

**Adenilson Cristiano Belizário  
André Santana Marques**

**IMPLEMENTAÇÃO DE PROCESSO DE  
USINAGEM E POSICIONAMENTO EM  
ARQUITETURA PARALELA**

**Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para Graduação em  
Engenharia Mecatrônica.**

**São Paulo  
2004**

**Adenilson Cristiano Belizário**  
**André Santana Marques**

nota final  
8,5 (ok e um)



# **IMPLEMENTAÇÃO DE PROCESSO DE USINAGEM E POSICIONAMENTO EM ARQUITETURA PARALELA**

**Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para Graduação em  
Engenharia Mecatrônica.**

**Área de Concentração:  
Engenharia Mecatrônica**

**Orientador:  
Prof. Dr. Tarcisio A. Hess Coelho**

**São Paulo  
2004**

### **5.1. Movimentação Manual**

Esta funcionalidade foi implementada para acionar os atuadores independentemente ou em conjunto, com o intuito de posicionar as cotas hi de acordo a necessidade do usuário de atingir uma posição desejada manualmente.

Para ter acesso a esta funcionalidade o usuário inicia a interface, escolhe no campo 'Modo de Movimentação' a opção 'Manual', como isso, será liberado o acesso ao campo 'Manual' da interface. Neste campo o usuário define qual a posição em mm/50 (um cinquenta avos de milímetros) que se deseja alcançar com os fusos da coluna hi, a velocidade deste deslocamento e quais atuadores serão acionados.

### **5.2. Interpolação Linear**

Já esta opção realiza movimentos lineares que podem ser utilizados no posicionamento da peça e também durante a usinagem do corpo de prova.

Para ter acesso a esta funcionalidade o usuário inicia a interface, escolhe no campo 'Modo de Movimentação' a opção 'Interpolação Linear', como isso, será liberado o acesso ao campo 'Interpolação Linear – inclinação nula' da interface. Neste campo o usuário define qual a posição final que deseja alcançar nas coordenadas Y e Z, e a velocidade deste deslocamento.

Por se tratar de uma máquina paralela experimental e que esta sendo adaptada para o processo de usinagem, temos o inconveniente de termos um espaço de trabalho real muito restrito, portanto, temos uma superfície livre para trabalho que varia em Y = [380; 620] e em Z = [1370; 1480].

### **5.3. Interpolação Circular**

Para realização de usinagem de perfis mais complexos tem a necessidade de uma função primitiva que realize trajetórias curvas, portanto esta função realiza a interpolação de curva de uma circunferência que imprime a mesma nos múltiplos de um oitavo de círculo.

Às nossas famílias

## **AGRADECIMENTOS**

**André S. Marques,**

Agradeço a todos que, de uma forma ou de outra, ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, seja através de participação intelectual ou mesmo proporcionando calma e tranquilidade para que este trabalho pudesse ser realizado. Desse modo, segue meus agradecimentos:

Ao professor Dr. Tarcisio A. Hess Coelho Engenheiro, orientador deste trabalho.

Ao Mestrando Matheus Araújo, Engenheiro, que nos deu auxílio.

Ao aluno Antonio Carlos, que colaborou resolvendo alguns problemas em seu trabalho de formatura.

Ao aluno Adenilson Cristiano Belizário, que esteve comigo neste empreitada de elaboração deste trabalho de formatura. Bom, acho que terminamos!

Aos funcionários do Laboratório do PMR.

Aos professores participantes da banca.

A todos os amigos e colegas alunos da Escola Politécnica da USP.

À minha família, por me proporcionar (quase sempre) a tranquilidade necessária para a elaboração deste trabalho, e a Zenaide Siqueira Marques, minha esposa, pela paciência.

À Phoenix Contact, pelo auxílio técnico na realizada neste trabalho.

**Adenilson Cristiano Belizário,**

Agradeço a todos que nunca deixaram de acreditar em nós, e que concluir este trabalho e o curso de engenharia era possível. Agradeço:

Ao professor Dr. Tarcisio A. H. Coelho, nosso orientador, pelos conselhos, sugestões, atenção, amizade e muitas vezes paciência conosco.

Ao Professor Dr. Fábio G. Cozman, que sem sua ajuda em meu processo de transferência, não seria possível chegar a esta etapa.

A todos que trabalham ou trabalharam neste trabalho até agora, especialmente ao aluno de mestrado Matheus Araújo que esteve conosco em todas as etapas deste processo e também aos funcionários e técnicos do laboratório que participaram ativamente deste trabalho.

Ao grande amigo André S. Marques, primeira pessoa que conheci na Escola Politécnica e grande companheiro nesta empreitada.

Aos meus Pais, Nilson C. Belizário e Ana Maria D. G. Belizário, e a meus Irmãos, Francine C. Belizário e Jefferson C. Belizário.

À Isomec Comércio e Serviços Ltda que nos forneceu suas instalações e apoio de funcionários para a realização deste.

Aos meus grandes amigos Edison, Osvaldo, Ronaldo, Gislaine, Marcos, Santos, Antunes, José S. e todos os outros que ajudaram neste processo.

À todos os amigos da Escola Politécnica, em especial a alguns colegas do atual 4º ano, onde formamos um grupo de amizades para a vida toda.

À Universidade Paulista, onde comecei a cursar engenharia e a todos os seus docentes.

À Escola Politécnica por nos dar a oportunidade de concluir nossa formação com qualidade e por abrir a oportunidade da transferência externa para vagas remanescentes.

Aos professores da banca examinadora pela atenção, sugestões e oportunidade.

A tudo aquilo que me protege, me guia e me dá força para seguir lutando.

## Sumário

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>I - Lista de Figuras.....</b>                                                       | <b>8</b>  |
| <b>II - Lista de Tabelas .....</b>                                                     | <b>10</b> |
| <b>III - RESUMO.....</b>                                                               | <b>11</b> |
| <b>IV - ABSTRACT.....</b>                                                              | <b>12</b> |
| <b>1. Introdução .....</b>                                                             | <b>13</b> |
| 1.1 Considerações Preliminares .....                                                   | 13        |
| 1.2 Objetivos .....                                                                    | 14        |
| <b>2. Informações gerais.....</b>                                                      | <b>15</b> |
| 2.1 Discussão sobre máquinas de cinemática paralelas .....                             | 15        |
| 2.2 Conceitos Básicos sobre mecanismos paralelos.....                                  | 15        |
| 2.3 Origem das máquinas paralelas.....                                                 | 16        |
| 2.5 Vantagens em relação às máquinas com movimentação linear (guias lineares).....     | 18        |
| 2.6 Vantagens em relação às máquinas seriais (robôs seriais).....                      | 18        |
| 2.7 Desvantagens em relação às máquinas com movimentação linear (guias lineares) ..... | 19        |
| 2.8 Desvantagens em relação às máquinas seriais (robôs seriais).....                   | 19        |
| 2.9 Máquinas combinadas: Movimentação linear com fusos e paralela .....                | 19        |
| 2.10 Algumas Máquinas pesquisadas existentes no mercado .....                          | 20        |
| <b>3. A máquina de cinemática paralela “Tetraglide”.....</b>                           | <b>22</b> |
| 3.1. Histórico da plataforma .....                                                     | 22        |
| 3.2. Informações Físicas da plataforma.....                                            | 23        |
| 3.3 Identificação dos Conjuntos mecânicos .....                                        | 26        |
| 3.4. Espaço de trabalho da máquina .....                                               | 27        |
| 3.5. Diagrama de Bloco .....                                                           | 28        |
| 3.6. Graus de liberdade segundo Kutzbach-Grübler .....                                 | 29        |
| 3.7. Análise preliminar .....                                                          | 29        |
| 3.8. Problemas apresentados na plataforma do laboratório.....                          | 30        |

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.9. Manutenção corretiva realizada.....                                       | 30        |
| 3.9.1. Resolução do problema da placa .....                                    | 30        |
| 3.9.2. Resolução do problema do conjunto 4 .....                               | 31        |
| 3.10. Modificações Mecânicas .....                                             | 31        |
| 3.10.1. Resolução do problema do acoplamento.....                              | 31        |
| 3.10.2. Nova disposição das juntas.....                                        | 32        |
| 3.10.3. Reforço nos acoplamentos.....                                          | 34        |
| 3.11. – Sistema de Usinagem proposto .....                                     | 35        |
| <b>4. - Fundamentação Teórica.....</b>                                         | <b>36</b> |
| 4.1. – Cinemática Direta e Cinemática Inversa .....                            | 36        |
| 4.2. Jacobiano e velocidade .....                                              | 39        |
| 4.3. Forças de Usinagem .....                                                  | 40        |
| 4.3.1 Furação .....                                                            | 40        |
| 4.3.2 Fresamento .....                                                         | 44        |
| 4.3.3. Força na interação Ferramenta-Peça no fresamento, segundo Raszl G. .... | 46        |
| <b>5. Interface com o usuário e Simulador de trajetória .....</b>              | <b>48</b> |
| 5.1. Movimentação Manual.....                                                  | 49        |
| 5.2. Interpolação Linear.....                                                  | 49        |
| 5.3. Interpolação Circular .....                                               | 49        |
| 5.4. Simulador de trajetória .....                                             | 52        |
| <b>6. Resultados Experimentais .....</b>                                       | <b>57</b> |
| 6.1. Primeira série de ensaios .....                                           | 57        |
| 6.2. Segunda série de ensaios .....                                            | 63        |
| 6.3. Ensaios após implementação de trajetórias e sistema de usinagem .....     | 72        |
| <b>7. Discussão dos Resultados.....</b>                                        | <b>74</b> |
| <b>8. Conclusão .....</b>                                                      | <b>76</b> |
| <b>9. Referência Bibliografias .....</b>                                       | <b>78</b> |
| <b>V - ANEXOS .....</b>                                                        | <b>81</b> |

|                                                                                                |                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b><u>ANEXO A – Código do programa de movimentação da plataforma em Visual Basic .....</u></b> | <b><u>81</u></b>  |
| <b><u>ANEXO B - Códigos Fonte do Simulador Linear e Circular .....</u></b>                     | <b><u>119</u></b> |
| <b><u>ANEXO C – Código da figura 39.....</u></b>                                               | <b><u>129</u></b> |
| <b><u>ANEXO D – Suporte de Dremmel para Usinagem - Desenhos .....</u></b>                      | <b><u>130</u></b> |

## ***I - Lista de Figuras***

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Plataforma Proposta por Gough.....                                                                   | 17 |
| Figura 2 – Plataforma Proposta por Stewart/ Cappel.....                                                         | 17 |
| Figura 3 – Centro de Usinagem Stahhag Heckert: Bauheire Kinematic .....                                         | 20 |
| Figura 4 – Fresa CNC Hexel Hexabot .....                                                                        | 20 |
| Figura 5 – Plataforma existente em nosso Laboratório .....                                                      | 25 |
| Figura 6 – Identificação do Conjunto.....                                                                       | 26 |
| Figura 7 – Espaço de trabalho teorico da tese do RASZL, G. ....                                                 | 27 |
| Figura 8 - Espaço de trabalho teorico após as alterações. ....                                                  | 28 |
| Figura 9 – Diagrama de Blocos .....                                                                             | 28 |
| Figura 10 – Diagrama cinemático da plataforma .....                                                             | 29 |
| Figura 11 – Cálculo Trigonométrico.....                                                                         | 33 |
| Figura 12 – Disposição das juntas na mesa após as mudanças mecânicas .....                                      | 34 |
| Figura 13 - Coordenadas e parâmetros do mecanismo paralelo. Cadeia cinemática adotada.....                      | 36 |
| Figura 14 – J-ésima cadeia cinemática ativa.....                                                                | 37 |
| Figura 15 – Esforços na Furação .....                                                                           | 41 |
| Figura 16 – Interface com o usuário.....                                                                        | 48 |
| Figura 17 – Convenção dos octantes no sentido horário .....                                                     | 50 |
| Figura 18 – Convenção dos octantes no sentido anti-horário .....                                                | 51 |
| Figura 19 – Mascara da planilha de interface do simulador .....                                                 | 52 |
| Figura 20 – Trajetória linear.....                                                                              | 54 |
| Figura 21 – Trajetória Circular .....                                                                           | 55 |
| Figura 22 – Trajetória combinada de seguimento de reta e circular .....                                         | 55 |
| Figura 23 – Trajetória combinada de seguimento de reta e circular, para obtenção de formas mais complexas ..... | 56 |
| Figuras 24 e 25: Furação em parafina .....                                                                      | 59 |
| Figuras 26 e 27: Furação em nylon .....                                                                         | 60 |
| Figuras 28 e 29: Furação em alumínio.....                                                                       | 61 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Figuras 30 e 31: Fresamento em parafina.....                          | 61 |
| Figuras 32 e 33: Fresamento em parafina.....                          | 62 |
| Figuras 34 e 35: Fresamento em nylon.....                             | 63 |
| Figura 36 – Gráfico Distorção X Rotação.....                          | 68 |
| Figura 37 – Gráfico Força X Distorção.....                            | 69 |
| Figura 38 – Potência de Corte X Rotação.....                          | 69 |
| Figura 39 – Trajetória de uma função senoidal.....                    | 75 |
| Figura 40 – Sistema de Usinagem Implantado.....                       | 76 |
| Figura 41e 42 – Sistema de usinagem implantado fresando parafina..... | 77 |
| Figura 43 – Sistema de usinagem implantado fresando nylon.....        | 77 |

## ***II - Lista de Tabelas***

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Máquinas existentes no mercado com arquitetura paralela ..... | 21 |
| Tabela 2 - Coordenadas conforme o tipo de cinemática .....               | 36 |
| Tabelas 3, 4 e 5 – Parâmetros de Furação .....                           | 42 |
| Tabela 6 – Parâmetros de Furação .....                                   | 43 |
| Tabela 7 - Parâmetros de Furação .....                                   | 43 |
| Tabela 8 – Parâmetros de Fresamento .....                                | 44 |
| Tabela 9 – Parâmetros de Fresamento .....                                | 45 |
| Tabela 10 – Propriedades de alguns Materiais .....                       | 46 |
| Tabela 11 – Características da ferramenta de corte .....                 | 47 |
| Tabela 12 – Parâmetros do processo .....                                 | 47 |
| Tabela 13 e 14 – Parâmetros do ensaio de furação .....                   | 67 |
| Tabela 15 – Erros profundidade Nylon .....                               | 72 |
| Tabela 16 – Erros profundidade Alumínio .....                            | 72 |
| Tabela 17 – Erros na largura – nylon.....                                | 73 |

### **III - RESUMO**

A crescente demanda por melhorias tecnológicas para uma maior produtividade e competitividade no mercado mundial, incentivam e impulsionam os estudos e desenvolvimentos de novas tecnologias em diversos setores da economia, e não seria diferente no setor da indústria de base. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é analisar a viabilidade de aplicação de um sistema de usinagem para uma plataforma em arquitetura paralela já existente e realizarmos ensaios.

