser conhecida, porém sua aplicação ainda é um campo em desenvolvimento.

Ainda sobre os dados da Tabela 8 é possível verificar que o tema: metodologia de projeto dispõe de farto volume de teses e dissertações, porém, filtros deverão ser usados no refinamento da pesquisa, mostrando um número de referências menor.

Essa pesquisa foi realizada pela primeira vez em janeiro de 2007, repetida em Janeiro de 2008 e mais uma vez refeita em novembro / dezembro de 2008. Entre a primeira pesquisa, e a última, não houve mudança significativa do número de teses e dissertações sobre o tema *“dicing saw”* e *“dicing machine”*. As pesquisas sobre *“máquina de corte”* e *“metodologia de projeto”* tiveram aumento de aproximadamente 3% com relação ao número anterior. Os dados relatados nas tabelas citadas são da última data citada.

A pesquisa na internet pelos sites de busca teve um aumento maior nos últimos dois anos, cerca de 6% no GOOGLE ACADÊMICO e 10% no GOOGLE. Isso

não indica, necessariamente, um aumento do número de citações ou publicações. Referências antigas podem ter sido cadastradas recentemente ou empresas pertencentes ao ramo podem ter criado sites na internet recentemente. A Tabela 9 gera apenas uma impressão do volume de material disponível.

Durante visitas técnicas a empresas envolvidas com o tema do projeto (DISCO HI-TECH AMERICA, DISCO HI-TECH EUROPA GmbH, e EPCOS – Munique / Alemanha), constatou-se que existem vários fabricantes de *dicing saws*, principalmente no estado da Califórnia, EUA, o chamado “vale do silício”. Apesar disso, o líder de mercado é a empresa japonesa DISCO CORPORATION, com cerca de 90% do mercado. A liderança do mercado se deve à inovação e ao uso de tecnologias totalmente automáticas, resultando em baixo custo operacional e grande autonomia dos equipamentos.

A primeira visita ocorreu a DISCO HI-TECH AMERICA, INC. em abril de 2007. Trata-se do principal escritório de vendas nos EUA da empresa DISCO CORPORATION. Nesse escritório também são realizados trabalhos de treinamento e desenvolvimento para alguns clientes. Foram três dias de visita, que constaram, basicamente de: treinamento em operação e manutenção da *dicing saw* modelo DAD3350.

A segunda e a terceira visitas ocorreram junho de 2008, no mesmo dia. A DISCO HI-TECH EUROPE GmbH é o principal escritório da DISCO CORPORATION fora do Japão. Isso se deve a vários fatores como: volume de vendas, um laboratório oficial de desenvolvimento de novas máquinas, desenvolvimento de novos abrasivos (discos e rebolos), serviços de treinamento, serviço de manutenção e atualização de máquinas antigas, prestação de serviço de corte e retificação e desenvolvimentos para alguns clientes.

A EPCOS é um dos maiores compradores de *dicing saw* na Europa e Ásia. Fabricante de termoresistores, termistores, sensores piezoelétricos, sensores multicamadas, etc. É o maior cliente da DISCO HI-TECH EUROPE GmbH. O maior cliente da DISCO CORPORATION é a Intel.

Também foram estabelecidos contatos técnicos com empresas do ramo, como: LOADPOINT LTD., Kulicke & Soffa (K&S), GMN e Colibri. A primeira é um grande fabricante europeu de *dicing saw*. A LOADPOINT LTD. também vende cabeçotes de corte com a marca LOADPOINT Bearings. A K&S produz discos de

corte. A GMN fornece cabeçotes de corte de rolamento e a Colibri, fornece cabeçotes de corte aerostáticos (*spindle*).

Durante essas visitas, ficou claro que a maior aplicação da *dicing saw* é no corte de substratos finos e frágeis de silício e microcomponentes cerâmicos e eletrônicos. Os maiores compradores desse tipo de equipamento são as indústrias norte-americanas, japonesas e européias, instaladas em sua maioria, na Ásia. Na América Latina, os países que se destacam como compradores dessa tecnologia são Brasil e México.