Na primeira fase deste projeto analisamos o potencial da Máquina e pesquisamos os fabricantes existentes deste tipo de arquitetura.

Já nesta segunda fase, solucionamos problemas na plataforma e realizamos as modificações necessárias para aumentar a rigidez. Para ratificarmos a aplicação, ensaiamos a plataforma nos processos de furação e fresamento, para alguns materiais e criamos trajetórias de movimentação global.

## ***IV - ABSTRACT***

The increasing demand for tecnologys improvements for a better productivity and competitiveness on world market, stimulate the works and developments of new tecnologys in much economy areas, and has not been different in basic industry. In this contest, the main objective of this work has been analysing the viability of a machining system for a plataform with parallel architecture and do tests.

In this first stage, we were analyzing the machine potential and were searching these existing manufacturers of this type of architecture.

Now, in this second stage, we has solved problem in plataform and has done the necessary modifications for increase the rigidity. In this work we have done milling drilling tests for certify the results and create global trajectories.

## **1. Introdução**

### **1.1 Considerações Preliminares**

Este trabalho foi desenvolvido na plataforma em cinemática paralela construída no trabalho de formatura “Sistema de Posicionamento por Cinemática Paralela” pelos alunos Daniel T. B. Moraes e Marcelo Boczko orientados pelo professor Tarcísio A. H. Coelho, chamada de tetraglide, que significa máquina cinemática movimentada por quatro atuadores em paralelos, nome derivado da comercial triaglide, que é uma máquina cinemática movimentada por três atuadores em paralelo.

Desde o mecanismo base para a construção desta máquina de cinemática paralela, já se antevia a possibilidade de utilizá-la como máquina ferramenta. Desde então, a idéia vem sendo amadurecida ao longo dos trabalhos que foram realizados nesta plataforma, criando ferramentas para viabilizar esta aplicação.

Neste trabalho procuramos dar seqüência aos trabalhos anteriores e fazer análises para adaptação desta plataforma para uso como máquina ferramenta sem que ela perca suas funções atuais.

Primeiramente foi necessário ter contato com a máquina, porém esta apresentou problemas de funcionamento devido ao tempo que ficou desligada e alguns maus contatos elétricos. Problemas estes, solucionados ao longo de nossos trabalhos e que serão apresentados no corpo deste relatório.

Para dar seqüência aos nossos trabalhos foi necessário aprofundar os estudos de posicionamento, pois era necessário criar um sistema de coordenadas globais, através de interpolações lineares e circulares. Isto implementado, e como o apoio de um simulador de trajetórias, desenvolvido em Excel, com o qual antevíamos os posicionamentos, possibilitou a realização dos ensaios de furação e fresamento.

Nestes ensaios realizados, nos proporcionou a possibilidade de verificar o comportamento estrutural da máquina e das funcionalidades implementadas.

## 1.2 Objetivos

Melhorias na plataforma existente

- Resolução de problemas nos dispositivos atuais
- Acoplamento de novas peças e otimização de algumas já existentes
- Criação de um sistema global de movimentação
  - Interpolação Linear
  - Interpolação Circular
  - Programa simulador de trajetórias.
- Estudo de viabilidade de um sistema de usinagem para a plataforma
- Realização de ensaios.
  - Ensaios em máquinas do laboratório do PMR com diferentes materiais para constataremos a possibilidade de aplicação da plataforma existente.
- Construção de dispositivo adaptado para integração de ferramenta com a máquina

## **2. Informações gerais**

### **2.1 Discussão sobre máquinas de cinemática paralelas**

As máquinas de arquitetura paralela representam maior versatilidade e maior funcionalidade. A arquitetura paralela pode melhorar consideravelmente a construção de máquinas ferramentas e centros de usinagem. Porém há muito a fazer, pois a tecnologia existente hoje é passível de aprimoramento.

Na indústria existem poucas empresas, localizadas em alguns países que dispõe deste tipo de tecnologia e quase todos esses conhecimentos são protegidos por patentes internacionais, que impedem a divulgação imediata destas tecnologias.

### **2.2 Conceitos Básicos sobre mecanismos paralelos**

Por se tratar de uma tecnologia em desenvolvimento, se faz necessário a apresentação de alguns conceitos muito comuns neste contexto:

- **Mecanismo:** Sistema de corpos interligados para transportar forças e movimentos.
- **Mecanismo Paralelo:** Mecanismo de cadeia fechada em que a plataforma móvel é conectada à base por pelo menos duas cadeias cinemáticas independentes.
- **Mecanismo Esférico:** Mecanismo em que todos os pontos ligados descrevem caminhos esféricos.
- **Manipulador:** Sistema para absorver e controlar movimentos de objetos.
- **Cadeia Cinemática:** Conjunto de vínculos e juntas.
- **Robô:** Sistema mecânico que realiza operações de manuseio e automação
- **Robô Paralelo:** Um robô cujos braços (eixos primários) possuem três junta prismáticas concorrentes.
- **Plataforma de Gough-Stewart:** Mecanismo paralelo com 6 graus de liberdade e 6 cadeias cinemáticas idênticas compostas por juntas universais, atuadores prismáticos e juntas esféricas.
- **Hexapod:** Plataforma baseada em um inseto de 6 patas.

## **2.3 Origem das máquinas paralelas**

Os trabalhos teóricos sobre mecanismos paralelos, principalmente sobre plataformas com 6 graus de liberdade iniciaram há séculos atrás, especialmente por ingleses e franceses obcecados com estudos em poliedros.

A primeira plataforma patenteada que se tem notícia foi desenvolvida em 1928 por James E. Gwinnett baseada em mecanismos paralelos esféricos. O primeiro robô paralelo industrial patenteado foi um com spray, sua patente foi negada em 1934 e aprovada em 1942 seu projetista era Willard L.G. Pollard Jr.

Em 1947 o primeiro Hexapod octaédrico foi inventado, uma máquina universal para testes em pneus pelo Dr. Eric Gough em Birmingham. Em 1965, também na Inglaterra destaca-se um paper sobre uma plataforma de simuladores de vôos com 6 graus de liberdade, esta foi denominada plataforma Stewart. Existiam grandes semelhanças entre a máquina de pneus de Gough e o simulador de Stewart. Em paralelo um outro engenheiro se destacou, foi o Sr. Klaus Cappel, que desenvolveu um sistema de vibrações com 6 graus de liberdade. Por isso a plataforma Stewart hoje também pode ser referida por plataforma de Gough e plataforma de Cappel. Os três engenheiros deram uma grande contribuição para os resultados atuais de mecanismos paralelos.

As máquinas paralelas são uma tecnologia recente em que estudos aprofundados começou há apenas duas décadas e nos possibilitaram grandes avanços na indústria mecânica, como por exemplo, à possibilidade da fabricação de centros de usinagem. Estas máquinas apresentam alta velocidade, alta repetição, alta acurácia e boa rigidez.

## **2.4 Plataforma de Stewart, Triaglide e Tetraglide**

A Plataforma de Stewart é composta por seis atuadores que ligam uma base estacionária a uma plataforma móvel. Sendo os movimentos dos atuadores completamente desvinculados, a plataforma móvel pode ser posicionada com seis graus de liberdade.

Baseada na Plataforma de Stewart foram desenvolvidas simplificações comerciais, surgindo plataformas com três ou quatro atuadores. Pois para algumas aplicações estes eram suficientes. Um modelo comercial é a Triaglide com três atuadores, e a plataforma existente foi baseada na triaglide, porém foi adicionado mais um atuador, e por isso, passando a ser denominada como Tetraglide.



Figura 1 – Plataforma Proposta por Gough

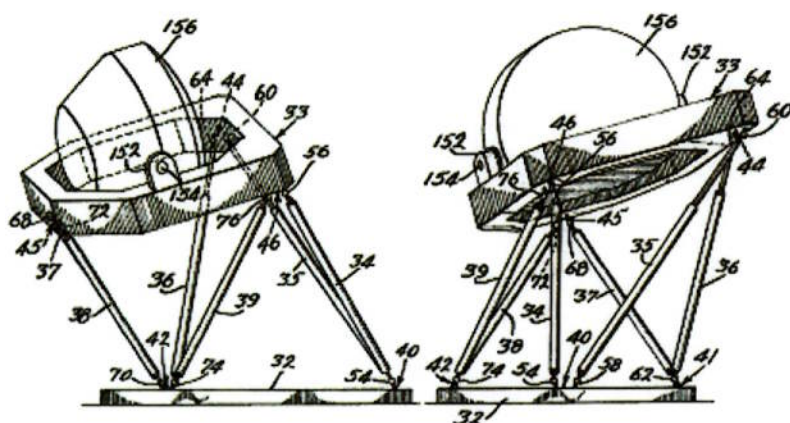


Figura 2 – Plataforma Proposta por Stewart/ Cappel

## **2.5 Vantagens em relação às máquinas com movimentação linear (guias lineares)**

- Diminuição de dispositivos:
  - Dispositivos representam maiores custos para a fabricação de peças e maior complexidade na produção.
- Diminuição de sub-jobs:
  - Sub-jobs é um trabalho feito com a peça em uma determinada fixação. Cada fixação demora um bom tempo para preparação da máquina e alinhamento da peça. A redução deste tempo aumenta consideravelmente a produtividade diminuindo o tempo de produção de cada peça.
  - Esta diminuição ocorre na arquitetura paralela, pois possibilita a realização de trabalhos em diferentes planos da peça a ser usinada, já que a plataforma é móvel.
- Possibilidade de trabalho em perfis complexos

## **2.6 Vantagens em relação às máquinas seriais (robôs seriais)**

- Maior rigidez
  - Devido à distribuição de forças aplicadas aos atuadores
- Menor erro de posicionamento e orientação
  - Devido ao paralelismo dos atuadores, não acarretando na propagação de erros de posicionamento de cada atuador.
- Menor Inércia
  - Devido a não serialização dos atuadores a massa associada aos acionadores é menor, melhorando a performance dinâmica.
- Alta precisão
- Altas velocidades de trabalho
  - Devido à menor inércia

## **2.7 Desvantagens em relação às máquinas com movimentação linear (guias lineares)**

- Maior dificuldade de controle
- Menor volume de trabalho
- Presença de posições singulares
- Volume de trabalho não cúbico
- Maior preço

## **2.8 Desvantagens em relação às máquinas seriais (robôs seriais)**

- Maior dificuldade de Controle (é necessário movimentar todos os atuadores para um simples movimento retilíneo)
- Produção de poucas máquinas e restrita a poucos países
- Dificuldade de manutenção e Menor volume de trabalho
- Presença de posições singulares, muitas vezes instáveis.

## **2.9 Máquinas combinadas: Movimentação linear com fusos e paralela**

Uma nova tendência mundial é a fabricação de máquinas com movimentos lineares e paralelos e combinados. Guias lineares são mais fáceis de controlar e podem realizar movimentos para exigências simples e movimentos paralelos são melhores para realizar superfícies complexas. Geralmente um dos eixos é movimentado por guias lineares, onde estaria a ferramenta e a peça é movimentada através de uma arquitetura paralela. Em alguns novos centros de usinagem a ferramenta é movimentada através de arquitetura paralela e a peça através de movimentação serial.

Existia uma grande desconfiança sobre este tipo de combinação devido a imprecisões e acúmulo de erros, mas isso vem sendo desmistificado. É uma solução para aumento de espaço de trabalho.



Figura 3 – Centro de Usinagem Stahlag Heckert: Bauheire Kinematic

## 2.10 Algumas Máquinas pesquisadas existentes no mercado

Segue abaixo alguns exemplos de maquinas com arquitetura paralela existente no mercado:

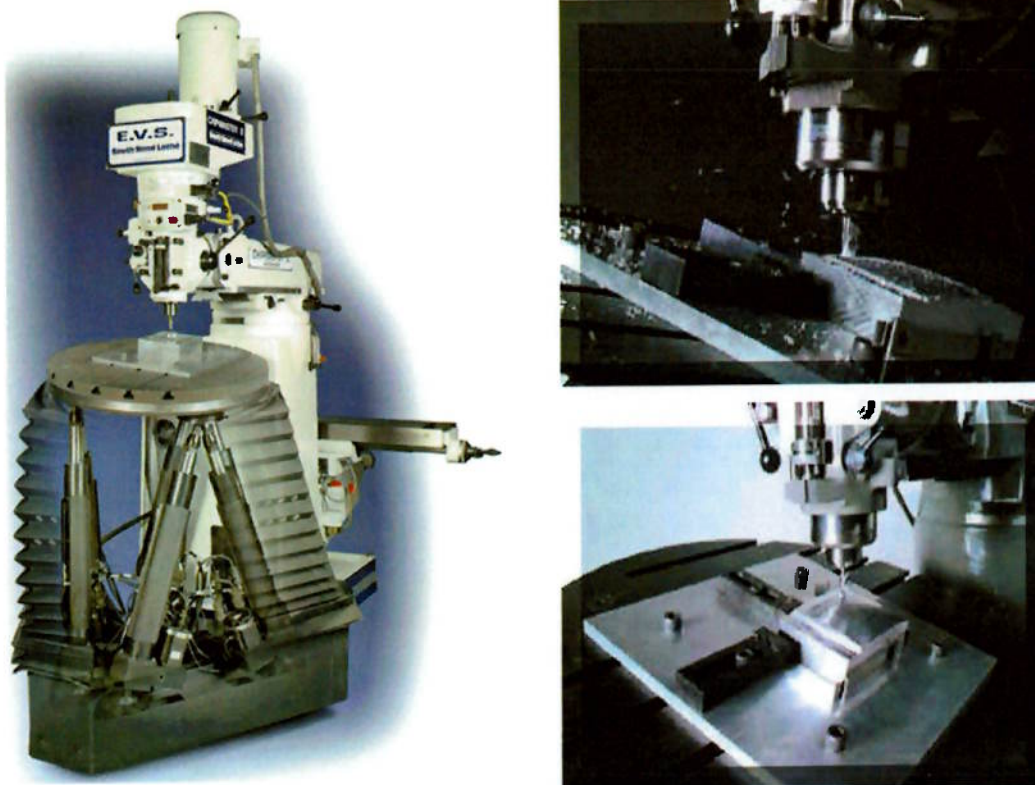


Figura 4 – Fresa CNC Hexel Hexabot

Já a tabela 1, segue um comparativo de alguns modelos de diferentes fabricantes, com respeito a quantidade de eixos, grau de liberdade, precisão e acurácia:

| Máquina                                                       | Origem   | Fabricante         | Eixos | GL  | Precisão $\mu$ m | Acurácia $\mu$ m |
|---------------------------------------------------------------|----------|--------------------|-------|-----|------------------|------------------|
| Fresa CNC<br>HEXABOT                                          | USA      | Hexel              | 5     | 6   | 10               | 25               |
| Microposicionador<br>S.A.M.M                                  | USA      | Hexel              | 6     | 6   | 6,3              | 10,2             |
| Centros de<br>Usinagem e<br>Grandes máquinas<br>sob encomenda | USA      | Ingersoll          | 3-6   | 3-6 |                  |                  |
| Centros de<br>Usinagem                                        | Japão    | Okuma              | 3-6   | 3-6 |                  |                  |
| Usinagem em Al<br>TRICEPT 845                                 | Suécia   | Smt Tricept        | 5     | 6   | 50               | 10               |
| Centros de<br>Usinagem                                        | Alemanha | Starragheckert     | 3-6   | 3-6 |                  |                  |
| Medição<br>Omni Gage                                          | Rússia   | Tetra<br>Precision |       |     | 0,1              | 0,1              |

Tabela 1 - Máquinas existentes no mercado com arquitetura paralela

Desta pesquisa realizada constatamos que a tecnologia aplicada nesta arquitetura é restrita a poucos fabricantes e também pouco divulgada, pois sendo uma tecnologia de vanguarda os fabricantes que investiram muito capital para desenvolvê-la até o nível atual, portanto os investidores estão a explorando comercialmente para ter o retorno deste investimento.

### **3. A máquina de cinemática paralela “Tetraglide”**

#### **3.1. Histórico da plataforma**

A idéia da plataforma de Stewart simplificada de nosso laboratório surgiu em 1988 através de um mecanismo elaborado em um trabalho de formatura pelo aluno André Mitsuyoshi Oura, sob orientação do professor Tarcísio A. H. Coelho.

No ano seguinte o trabalho foi continuado com o objetivo de criar um simulador de vôos através do trabalho dos alunos Danielle Morita, Fábio Fukunaga, Maurício Dias Menezes Mazza e Rafael Salla Paulino.

No ano de 2000 foi dado o mais importante passo. O mecanismo foi aprimorado, tendo algumas características mecânicas reformuladas, de maneira a suportar maiores esforços. Foram acrescentados o sistema de controle e o conjunto de acionadores, capacitando o mecanismo de movimento autônomo e controlado. Através de um acordo de cooperação entre a USP, a SEW e a Phoenix Contact tornou-se possível à implementação desta plataforma.

Através deste acordo, a empresa SEW doou quatro motores, quatro conversores de frequência e periféricos e a empresa Phoenix Contact doou módulos de comunicação Interbus e o software de implementação do sistema. A Phoenix Contact procura estar até hoje em contato com o projeto. Esta plataforma foi implementada pelos alunos Daniel T. B. Moraes e Marcelo Boczko no trabalho de formatura de 2000.

O foco de aplicação desta máquina a partir do equipamento “labirinto” (MORAS, D.T.B., BOCZKO, M., 2000) com a finalidade específica de lazer e entretenimento para visitantes de stands em feiras de produtos industriais, trabalho este continuado pelo mestre RASZL, G., 2003 com o objetivo de transformar esta máquina em um protótipo de máquina ferramenta não-convencional, infelizmente esta máquina não foi implementada, porém neste trabalho foi avaliado o espaço de trabalho da plataforma, os esforços de interação entre ferramenta e peça acoplada na plataforma. Foi também avaliada a otimização do espaço de trabalho e sugerido novos temas para futuras obras.

Em dezembro de 2004, neste trabalho, foi realizado o primeiro ensaio de usinagem através de trajetórias lineares.

Todos estes trabalhos foram orientados, assim com este, pelo professor Dr. Tarcisio Antônio Hess Coelho, que também foi o responsável pelo convênio entre as empresas acima citadas e a escola Politécnica.

Em paralelo com o nosso trabalho o aluno Antonio Carlos concluiu trabalho sobre esta plataforma visando melhoria dos sistemas de controle e comunicação e aquisição de dados e o aluno Matheus Araújo está atualmente trabalhando visando implementar o sistema em tempo real, melhorar o funcionamento da máquina e construir um protótipo com guias lineares.

### **3.2. Informações Físicas da plataforma**

A máquina em estudo é composta por 6 subsistemas, que serão apresentados a seguir:

- Subsistema Mecânico
  - Base
  - Fusos
  - Acoplamentos
  - Castanhas
  - Barras
  
- Subsistema de Comunicação e Aquisição de Dados
  - Placa de aquisição
  - Rede física
  - Softwares de configuração
  - Programas de interface

- Subsistema de Acionamento
  - 4 Motores trifásicos 1,5 kW – 50, 60 Hz
  - 4 Conversores de frequência
  - 4 Resistores de frenagem
  - Transformador 220V – 380V trifásico
  
- Subsistema de Controle
  - MD's (IPos Plus)
  - PC (Visual Basic)
  
- Subsistema Elétrico
  - Potência
  - Encoders
  - Proteção Térmica
  - Sensores
  - Conversor de protocolo
  - Interbus
  - Joystick
  
- Subsistema de Multimídia
  - Placa de aquisição
  - Rede Física
  - Softwares de Configuração
  - Programas de interface

Na figura 5, apresentamos o Protótipo da plataforma, em duas fotos, a primeira à maquete inicial e a segunda observamos sua evolução ao longo dos trabalhos de outros colegas, já na sua implementação na função de jogo.

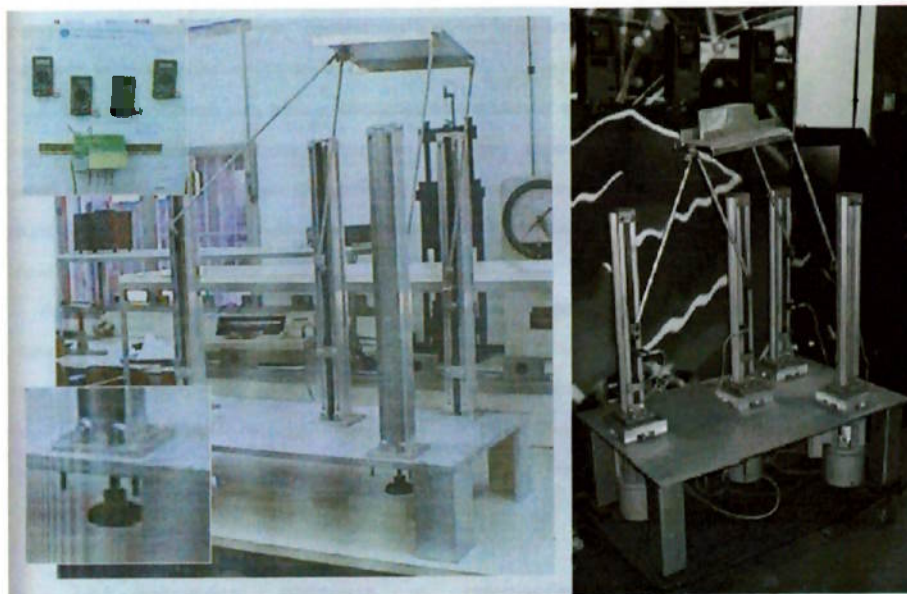


Figura 5 – Plataforma existente em nosso Laboratório

A plataforma atual é sustentada por 4 hastes acionadas por fusos, estes acionados por motores trifásicos com 1,5 kW e 380V e 4 frequências, com 4 graus de liberdade como podemos comprovar pelo critério de Kutzbach-Grübler.

A cadeia é fechada e pode se representada por: 2 PRS (prismático – revolução - esférico) + 2 PUS (prismático – universal - esférico). As dimensões da máquina são:

|                    |      |
|--------------------|------|
| • Altura (mm)      | 1520 |
| • Largura (mm)     | 600  |
| • Comprimento (mm) | 1000 |
| • Peso (N)         | 1800 |

O controle desta máquina é feito por um PC, Pentium II, 64 MB RAM, 300 MHz e disco rígido de 4 GB; por 4 encoders angulares e sensores de fim de curso. O software utilizado para escrever os códigos foi o Virtual Basic 4.0. Alguns desses códigos foram gerados pelo programa CMD da Phoenix.

Para a movimentação do conjunto sem transtornos é necessário um perfil de velocidades trapezoidais, em que a velocidade deve aumentar gradativamente até a velocidade de trabalho e após o trabalho não deve cessar gradativamente. Isto chama curva de aceleração e deve ser implementada pelos sistemas de comando junto aos motores. Em nossa plataforma essa curva é fornecida pelo programa CMD da Phoenix.

### 3.3 Identificação dos Conjuntos mecânicos

Para facilitar o estudo e a compreensão do que foi feito dividimos a máquina em 4 subconjuntos: cada um formado por um encoder, fuso, acoplamento, motor, inversor e Movi-Drive.

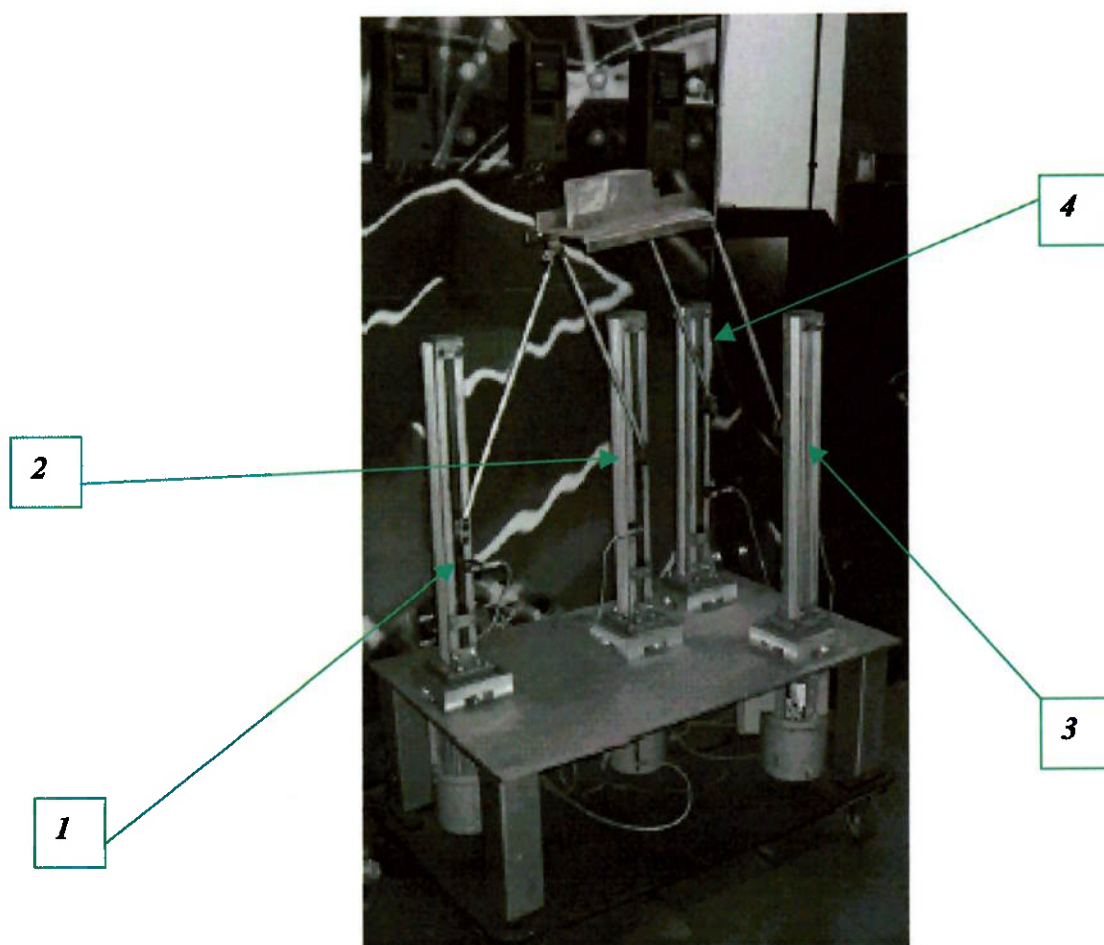


Figura 6 – Identificação do Conjunto

### 3.4. Espaço de trabalho da máquina

Para avaliarmos o espaço de trabalho do mecanismo devemos levar em consideração o comprimento fixo das barras de ligação, os limites de movimentação das juntas, o curso vertical máximo permitido dos atuadores e a posição de fixação dos atuadores na base. Como não é o escopo deste trabalho mostrar como foi obtido este espaço de trabalho, podemos ver um grande detalhamento do espaço de trabalho na tese “Avaliação do Potencial de um Mecanismo Paralelo como Máquina Ferramenta”, RASZL, G. O valor avaliado para uma área de 179,54 cm<sup>2</sup> para ângulos que variam de -50° (sentido horário) a 50° (sentido anti-horário).

Porém foram realizadas algumas alterações mecânicas, as quais ocasionaram modificações nestes valores. As alterações realizadas nas fixações, também modificam distancias e posicionamento. Utilizamos os códigos em MatLab desenvolvidos na tese do RASZL, G., alterando entradas com as novas dimensões, e obtivemos novo esboço de espaço de trabalho teórico. Segue abaixo figuras contendo o resultado anterior da tese e o novo considerando as alterações.