APÊNDICE B

Tabela 5 – Folha de avaliação A1

Laboratório de Tribologia e Compositos (LTC)	Folha de avaliação A1: avaliação dos recursos disponíveis para o desenvolvimento do projeto de <i>dicing saw</i> no LTC / EESC / USP.		Data: Jan. e Fev. 2007		Folha: 1/1	
	Operação	Recursos necessários	Recursos disponíveis	O recurso satisfaz?		Justificativa e ação recomendada
				Sim	Não	
1	Reuniões de grupo.	Sala com mesa e cadeiras, lousa, projetor data show.	Instalações LTC, sala orientador, biblioteca EESC.	X		-
2	Levantamento bibliográfico.	Livros e artigos eletrônicos e impressos, bancos de dados e internet.	Biblioteca EESC, orientador, LTC.	X		-
3*	Cursos para aprofundamento sobre o tema e correlatos (citado em A2)	Recursos financeiros para transporte, estadia e compra de cursos.	Pouco.		X	Financiamento externo, procura por parceiros
4	Visitas técnicas	Recursos financeiros para transporte e eventual estadia	Pouco.		X	Financiamento externo, procura por parceiros
5	Geração de desenhos eletrônicos, relatórios, dissertação, outros.	Computadores, softwares CAD, editores de texto, impressora.	LTC, biblioteca EESC, sala Pró-aluno EESC.	X		-
6	Compra de matérias para construção de protótipo: aço, guias, fusos, motores, sistema de movimentação, etc.	Recursos financeiros.	Pouco.		X	Financiamento externo, procura por parceiros
7	Serviços de usinagem	Fresa, torno, furadeira, plaina, retífica, etc. Profissionais experientes e bem treinados.	LAMAFE	X		
8	Serviços metroológicos	Paquímetro, micrometro, relógio comparador, palpadores, despenho, etc.	LAMAFE	X		
9	Serviços de soldagem	Solda MIG e profissional treinado em soldagem.	Oficina EESC.	X		
10	Serviços de tratamento térmico	Forno para recozimento de grandes proporções.	Não tem.		X	Terceirização, procura por parceiros
11	Serviço de montagem mecânica: montagem de guias e fusos, montagem do equipamento.	Local adequado e profissional qualificado.	LAMAFE, LTC.	X		
12	Serviço de montagem eletro-eletrônica: sistema de movimentação, luz, etc.	Local adequado e profissional qualificado.	LAMAFE, LTC.	X		
13	Checkagem dimensional das peças cortadas – serviço de microscopia	Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microscópio óptico.	IFSC ou IQSC	X		Terceirização, procura por parceiros

Tabela 10 – Folha de avaliação A1

Tabela 6 – Folha de avaliação A2

Laboratório de Tribologia e Compósitos (LTC)		Curso		Folha de Avaliação A2: aumento das competências dos envolvidos no projeto sobre o assunto <i>dicing saw</i>		Data: Jan. e Fev. 2007		Folha: 1/1		
						Responsável: Eng. Luis Antonio Oliveira Araujo		O recurso satisfaz?		Justificativa e ação recomendada
						Sim	Não			
1	Operation and Maintenance DAD 3350	Qualquer período na DISCO HI TECH USA em San Jose (CA – EUA).		Recursos necessários para transporte, estadia. O curso não tem custo.		Pouco.			X	Financiamento externo e/ou procura por parceiros.
2	Servo System DELTA TAU Basic	Semestral na sede da DELTA TAU em Los Angeles (CA – EUA).		Recursos financeiros para transporte, estadia. O curso custa US\$300,00.		Pouco.			X	Financiamento externo e/ou procura por parceiros.
3	Servo System DELTA TAU Advanced	Semestral na sede da DELTA TAU em Los Angeles (CA – EUA).		Recursos financeiros para transporte, estadia. O curso custa US\$300,00.		Pouco.			X	Financiamento externo e/ou procura por parceiros.
4	Sistema servo acionado MP930 YASKAWA	Semestral na sede da YASKAWA do Brasil LTDA. (São Paulo – Brasil).		Recursos financeiros para transporte, estadia. O curso custa R\$850,00.		Pouco.			X	Financiamento externo e/ou procura por parceiros.
5	Projeto de Máquinas de Precisão	Anual na EESC/USP.		Sem custo.		Não se aplica.		X		-