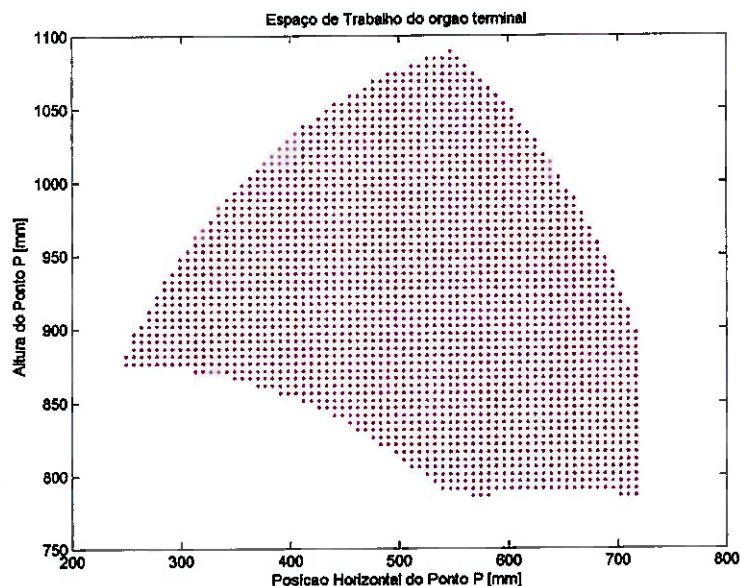


Figura 7 – Espaço de trabalho teórico da tese do RASZL, G.

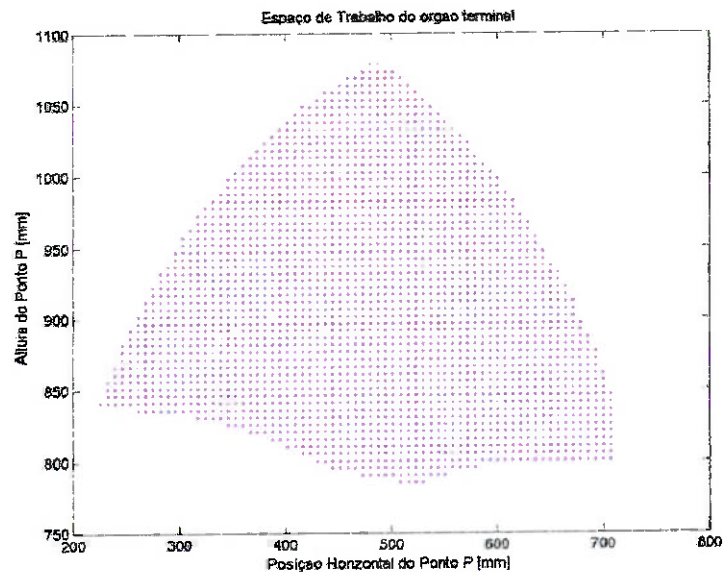


Figura 8 - Espaço de trabalho teórico após as alterações.

Como visto acima pudemos verificar poucas diferenças entre o espaço de trabalho antes e depois das alterações mecânicas.

### 3.5. Diagrama de Bloco

Malha Semi-Aberta

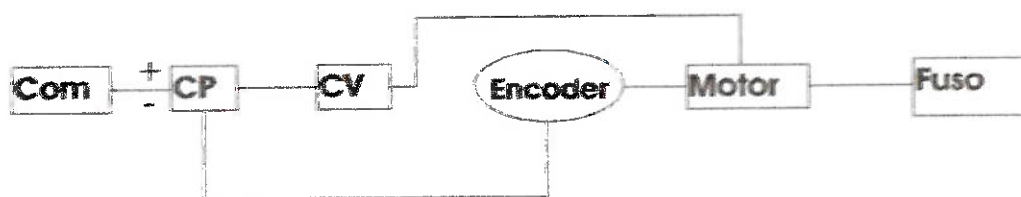


Figura 9 – Diagrama de Blocos

Com - Comandos

CP – Controlador de Posição

CV – Controlador de Velocidade

### 3.6. Graus de liberdade segundo Kutzbach-Grübler

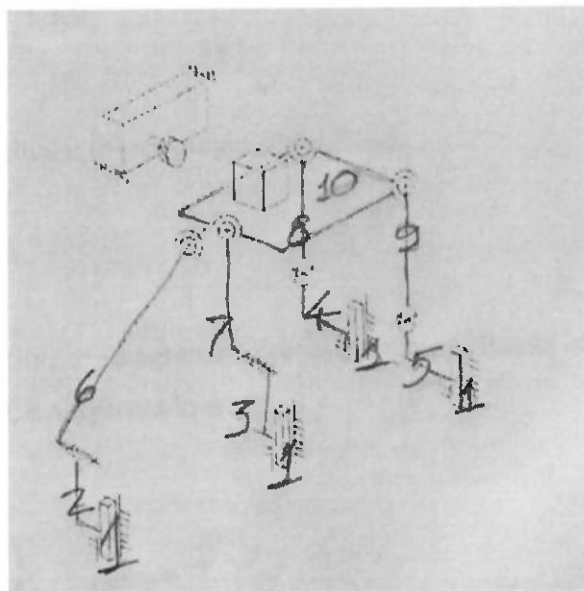


Figura 10 – Diagrama cinemático da plataforma

Peças: 10

Pares P1: 1-2 , 2-6 , 1-3, 3-7, 1-4 , 1-5

Pares P2: 4-8, 5-9

Pares P3: 6-10, 7-10, 8-10, 9-10

$$GM = 6*(10-1) - 6*5 - 2*4 - 4*3 = 4$$

### 3.7. Análise preliminar

O trabalho que será apresentado neste relatório será a implementação de um sistema de usinagem para uma plataforma Tetraglide, já existente nos laboratórios da escola politécnica. E para os teste, optamos pela utilização de dois processos: Furação e Fresamento.

Foram escolhidos estes dois processos, pois podemos avaliar a plataforma como um todo. Sendo que no processo de furação podemos observar o deslocamento vertical e repetibilidade e também mostrar se esta máquina tem rigidez e precisão para realizar qualquer processo de usinagem. E para confirmar realizamos o Fresamento.

Os materiais escolhidos forma de três tipos diferentes: Parafina, nylon e Alumínio. Com isso, podemos avaliar o comportamento da Máquina como o aumento da dureza e resistência ao corte. Os ensaios foram feitos nesta ordem.

No Processo de furação foi realizado com todos os materiais, já o processo de fresagem escolhemos fazê-lo apenas com parafina e Nylon, pois a máquina apresenta alguns problemas para realizar trajetórias lineares e a utilização de um material com grande resistência, solicitaria muito esforço para a Máquina, podendo quebrar a fresa ou alguma articulação.

### **3.8. Problemas apresentados na plataforma do laboratório**

- A Placa não respondia ao programa CMD.
- O conjunto 4 (acoplamento + motor + inversor + fuso) não está funcionando.
- Acoplamento da haste inferior direita ao fuso parece estar danificado: o acoplamento deverá ser trocado ou reparado se possível, pois há perda da rigidez.
- Será também necessário fazer algumas modificações para melhorar o espaço de trabalho e aumentar a rigidez.

### **3.9. Manutenção corretiva realizada**

#### **3.9.1. Resolução do problema da placa**

O problema foi solucionado no trabalho de formatura do aluno Antônio Carlos, concluído no primeiro semestre, com auxílio da empresa Phoenix Contact.

### **3.9.2. Resolução do problema do conjunto 4**

Logo após a resolução do problema na placa foi possível religar a máquina, após um longo tempo que a Máquina esta desligada. Quando isto ocorreu verificou-se que o conjunto 4 não funcionava, e no Movi-Drive 4 a máquina apresenta o erro F08, que no manual do fabricante significa problema com encoders, motores ou ligações.

A primeira medida a ser tomada foi verificar a comunicação do encoder com o Movi-drive, através de movimentação manual do fuso 4 e conseqüente movimentação do encoder 4. Verificou-se através do visor do Movi-Drive 4 que havia comunicação entre o encoder. Eliminando a possibilidade de problemas com o encoder sobravam os problemas com o motor ou com as ligações.

Em paralelo decidi verificar as ligações e realizar um ensaio em vazio com o motor. Primeiramente pudemos verificar que não havia corrente nos bornes de entrada do motor 4, o que reforça duas possibilidades: O Motor está queimado ou há algum problema com a alimentação entre os inversores e o encoder. Fizemos o ensaio em vazio do motor e este funcionou perfeitamente.

Em verificação posterior verificou que apenas uma fase do motor era alimentada, devido a maus contatos na ligação entre motores e inversores. Estes problemas foram solucionados e o conjunto 4 voltou a operar normalmente.

## **3.10. Modificações Mecânicas**

### **3.10.1. Resolução do problema do acoplamento**

O acoplamento do conjunto mecânico 4 que liga o fuso à haste apresentava pouca rigidez e vibrava a cada simples movimento, dando impressão que estava danificado. Foi necessário abrir os fusos e retirar o acoplamento para verificar o seu estado. Neste caso foi verificado que este estava em perfeitas condições e o problema era devido a uma folga de projeto e era necessário colocar um calço, que já existia nos outros acoplamentos.

Após isto o acoplamento funciona perfeitamente sem vibrações indesejáveis.

### **3.10.2. Nova disposição das juntas**

Para obtermos maior rigidez, melhorarmos o espaço de trabalho e minimizar as singularidades foi necessário algumas adaptações mecânicas. Primeiramente foi necessário alterar a posição em que as juntas se fixam na mesa, em busca de maior rigidez e melhorar o espaço de trabalho.

Primeiramente alteramos a posição das juntas, para que o suporte destas não fique na trajetória das hastes quando ocorre o movimento, limitando assim o espaço de trabalho. Depois separamos as juntas que 1 e 2 que se fixavam no mesmo ponto da mesa, a mudança é observada na figura 12.

Para a construção do suporte das juntas tivemos que garantir que em seu ponto inicial de operações a mesa fosse paralela à base. Para isto foi necessário garantirmos que no ponto zero todas as medidas de altura em relação à base teriam o mesmo valor.

Para realizarmos isto desconectamos a haste 2 da segunda articulação e manualmente colocamos a mesa em uma posição inicial horizontal a base. Para isto utilizamos uma esfera que era colocada sobre a mesa. Com a esfera tem equilíbrio instável ela só ficaria parada em uma posição quando a mesa estivesse paralela à base.

Quando isto ocorreu percebemos que a mesa estava a uma altura de 465,0 mm em relação à origem da máquina, então para dimensionar um apoio 65,0 mm afastado da origem da mesa, o que são 45,0 mm afastados da origem do fuso. Usaríamos trigonometria para calcular a altura extra para garantir que a plataforma fique inicialmente paralela na horizontal.

Segue abaixo o demonstrativo dos cálculos realizados:

- Dimensão haste necessária=  $\sqrt{47^2+475^2} = 477,3$
- Dimensão da haste = 465

- Ângulo inicial haste 2 =  $85^\circ$
- Altura extra =  $(477,3 - 465) \times \sin 85 = 12,2$

A seguir temos a demonstração gráfica das relações trigonométricas aplicadas na resolução deste problema:

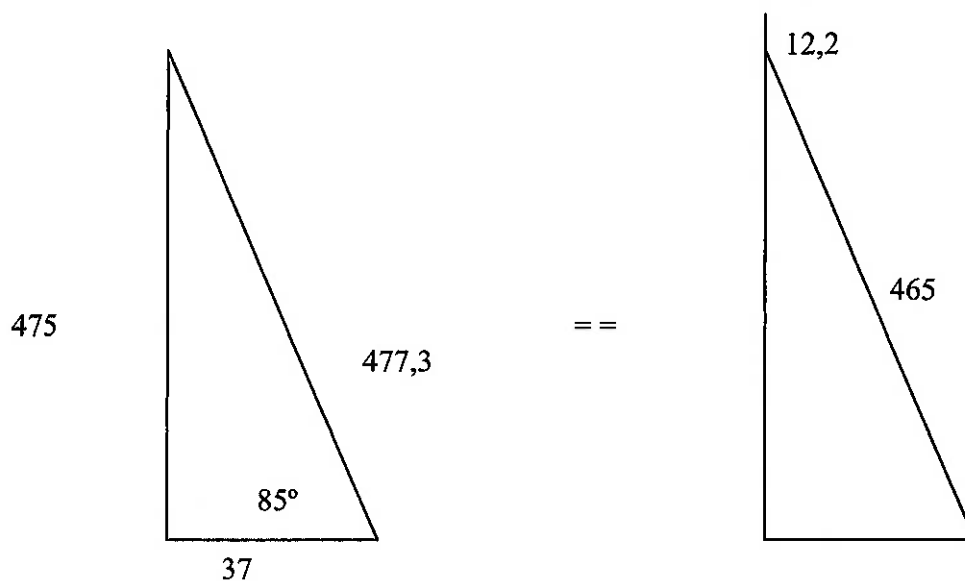


Figura 11 – Cálculo Trigonométrico

Baseado nisto, podemos projetar o novo dispositivo de fixação.

Notamos também que a máquina perdia espaço de trabalho devido à disposição dos antigos apoios que se fixavam perpendicularmente à direção da mesa, nós mudamos a disposição deste para que estes se fixassem paralelamente à borda da mesa. O que deixaria o trabalho útil da mesa muito próximo do real.

O projeto inicial desta máquina também previa a colocação de duas juntas universais, porém estas se fizeram por uma folga em duas juntas de revolução. Isto diminuía a rigidez da máquina e a precisão de seus movimentos. Para realizarmos um ensaio tivemos de eliminar esta folga trocando arruelas normais por arruelas de pressão.

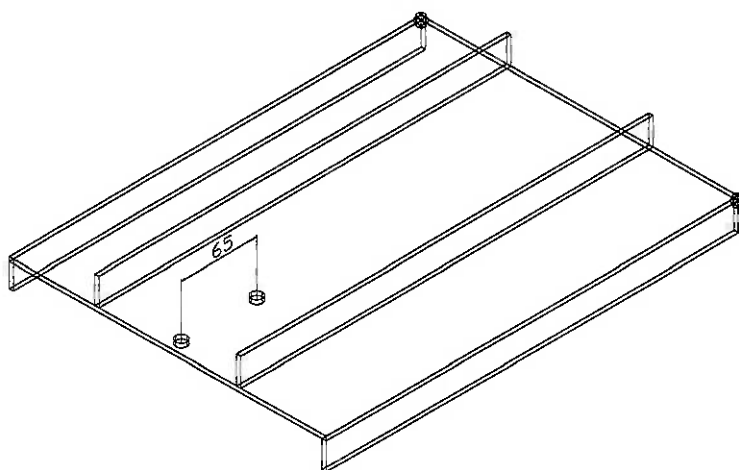


Figura 12 – Disposição das juntas na mesa após as mudanças mecânicas

### 3.10.3. Reforço nos acoplamentos

Na realização dos ensaios verificou-se a necessidade de reforçar os acoplamentos dos fusos. Através de chapas de reforço conectamos o conjunto do fuso 1 com o conjunto do fuso 2, o conjunto do fuso 2 com os conjuntos dos fusos 3 e 4, e o conjunto do fuso 3 e fuso 4.

Isto nos possibilitou maior suavidade nos movimentos da mesa e maior rigidez dos fusos nos ensaios.

### **3.11. – Sistema de Usinagem proposto**

O Sistema de usinagem proposto no anexo D vai proporcionar melhor acabamento nas peças, ele é projetado para trabalhar sobre o espaço de trabalho teórico proposto. Neste sistema deverá ser acoplado algum dremmel, tupia ou furadeira externa.

Deve ser verificado o sentido de rotação da ferramenta para verificar o avanço da mesa.

## 4. - Fundamentação Teórica

### 4.1. – Cinemática Direta e Cinemática Inversa

Nos estudos de trajetórias é necessário adotar um modelo cinemático e conhecer as relações entre conhecer o as coordenadas do órgão terminal (mesa) com as coordenadas das juntas, em função dos parâmetros do mecanismo. Para isto adotamos a cadeia cinemática proposta por Raszl, G. em sua tese de mestrado.

A Tabela 2 representa o diagrama cinemático do mecanismo contendo as suas coordenadas e parâmetros. As coordenadas que definem a posição do órgão terminal são a sua orientação  $\theta$  e as coordenadas  $p_y$ ,  $p_z$  do ponto P. As coordenadas relevantes das juntas são os deslocamentos  $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$  impostos pelos três atuadores verticais. Há dois modos de se proceder na solução das incógnitas mostradas na figura abaixo a primeira, conhecida como cinemática direta e, a segunda, como cinemática inversa.

| Cinemática | Coordenadas conhecidas | Coordenadas incógnitas |
|------------|------------------------|------------------------|
| Direta     | $h_1, h_2, h_3$        | $\theta, p_y, p_z$     |
| Inversa    | $\theta, p_y, p_z$     | $h_1, h_2, h_3$        |

Tabela 2 - Coordenadas conforme o tipo de cinemática

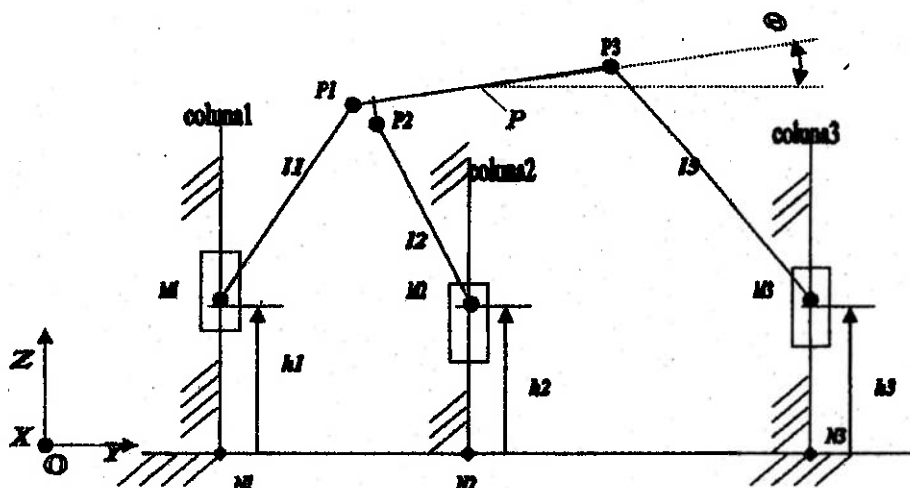


Figura 13 - Coordenadas e parâmetros do mecanismo paralelo. Cadeia cinemática adotada

As coordenadas dos pontos  $P_j$  em relação à mesa móvel  $D$  são representadas pelo vetor  ${}^D P_j$  (4.1); as coordenadas do ponto  $P_j$  com relação à base  $A$  são obtidas através da matriz de transformação homogênea (CRAIG,1986)  ${}^A_D T$ , que converte as coordenadas de  $D$  para  $A$ , conforme eq. (4.2). Os elementos da matriz  $3 \times 3$   ${}^A_D T$  são calculados a partir da orientação  $\theta$  e as coordenadas  $p_y$ ,  $p_z$  do ponto  $P$  em relação ao referencial  $A$ , indicados na equação (4.3).

$${}^D P_j = \begin{bmatrix} {}^D P_{jy} \\ {}^D P_{jz} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$${}^A P_j = {}^A_D T \cdot {}^D P_j \quad (4.2)$$

$${}^A_D T = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & p_y \\ s\theta & c\theta & p_z \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A expressão matemática da eq. 4.7 permite-nos obter até 8 soluções (2x2x2) de montagem das três cadeias ativas do mecanismo paralelo. Dentre elas, seleciona-se a solução a seguir;

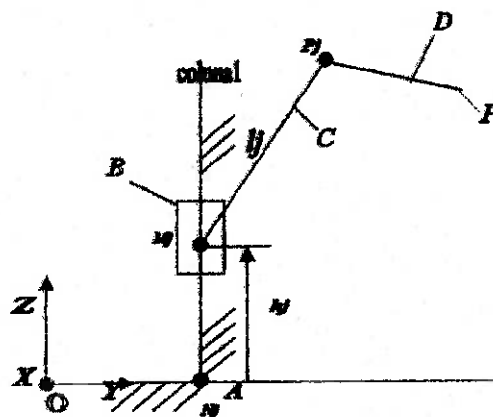


Figura 14 – J-ésima cadeia cinemática ativa

A partir da figura 14, pode-se escrever a eq. (4.4)

$$\begin{pmatrix} {}^A P_j - {}^A N_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^A P_j - {}^A M_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} {}^A M_j - {}^A N_j \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

$$\begin{matrix} b \\ \begin{pmatrix} {}^A P_j - {}^A N_j \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A P_{jy} - {}^A N_{jy} \\ {}^A P_{jz} - {}^A N_{jz} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A P_{jy} - {}^A m_{jy} \\ {}^A P_{jz} - {}^A m_{jz} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ h_j \\ 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.5)$$

Como:

$$\begin{pmatrix} {}^A P_{jz} - {}^A m_{jz} \end{pmatrix} = \sqrt{\left( l_j^2 - \left( {}^A P_{jy} - {}^A n_{jy} \right)^2 \right)} \quad (4.5)$$

então

$$h_j = \begin{pmatrix} {}^A P_{jz} - {}^A n_{jz} \end{pmatrix} \pm \sqrt{\left( l_j^2 - \left( {}^A P_{jy} - {}^A n_{jy} \right)^2 \right)} \quad j=1,2,3 \quad (4.6)$$

Na equação (4.6) podemos obter até 8 soluções. No trabalho original verificou-se que a melhor solução seria a seguinte:

$$h_j = \begin{pmatrix} {}^A P_{jz} - {}^A n_{jz} \end{pmatrix} - \sqrt{\left( l_j^2 - \left( {}^A P_{jy} - {}^A n_{jy} \right)^2 \right)} \quad j=1,2,3 \quad (4.7)$$

De modo a controlar a posição e orientação do órgão terminal, atendendo a trajetória requerida da peça a ser usinada em relação à ferramenta, adotou-se a cinemática inversa para obtenção dos deslocamentos necessários em cada um dos três atuadores.

## 4.2. Jacobiano e velocidade

Para o cálculo da velocidade é necessária a obtenção dos jacobianos das velocidades  $\dot{X}$  e  $\dot{q}$ . Porém devemos definir os vetores  $x$  e  $q$  cujas componentes contém, respectivamente, as coordenadas do órgão terminal e dos deslocamentos dos atuadores, e são apresentados a seguir;

$$x = [P_y, P_z, \theta]^T \quad (4.8)$$

$$q = [h_1, h_2, h_3]^T \quad (4.9)$$

Como a distância entre os pontos  $P_j$  e  $M_j$  é constante e igual ao comprimento da barra  $j$  então

$$\left( {}^A P_j - {}^A M_j \right)^T \cdot \left( {}^A P_j - {}^A M_j \right) - l_j^2 = f_j(X, q) \quad j = 1, 2, 3 \quad (4.10)$$

Derivando em relação ao tempo teremos:

$$\frac{d}{dt} \left( {}^A P_j - {}^A M_j \right) \cdot \left( {}^A P_j - {}^A M_j \right) = 0 \quad (4.11)$$

$$\left( {}^A \dot{P}_j - {}^A \dot{M}_j \right) = \begin{bmatrix} \left( -D_{P_{jy}} \cdot s\theta - D_{P_{jz}} \cdot c\theta \right) \cdot \dot{\theta} + \dot{p}_y \\ \left( D_{P_{jy}} \cdot c\theta - D_{P_{jz}} \cdot s\theta \right) \cdot \dot{\theta} + \dot{p}_z - \dot{h}_j \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Resolvendo-se (4.11) obtém-se:

$$\left[ W_{1y} \left( -D_{P_{1y}} \cdot s\theta - D_{P_{1z}} \cdot c\theta \right) + W_{1z} \left( -D_{P_{1y}} \cdot c\theta - D_{P_{1z}} \cdot s\theta \right) \right] \cdot \dot{\theta} + (W_{1y}) \cdot \dot{p}_y + (W_{1z}) \cdot \dot{p}_z + (W_{1z}) \cdot \dot{h}_1 = 0 \quad (4.13)$$

Chamando de  $v_j$  o coeficiente de  $\dot{\theta}$

$$\left[ W_{1y} \left( -D_{P_{1y}} \cdot s\theta - D_{P_{1z}} \cdot c\theta \right) + W_{1z} \left( -D_{P_{1y}} \cdot c\theta - D_{P_{1z}} \cdot s\theta \right) \right] = v_j \quad (4.14)$$

assim,

$$(W_{jy}) \cdot \dot{p}_y + (W_{jz}) \cdot \dot{p}_z + (v_j) \cdot \dot{\theta} = (W_{jz}) \cdot \dot{h}_j \quad j=1,2,3 \quad (4.15)$$

Temos:

$$\begin{bmatrix} W_{1y} & W_{1z} & v_1 \\ W_{2y} & W_{2z} & v_2 \\ W_{3y} & W_{3z} & v_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{1z} & 0 & 0 \\ 0 & W_{2z} & 0 \\ 0 & 0 & W_{3z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$J_x \cdot \dot{\vec{x}} = J_q \cdot \dot{\vec{q}}$$

### 4.3. Forças de Usinagem

O próprio fabricante mantém disponíveis manuais onde os esforços podem ser obtidos facilmente, de acordo com a ferramenta, material usinado, características do spindle (rotação, etc.) e condições de trabalho. Analisaremos as duas operações ensaiadas: Furação e Fresamento.

#### 4.3.1 Furação

Os esforços existentes sobre a ferramenta durante a furação, uma força (que será chamada de T) e um momento (que irá chamar-se de M), obrigam o spindle a impor potência de usinagem de magnitude  $P_c$ . A figura 15, a seguir, ilustra a situação.

A força, o momento e a potência de usinagem são calculados segundo as equações a seguir:

$$T = 0,05 \times K_d \times F_f \times F_T \times B \times W + 0,007 \times K_d \times d^2 \times J \times W [N] \quad (4.3.1)$$

$$M = 2,5 \times 10^{-5} \times K_d \times F_f \times F_M \times A \times W \quad [Nm] \quad (4.3.2)$$

$$P_c = M \times N/9550 \quad (4.3.3)$$

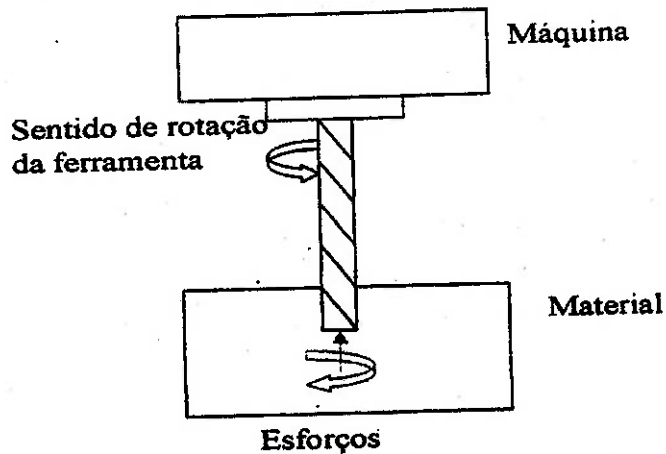


Figura 15 - Esforços na Furação

Onde:

$P_c$  - Potência de corte (usinagem)

$M$  - Torque

$T$  - Força

$K_d$  - Fator do material usinado

$F_f$  - Feed factor (avanço)

$F_T$  - Fator da força em função do diâmetro da ferramenta

$F_M$  - Fator do momento em função do diâmetro da ferramenta

$A$  - Fator de Chisel para o momento

$B$  - Fator de Chisel para a força (1)

$J$  - Fator de Chisel para a força (2)

$W$  - Fator da ferramenta

$N$  - Rotação do spindle [rpm]

$D$  - Diâmetro da broca [mm]