Tabela 11 – Folha de avaliação A2

APÊNDICE D

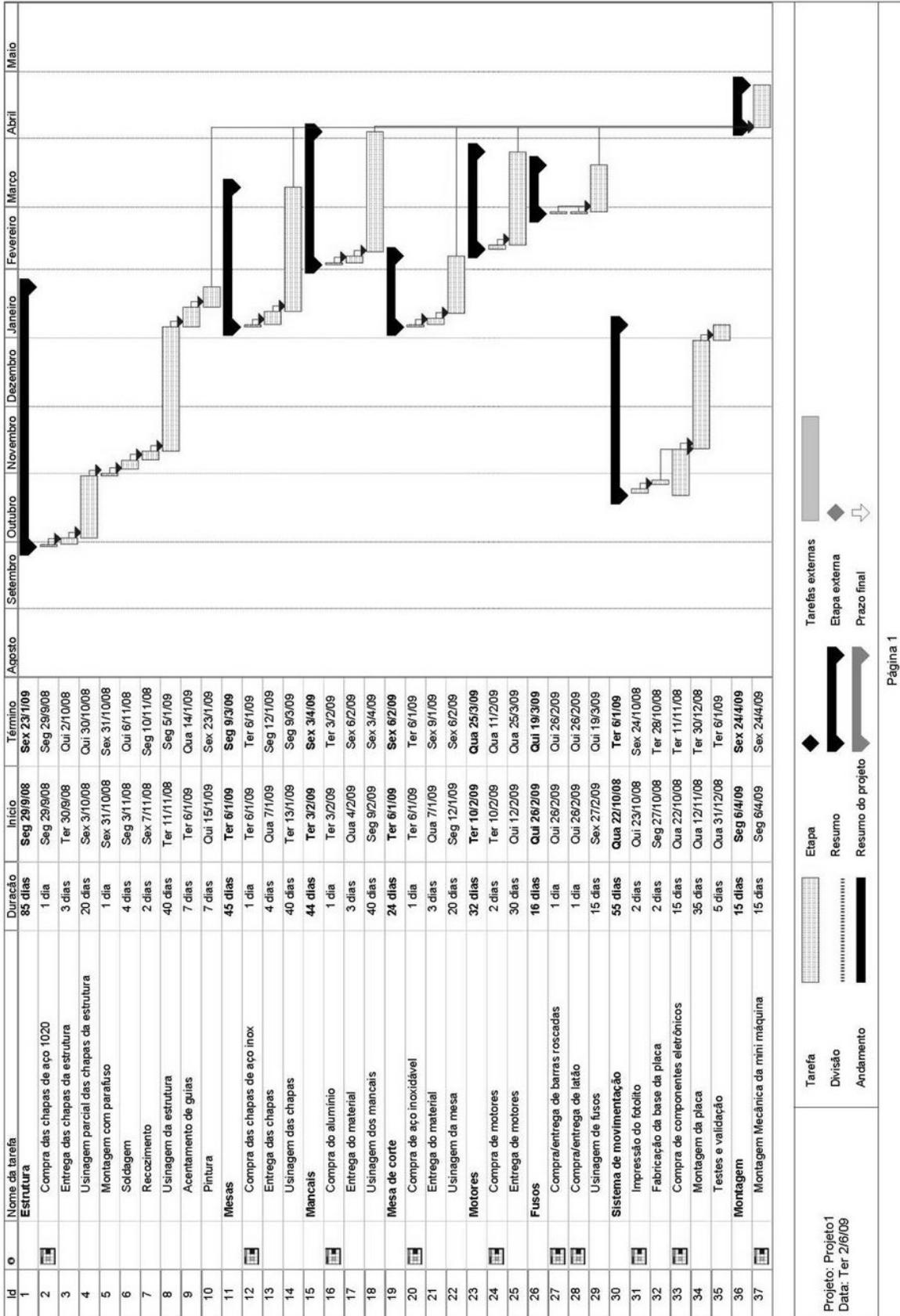


Figura D.1 – Diagrama de Gantt

Figura D.1 – Diagrama de Gantt