Os fatores são obtidos através de uma série de tabelas, apresentadas a seguir:

| Material a ser trabalhado       | $K_d$              |
|---------------------------------|--------------------|
| A maioria das ligas de alumínio | 7000               |
| Aço, 200 Bhn                    | 24000              |
| Aço, 300 Bhn                    | 31000              |
| Aço, 400 Bhn                    | 34000              |
| Liga T166A de titânio           | 18000 para momento |
|                                 | 29000 para força   |
| Ferro Fundido, 150 Bhn          | ~14000             |

| c/d  | w/d   | A     | B     | J     | Avanço<br>(mm/volta) | $F_f$ | Avanço<br>(mm/volta) | $F_f$ |
|------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
| 0,03 | 0,025 | 1,000 | 1,100 | 0,001 |                      |       |                      |       |
| 0,05 | 0,045 | 1,005 | 1,140 | 0,003 | 0,01                 | 0,025 | 0,30                 | 0,382 |
| 0,08 | 0,070 | 1,015 | 1,200 | 0,006 | 0,03                 | 0,060 | 0,35                 | 0,432 |
| 0,10 | 0,085 | 1,020 | 1,235 | 0,010 | 0,05                 | 0,091 | 0,40                 | 0,480 |
| 0,13 | 0,110 | 1,040 | 1,270 | 0,017 | 0,08                 | 0,133 | 0,45                 | 0,528 |
| 0,15 | 0,130 | 1,080 | 1,310 | 0,022 | 0,10                 | 0,158 | 0,50                 | 0,574 |
| 0,18 | 0,155 | 1,085 | 1,355 | 0,030 | 0,12                 | 0,183 | 0,55                 | 0,620 |
| 0,20 | 0,175 | 1,105 | 1,380 | 0,040 | 0,15                 | 0,219 | 0,65                 | 0,708 |
| 0,25 | 0,220 | 1,155 | 1,445 | 0,065 | 0,18                 | 0,254 | 0,75                 | 0,794 |
| 0,30 | 0,260 | 1,235 | 1,500 | 0,090 | 0,20                 | 0,276 | 0,90                 | 0,919 |
| 0,35 | 0,300 | 1,310 | 1,575 | 0,120 | 0,22                 | 0,298 | 1,00                 | 1,000 |
| 0,40 | 0,350 | 1,395 | 1,620 | 0,160 | 0,25                 | 0,330 | 1,25                 | 1,195 |

Tabelas 3, 4 e 5 – Parâmetros de Furação

c/d – comprimento da extremidade de Chisel/ diâmetro da broca

c/d = 0,18 na maioria das brocas

w/d - espessura do filete de corte da broca no ponto de corte/ diâmetro da broca

| <b>Tipo de operação</b>                           | <b>W</b>    |
|---------------------------------------------------|-------------|
| Furação com parâmetros normais                    | 1,30        |
| Furação de materiais difíceis de usinar           | 1,50        |
| Fresamento (ciclo de trabalho extrapesado)        | 1,30 a 1,60 |
| Fresamento (ciclo de trabalho de leve a moderado) | 1,10 a 1,25 |
| Fresamento (passes de acabamento)                 | 1,10        |

Tabela 6 – Parâmetros de Furação

| <b>d(mm)</b> | <b>F<sub>T</sub></b> | <b>F<sub>M</sub></b> | <b>d (mm)</b> | <b>F<sub>T</sub></b> | <b>F<sub>M</sub></b> |
|--------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------------|----------------------|
| 1,60         | 1,46                 | 2,33                 | 8,80          | 5,96                 | 50,13                |
| 2,40         | 2,02                 | 4,84                 | 9,50          | 6,06                 | 57,53                |
| 3,20         | 2,54                 | 8,12                 | 11,00         | 6,81                 | 74,90                |
| 4,00         | 3,03                 | 12,12                | 12,50         | 7,54                 | 94,28                |
| 4,80         | 3,51                 | 16,84                | 14,50         | 8,49                 | 123,10               |
| 5,60         | 3,97                 | 22,22                | 16,00         | 9,19                 | 147,00               |
| 6,40         | 4,42                 | 28,26                | 17,50         | 9,87                 | 172,80               |
| 7,20         | 4,85                 | 34,93                | 19,00         | 10,54                | 200,30               |
| 8,00         | 5,28                 | 42,22                | 20,00         | 10,98                | 219,70               |

Tabela 7 - Parâmetros de Furação

Em primeiro lugar deve-se analisar a potência possível de ser fornecida pelo motor, ou seja, 8HP. Sabe-se que a eficiência da transmissão varia de acordo com o modelo do spindle, mas para o caso dos modelos da linha M980 esse valor é de 90%.

A potência máxima que se encontra para a ferramenta é de 7,2 HP ou 5,4 KW. Para efeito do cálculo das forças de usinagem, admite-se que não existem outras perdas de potência significativas. Observa-se então que  $5,4 \times 9550 < M.N$  (fórmula da potência de corte).

### 4.3.2 Fresamento

No caso do fresamento o fabricante consultado nos fornece dados úteis à estimativa da potência da usinagem requerida para uma determinada operação. A potência de usinagem é calculada através da seguinte fórmula:

$$P_c[\text{kW}] = K_p \times C \times Q \times W \quad (4.3.4)$$

Onde:

$K_p$  - constante de potência de corte

$C$  - Fator do avanço

$Q$  - Taxa de remoção de material [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]

$W$  - Fator de ferramenta

A taxa de remoção do material é expressa por:

$$Q[\text{cm}^3/\text{s}] = f_m \times w \times d / 60000$$

Onde:

$f_m$  - Avanço em mm/min

$w$  - profundidade de corte em mm

$d$  - largura do corte em mm (equivalente ao diâmetro da fresa utilizada)

Deve-se recorrer a tabelas para obtenção das constantes e fatores

| Feed <sup>a</sup> | C    | Feed <sup>a</sup> | C    | Feed <sup>a</sup> | C    | Feed <sup>a</sup> | C    |
|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|
| 0,02              | 1,70 | 0,20              | 1,06 | 0,38              | 0,94 | 0,80              | 0,82 |
| 0,05              | 1,40 | 0,22              | 1,04 | 0,40              | 0,92 | 0,90              | 0,80 |
| 0,07              | 1,30 | 0,25              | 1,01 | 0,45              | 0,90 | 1,00              | 0,78 |
| 0,10              | 1,25 | 0,28              | 1,00 | 0,50              | 0,88 | 1,50              | 0,72 |
| 0,12              | 1,20 | 0,30              | 0,98 | 0,60              | 0,87 |                   |      |
| 0,15              | 1,15 | 0,33              | 0,97 | 0,70              | 0,84 |                   |      |
| 0,18              | 1,11 | 0,35              | 0,95 | 0,75              | 0,83 |                   |      |

Fresamento: mm/dente

Tabela 8 – Parâmetros de Fresamento

| Material      | Bhn     | K <sub>p</sub> | Material       | Bhn     | K <sub>p</sub> | Material         | Bhn     | K <sub>p</sub> |
|---------------|---------|----------------|----------------|---------|----------------|------------------|---------|----------------|
| Ferro fundido | 110-120 | 0,76           | Ferro maleável |         |                | Alumínio Fundido | X       | 0,68           |
| Cinzento      | 120-140 | 0,96           | Ferrítico      | 150-175 | 1,15           | Aço inoxidável   | 175-200 | 1,64           |
|               | 140-160 | 1,04           |                | 175-200 | 1,56           | Aço inoxidável   | 175-200 | 1,97           |
|               | 180-200 | 1,42           | Perlítico      | 200-250 | 2,24           | Cobre Puro       | X       | 2,48           |
|               | 200-220 | 1,64           |                | 250-300 | 3,22           | Ligas, magnésio  | X       | 0,27           |

Bhn – dureza Brinell

Tabela 9 – Parâmetros de Fresamento

Para o cálculo dos esforços de fresamento considera-se que o diâmetro da ferramenta  $d$  é igual a largura de corte para esta ferramenta  $b = b_{\text{máx}} = d$  e que a resistência específica de corte  $r_e = 3,5\sigma_r$ .

$$F = 0,0105 \times P \times V_a \times \sigma_r / v \quad (4.3.5.)$$

$$F_a = 0,4 \times F \quad (4.3.6.)$$

$$M_t = 0,0015 \times F \quad (4.3.7.)$$

$$P_m = 1,170 \times F \times v \quad (4.3.8.)$$

$$V = \pi \times d \times n / 60000 \quad (4.3.10)$$

$d$  - diâmetro da ferramenta (mm)

$n$  - rotação do motor (rpm)

$p$  - profundidade de corte (m)

$V_a$  - velocidade de avanço (m/s)

$\sigma_r$  - resistência à ruptura por tração (Pa)

$v$  - velocidade de corte (m/s)

$F$  - força de corte (N)

$F_a$  - força de avanço (N)

$M_t$  - momento torsor (Nm)

$P_m$  - potência do motor (W)

Quanto menor a velocidade de corte, mais críticos são os esforços de acordo com as fórmulas apresentadas.

#### 4.3.3. Força na interação Ferramenta-Peça no fresamento, segundo Raszl G.

| Tipo do Material | Resistência [N/mm <sup>2</sup> ] | Dureza Brinell | Kc1 [N/mm <sup>2</sup> ] | Coef. Angular |
|------------------|----------------------------------|----------------|--------------------------|---------------|
| Nylon            | 58                               | 116 R B        | 104                      | 0,2           |
| Alumínio         | 412                              | 118            | 637                      | 0,24          |
| Latão            | 1177                             | 336            | 765                      | 0,19          |
| FoFo CG 14       | 1569                             | 426            | 932                      | 0,2           |
| FoFo CG 30       | 2452                             | 602            | 1177                     | 0,26          |

Tabela 10 – Propriedades de alguns Materiais

No processo de usinagem em estudo da força de interação ferramenta-peça merece especial atenção, pois é isto que vai determinar a robustez ou não da máquina ferramenta.

A força de usinagem pode ser dividida em duas componentes principais, avanço e corte e seu valor depende das propriedades do material a ser usinado, das características da ferramenta de corte e de mais alguns parâmetros, tais como: ângulo de posição da ferramenta  $\chi$ , espessura média de corte por dente  $h_m$ , pressão específica de avanço médio de usinagem  $K_c$ , etc. Segue na tabela 10, algumas propriedades de alguns materiais, na tabela 11, as características de uma ferramenta de corte e tabela 12 os principais parâmetros do processo.

| Material   | D [mm] | Ângulo de hélice $\lambda$ [°] | Z [dentes] |
|------------|--------|--------------------------------|------------|
| Aço rápido | 22     | 30                             | 8          |

sendo D o diâmetro externo e Z o número de dentes.

Tabela 11 – Características da ferramenta de corte.

| f (mm) | Vc [mm/min] | Ae [mm] | $\chi$ [°] | b [mm] |
|--------|-------------|---------|------------|--------|
| 1,6    | 300         | 1       | 90         | 40     |

sendo f o avanço por volta, Vc a velocidade de corte, ae a penetração de trabalho, b a profundidade de corte e  $\chi$  o ângulo de posição da ferramenta.

Tabela 12 – Parâmetros do processo

Na tese do Mestre Raszl, G., foi realizado diversos ensaios, os quais foram obtidas as forças de reação das barras de ligação, forças reação normal nos pistões e forças necessárias dos atuadores para as Máquinas em estudo, devido às forças oriundas da interação ferramenta-peça.

Com estes resultados podemos escolhemos os materiais para análise e ratificar a performance da arquitetura em paralelo em processo de usinagem.

## 5. Interface com o usuário e Simulador de trajetória

A interface do usuário foi desenvolvida em Visual Basic 4.0 e Windows 98. Os códigos fonte seguem no anexo A deste trabalho. Esta interface foi criada para ser o mais funcional possível, não visando um programa comercial, já que o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de utilização desta plataforma em usinagem.

Na figura abaixo apresentamos esta interface, na qual podemos utilizar três opções: Movimentação Manual – move qualquer um atuador independentemente ou em conjunto; Interpolação Linear – realizar uma trajetória linear de um ponto atual até um ponto final definido; Interpolação Circular – realiza uma trajetória circular, na qual se define o raio de curvatura, o sentido de rotação e os octantes – um oitavo da circunferência – que será percorrido.



Figura 16 – Interface com o usuário.

Para ter acesso a esta funcionalidade o usuário inicia a interface, escolhe no campo 'Modo de Movimentação' a opção 'Interpolação Circular', como isso, será liberado o acesso ao campo 'Interpolação Circular' da interface. Neste campo o usuário define qual o raio de curvatura, a velocidade deste deslocamento e os oitavos da circunferência pretende percorrer. Sendo que deve ser observada a convenção de ponto de início e fim da curvatura, para o sentido horário e anti-horário.

Segue abaixo a convenção do início dos octantes para trajetória circular no sentido horário. Como exemplo, caso o usuário pretenda uma trajetória que percorra um semicírculo no sentido horário, e foi informado como início em o 1, para que seja realizada a trajetória deve-se informar como octante final o 4. Outro exemplo, agora com início em 3, o octante final a ser informado seria o 6.

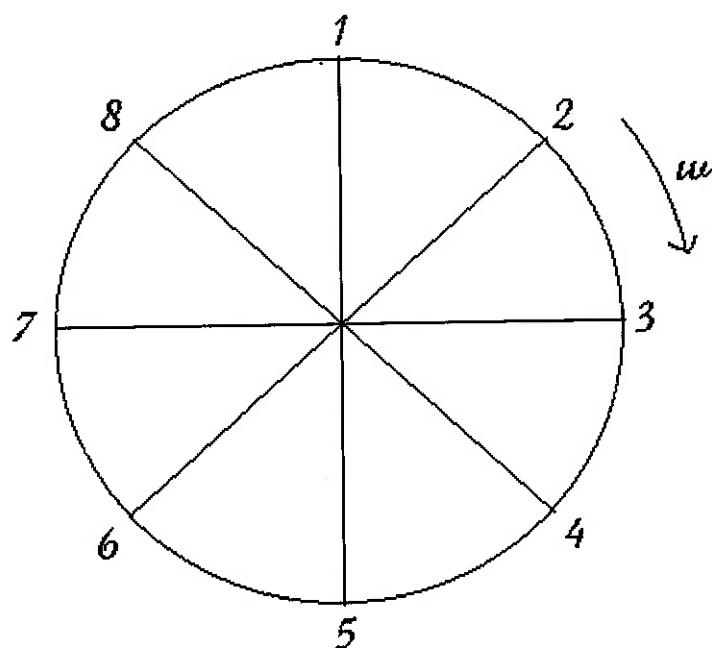


Figura 17 – Convenção dos octantes no sentido horário

Já, a convenção para numeração dos octantes no sentido anti-horário para realização trajetórias de setores circulares, está sendo apresentado na figura abaixo. Como exemplo, caso o usuário pretenda uma trajetória que percorra um semicírculo no sentido anti-horário, e foi informado como início em o 1, para que seja realizada a trajetória deve-se informa como octante final o 6. Outro exemplo, agora com início em 3, o octante final a ser informado seria o 8.

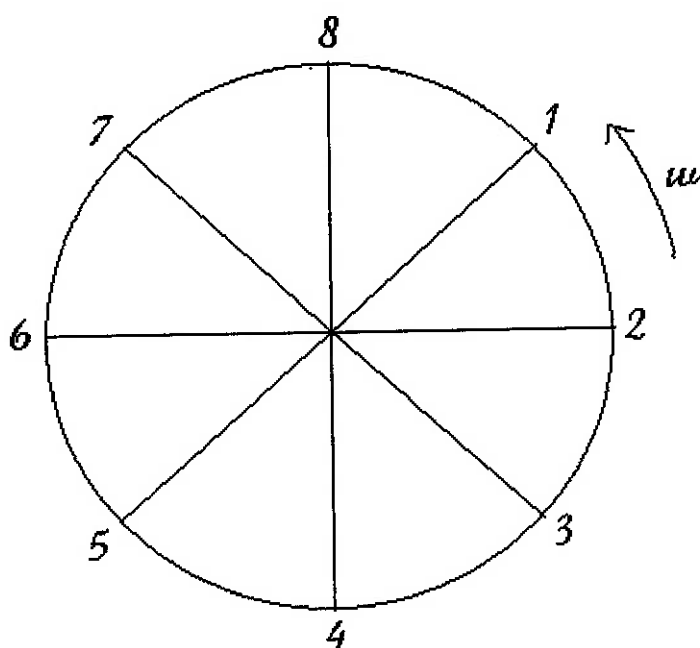


Figura 18 – Convenção dos octantes no sentido anti-horário

Como enunciado nos exemplos acima ao iniciar o oitavo de circunferência deve-se ir até o fim do mesmo. Sendo assim, a trajetória deve ser bem definida e observada as convenções para que os resultados estejam dentro do esperado.

## 5.4. Simulador de trajetória

Para se avaliar as trajetórias do centro de gravidade da plataforma fora da planta e realizar testar do programa de controle da plataforma foi desenvolvido um simulador em Excel para a interpolação linear e circular, utilizando a ferramenta macros que são programáveis em Visual Basic, tal compatibilidade auxiliou no aproveitamento das mudanças realizada nos códigos, no código de controle.

Segue abaixo a planilha com a mascara de interface com o usuário, sendo que em amarelo temos as possíveis entrada e os botões acionam os macros com as funcionalidades existentes no simulador.

| Inicialização    |                | Simulador da Interpolação Linear e Circular |                          |               |                      |                         |                         | Voltar Ultimo Comando     |                         |
|------------------|----------------|---------------------------------------------|--------------------------|---------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Raio (mm)        | Centro ==>     | Y <sub>centro</sub> (mm)                    | Z <sub>centro</sub> (mm) | Octante Inic. | Octante Fim          | Interpolação Linear ... |                         | Interpolação Circular ... |                         |
| 100              |                | 720                                         | 830                      | 1             | 1                    |                         |                         |                           |                         |
| Velocidade: mm/s | Veloc. Y       | Veloc. Z                                    | Posicionamento rápido    |               | Entrada de dados ==> | Y <sub>atual</sub> (mm) | Z <sub>atual</sub> (mm) | Y <sub>final</sub> (mm)   | Z <sub>final</sub> (mm) |
|                  | 0,5            | 0,5                                         |                          |               |                      | 700,00000               | 900,00000               | 700,00000                 | 900,00000               |
| Y <sub>i</sub>   | Z <sub>i</sub> | h1                                          | h2                       | h3            | h4                   | hponto1                 | hponto2                 | hponto3                   | hponto4                 |
|                  |                |                                             |                          |               |                      |                         |                         |                           |                         |
|                  |                |                                             |                          |               |                      |                         |                         |                           |                         |
|                  |                |                                             |                          |               |                      |                         |                         |                           |                         |

Figura 19 – Mascara da planilha de interface do simulador

As funcionalidades do simulador serão apresentadas a segue:

- **Inicialização:** é o ponto conhecido no espaço de trabalho real da maquina, na qual o simulador reconhece a posição e realiza incremento e decremento de posição e atualiza a posição atual do centro de gravidade da plataforma.
- **Voltar último comando:** foi adicionado para facilitar a execução das simulações, não sendo uma funcionalidade do programa da maquina de usinagem, já que a trajetória realizada pela plataforma da maquina é seguida de desbastamento do

corpo de prova pela ferramenta de corte, não sendo possível voltar o comando. Porém por se tratar de um simulador é muito útil, já que as trajetórias geram um conjunto de pontos que em caso de erro não perderia o trabalho todo.

- Interpolação Linear: para utilizar esta função deve-se entrar com os dados do ponto final, definir uma velocidade e clicar no botão da Interpolação Linear. Após, é gerado um conjunto de pontos que são utilizados no cálculo das cotas  $h_i$  e  $hponto_i$  que serão utilizadas pelo programa de controle da plataforma na orientação das posições.
- Posicionamento rápido: esta função não deve ser utilizada em marcha de usinagem, pois não tem uma trajetória definida e somente a posição final é conhecida. Serve para o posicionamento para iniciar a usinagem ou saída da peça.
- Interpolação Circular: esta função realiza a trajetória circular com o controle de um oitavo de circunferência, sendo o primitivo para realização de trajetórias mais complexas, com a composição de semicírculos alternados com seguimentos de retas, por exemplo. Para utilizar esta função deve-se entrar com os dados do raio de curvatura, definir uma velocidade, indicar o octante inicial e final, e clicar no botão da Interpolação Circular. Após, é gerado um conjunto de pontos que são utilizados no cálculo das cotas  $h_i$  e  $hponto_i$  que serão utilizadas pelo programa de controle da plataforma na orientação das posições.

Com as funções apresentadas acima temos uma prévia do comportamento das cotas  $h_i$  e  $hponto_i$ , e podemos avaliar o real espaço de trabalho da plataforma, e quando o programa for aplicado na própria plataforma, antecipamos com isso os dados de entrada da plataforma.

Aplicamos o simulador para obter os primitivos do seguimento de reta, do semicírculo, da circunferência completa e do uma trajetória mais complexa que é a seqüência destes primitivos.

1. Seguimentos de reta que parte de um ponto inicial ( $Y_{atual}$ ,  $Z_{atual}$ ) até um ponto final ( $Y_{final}$ ,  $Z_{final}$ ), sendo que  $m > 0$ ,  $m < 0$ , reta // eixo Z e reta // eixo Y.

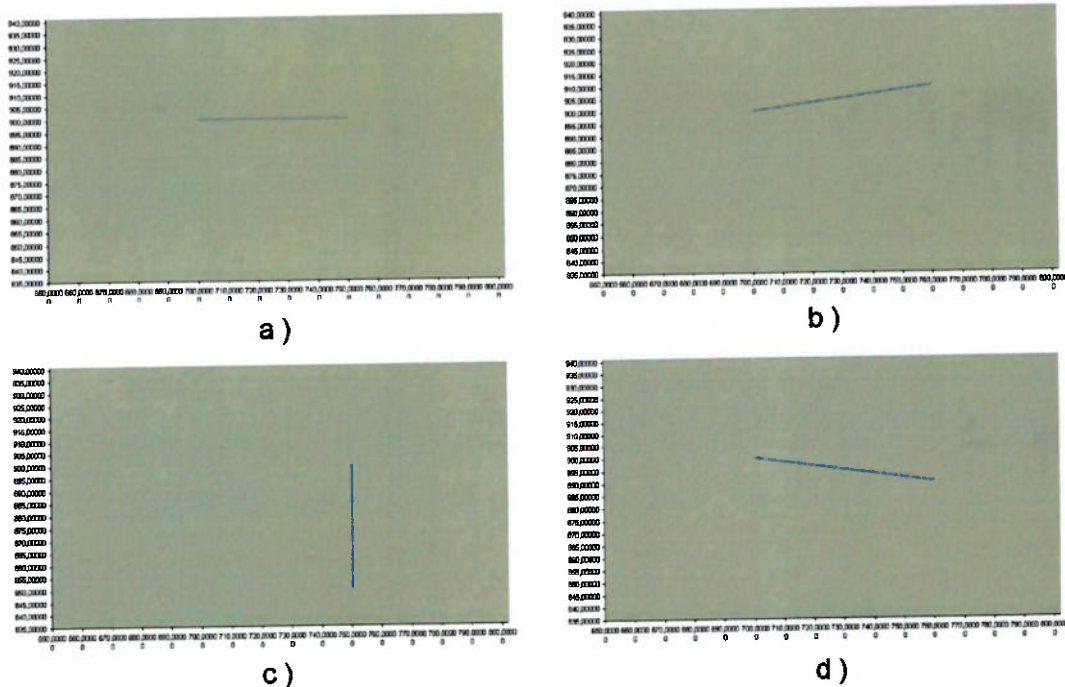


Figura 20 – Trajetória linear  
(A) reta // eixo Y; (b) reta  $m > 0$ ; (c) reta  $m < 0$  e (d) reta // eixo Z.

2. Trajetória circular com a entrada do raio e sentido horário e partindo do octante inicia 1, sem um oitavo de circunferência, um quatro de circunferência, semicírculo e circunferência inteira, com raio de 40 mm.

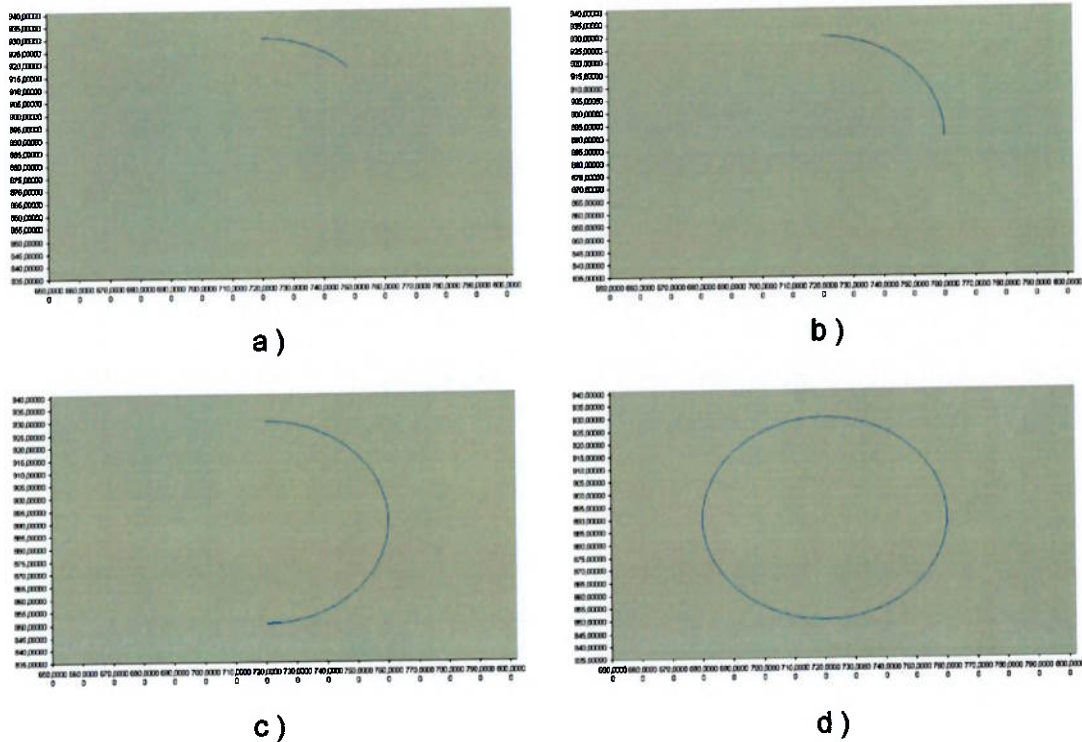


Figura 21 – Trajetória Circular  
(A) um octante; (b) um quadrante; (c) semicírculo e (d) circunferência inteira.

- Com os primitivos vamos apresentar uma trajetória mais complexa que pode ser traçada com a utilização dos primitivos: seguimento de reta e setores circular, apresentados em seqüência.

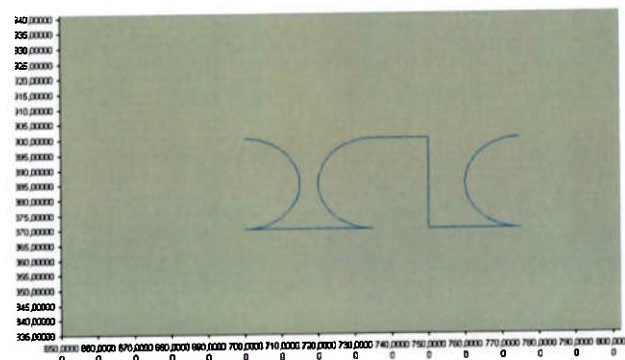


Figura 22 – Trajetória combinada de seguimento de reta e circular

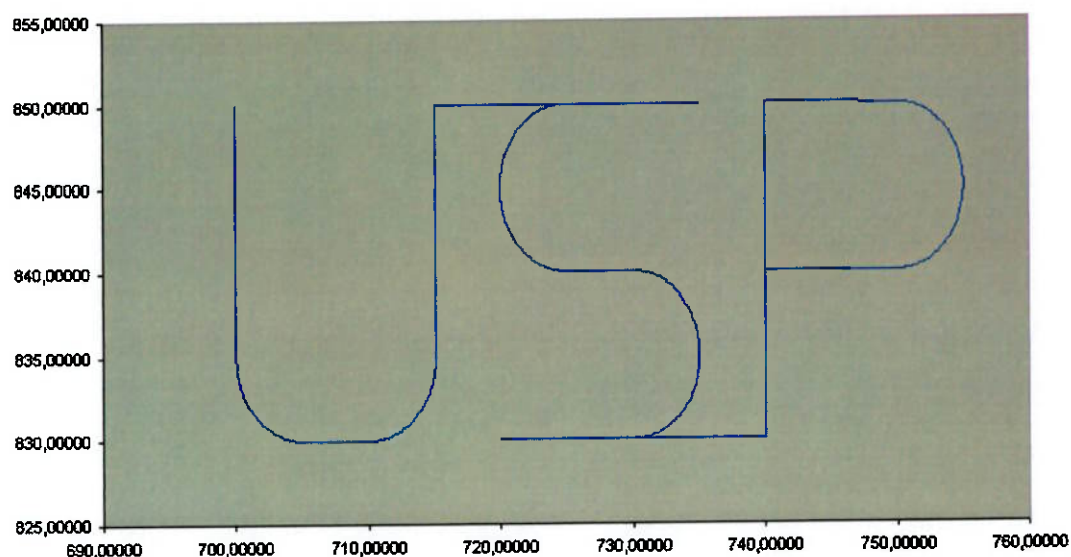


Figura 23 – Trajetória combinada de seguimento de reta e circular, para obtenção de formas mais complexas

Os exemplos apresentados acima pelo simulados pode ser copiados para as maquina de usinagem em estudo, contudo devemos realizar os ensaios como vista a ressalva das forças de usinagem, pois este simulador não nos fornece dados a este respeito.

Os códigos fonte deste simulador seguem no corpo deste relatório no anexo B, os quais são apresentados na integra para posteriores consulta e reprodução dos ensaios.

## **6. Resultados Experimentais**

A idéia foi utilizar alguma máquina da oficina do prédio da Mecânica da Escola Politécnica para a realização dos ensaios, porém devido à altura do tetraglide, poucas máquinas seriam capazes de realizar este ensaio. Não conseguimos nenhuma fresadora com altura capaz de se ajustar a nossa máquina e dentre as furadeiras, apenas uma tinha altura suficiente para realizar os ensaios, mas a distância entre a coluna desta e o cabeçote era curto e foi necessário fazer uma adaptação na mesa do tetraglide, criando assim um prolongamento desta através de uma base de madeira e sargentos fixadores. Este prolongamento pode alterar os resultados, pois ele gera peso extra para a mesa resultando em um maior esforço nas articulações e perda de rigidez da mesa nos ensaios.

### **6.1. Primeira série de ensaios**

Os Ensaios foram realizados na Sala MS-09, com os seguintes equipamentos:

- Furadeira de bancada
- Tetraglide
- Computador
- Filmadora: Sony Digital HandCam 8
- Sargentos para fixação
- Prolongamento de madeira para a mesa
- Paquímetro 200mm acurácia 0,05 mm
- Trena 5 m acurácia 0,5 mm
- Peça de Parafina
- Peça de Nylon
- Peça de Alumínio

Em uma primeira etapa realizamos alguns ensaios com objetivo apenas de observarmos o comportamento da máquina e do material a ser ensaiado em diferentes operações sem maiores preocupações com resultados numéricos. Nos preocupamos em aumentar a dificuldade da realização dos ensaios para avaliarmos até onde poderíamos chegar.

Este ensaio foi extremamente importante, pois através avaliamos algumas limitações desta máquina, o que nos fez reformular alguns passos e realiza algumas mudanças. Os ensaios estão apresentados nesta sequência:

- Rotação do Mandril: 1300 rpm
- Broca Utilizada: Aço Rápido D= 3 mm
- Fresa Utilizada: Aço Rápido D=4mm

#### **1º Ensaio**

- Operação: Furação;
- Material: Parafina;
- Rigidez da Mesa: Boa, não observou vibrações durante o ensaio;
- Suavidade de movimento: A uma velocidade de avanço de aproximadamente 0,5 mm/s, a máquina apresentou movimento suave;
- Repetibilidade (Precisão): Boa, a Máquina em todas as repetições subiu ao mesmo ponto;
- Acurácia: Boa;

Acabamento final: Bom, Semelhante ao de uma furação feita com a peça fixada na furadeira de bancada. Medida final:  $D_{\text{furo}} = 3,4 \text{ mm}$



**Figuras 24 e 25: Furação em parafina**

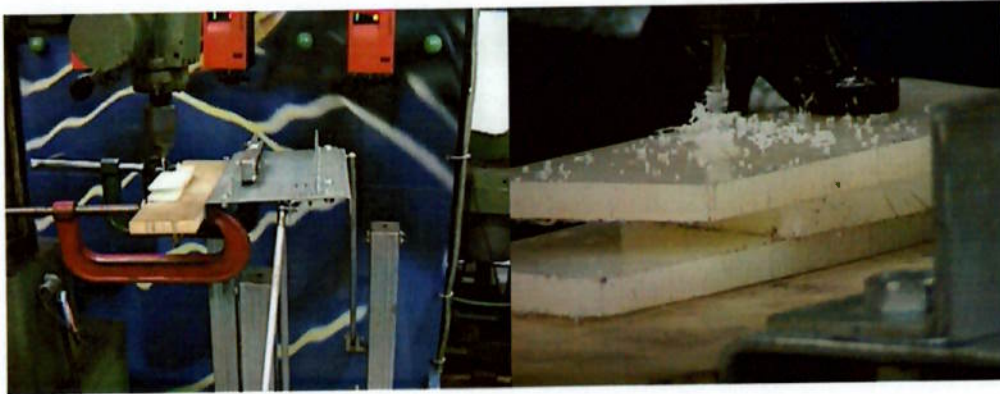
## **2º Ensaio**

- Operação: Furação;
- Material: Nylon;

Nos ensaios utilizando nylon são furados 3 placas de espessura 6 mm, simulando uma furação em conjunto

- Rigidez da Mesa: Muito boa não observou vibrações no processo;
- Suavidade de movimento: A uma velocidade de avanço de aproximadamente 0,5 mm/s, a máquina apresentou movimentos suaves;
- Repetibilidade (Precisão): Furou 3 placas simulando uma furação em conjunto;
- Acurácia: Boa.

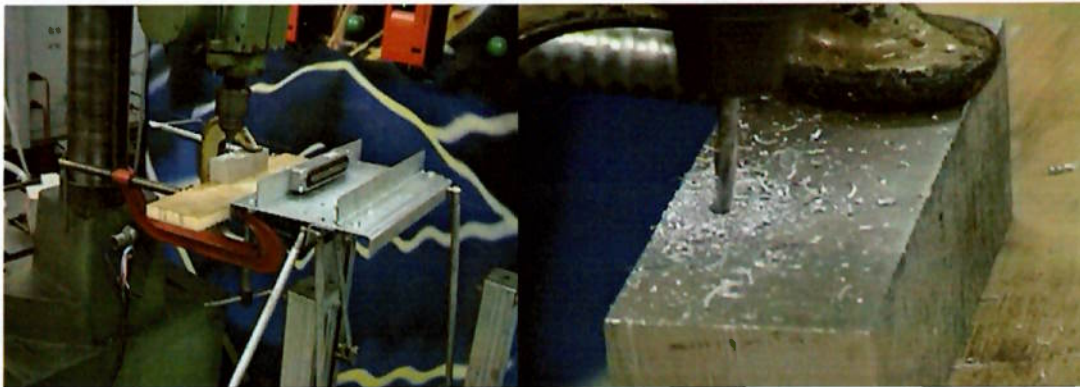
Acabamento final: Semelhante ao de uma furação feita com a peça fixada em uma furadeira de bancada. Medida final:  $D_{\text{furo}} = 3 \text{ mm}$



Figuras 26 e 27: Furação em nylon

### 3º Ensaio

- Operação: Furação;
- Material: Alumínio;
- Rigidez da Mesa: Boa, não observou vibrações no processo, na primeira furação. Quando tentou repetir a furação para o mesmo furo ocorreram vibrações no alongamento da plataforma, devido o contato da broca com uma superfície irregular;
- Suavidade de movimento: Movimentos suaves a 0,5 mm/s;
- Repetibilidade (Precisão): Devido a imprecisões de outros fatores o segundo furo saiu levemente deslocado;
- Acabamento final: Semelhante ao de uma furação feita com a peça fixada em uma furadeira de bancada;
- Medida Final:  $D_{furo} = 3\text{mm}$ .



Figuras 28 e 29: Furação em alumínio

#### 4º Ensaio

- Operação: Fresagem em uma direção qualquer (Movimentando apenas um dos atuadores);
- Material: Parafina;
- Rigidez da Mesa: Boa, não apresentou vibração durante o processo;
- Suavidade de movimento: Suave;
- Acabamento final: Ruim devido à ferramenta utilizada no ensaio não ser adequada para esta operação (ferramenta utilizada foi a broca de 4 mm), porém conseguimos reproduzir a trajetória da mesa na peça;
- Repetibilidade (Precisão): Muito boa, repetiu a mesma trajetória duas vezes;



Figuras 30 e 31: Fresamento em parafina

OBS: A trajetória escolhida consiste na movimentação do fuso 1 com os outros três parados. A trajetória resultante é uma trajetória circular. Seria uma simulação de um fresamento quando a máquina não apresentasse os problemas de controle.

#### **5º Ensaio**

- Operação: Fresagem com interpolação linear;
- Material: Parafina;
- Rigidez da Mesa: Boa, não apresentou vibrações;
- Repetibilidade (Precisão): Boa;
- Acabamento final: Regular, porém consideravelmente melhor que no processo acima;
- Largura do rasgo = 4,2 mm.



Figuras 32 e 33: Fresamento em parafina

#### **6º Ensaio**

- Operação: Fresagem;
- Material: Nylon;
- Rigidez da Mesa: Boa;
- Repetibilidade (Precisão): Boa



Figuras 34 e 35: Fresamento em nylon

## 6.2. Segunda série de ensaios

Baseado nas observações verificadas nos primeiros ensaios decidiu realizar uma segunda série de ensaios preocupados com resultados mais conclusivos. Nesta etapa foi verificada a influência da rotação da máquina na precisão desta. Verificou os erros de posicionamento e suas causas. Os Ensaio foram realizados na Sala MS-09, com os seguintes equipamentos:

- Furadeira de bancada
- Tetraglide
- Computador
- Sargentos para fixação
- Prolongamento de madeira para a mesa
- Paquímetro 200mm acurácia 0,05 mm
- Peça de Parafina
- Peça de Nylon
- Peça de Alumínio

D: Diâmetro da broca (fresa em caso de fresamento) utilizada

Rot Furadeira = n: Rotação do Mandril da Furadeira

Diâmetro Superficial: Diâmetro do furo na face superior

$$\text{Distorção} = \text{Diâmetro Superficial na Primeira execução do furo} - \text{Diâmetro Superficial na Segunda execução do furo}$$

$$\text{Início} = \text{Posição Inicial} = \text{Coordenada onde ocorre o primeiro contato da ferramenta com o material}$$

### **1º ensaio**

Material: Nylon

Nos ensaios utilizando nylon são furados 3 placas de espessura 6 mm, simulando uma furação em conjunto

Máquina: Furadeira

D: 4mm

Rot Furadeira = 630

Neste teste inicialmente a 10 mm/s penetramos 2 mm na peça e após recuarmos avançamos 2,5 mm com a mesma velocidade para verificarmos a repetibilidade. Para encerrar avançamos a 11,5 mm na profundidade.

Medida do furo primeira placa face inferior = 4

Medida do furo segunda placa face superior = 3.9

Profundidade final = 10,5 mm

Excesso de Vibrações no processo

### **2º Ensaio**

Material: Nylon

Nos ensaios utilizando nylon são furados 3 placas de espessura 6 mm, simulando uma furação em conjunto.

Máquina: Furadeira

D: 4MM

Rot Furadeira 1330

Neste teste inicialmente a 10 mm/s penetramos 4 mm na peça e após recuarmos avançamos 2 mm com a mesma velocidade para verificação de repetibilidade. Para encerrar avançamos a 17 mm na profundidade.

Início do furo\* 660

Diâmetro Furo I face Superior 4.3

Diâmetro Furo I Face Inferior 4.3

Diâmetro Furo II Face Superior 4.3

Diâmetro Furo III Face Superior 4.1

Profundidade atingida 18mm (Furo vazado nas três placas) e também 0,8 mm de madeira do suporte

Não Houve Vibrações no processo

### **3º Ensaio**

Material: Nylon

Máquina: Furadeira

D: 6 mm

Rot Furadeira 1330

Neste teste inicialmente a 10 mm/s penetramos 5 mm na peça e após recuarmos avançamos 3 mm com a mesma velocidade para verificação de repetibilidade. Para encerrar avançamos 10 mm na profundidade.

Início\* 440

Diâmetro Furo I Sup 7mm houve distorção

Diâmetro Face Inf 6 mm

Diâmetro Face II Sup 6mm

Profundidade 11,7 mm

Apresentou Poucas Vibrações

### **4º Ensaio**

Material: Alumínio

Máquina: Furadeira

D: 4 mm

Rot Furadeira 630

Neste teste inicialmente a 5 mm/s penetramos 6 mm na peça e após recuarmos avançamos 2 mm com a mesma velocidade para verificação de repetibilidade.

Início\* 350

Distorção no Diâmetro inicial = 1.6 mm

### **5º Ensaio**

Material: Alumínio

Máquina: Furadeira

D: 4mm

Rot Furadeira 630

Neste teste a 5 mm/s penetramos 9 mm na peça.

Início\* 410

Profundidade 8.8

Diâmetro Superfície 4.8 mm (Furo Oval) X 4.2mm

Diâmetro Interno do Furo 4 mm

Origem da Distorção - Momento fletor na direção da mesa.

Decidimos verificar a influência da força de usinagem e rotação do cabeçote da furadeira sobre a distorção. Para a realização deste ensaio escolhemos o alumínio, pois ele não apresenta distorção devido a efeitos térmicos.

Distorção na Repetição X Rotação Furadeira

Material Alumínio

Velocidade 5

n= 680 dist = 1.6

n= 200 dist = 0.9

Início em 370\* descendo ate 430\* subindo voltando com v 25 e repetindo ate 420\*

n= 390 dist = 1.5

Início em 370\* descendo ate 430\* voltando com v 25 e descendo ate 420\*

n = 1330 dist = 0.7

Início em 370\* descendo ate 430\* voltando com v 25 e descendo ate 420\*

Força (eq. 3.2.1); Torque (eq 3.2.2); Potência de Corte (eq. 3.2.3.)

Momento = Força interação peça Ferramenta \* 0.182 (maior distância entre ferramenta e juntas).

| rotação | Distorção | Avanço<br>(mm/v) | Ff   | Força  | Torque | Potência<br>Corte | Momento<br>Juntas |
|---------|-----------|------------------|------|--------|--------|-------------------|-------------------|
| 200     | 0,9       | 0,15             | 0,22 | 439,68 | 7,63   | 0,16              | 80,02             |
| 390     | 1,5       | 0,08             | 0,13 | 279,03 | 4,64   | 0,19              | 50,78             |
| 680     | 1,6       | 0,04             | 0,09 | 200,57 | 3,17   | 0,23              | 36,50             |
| 1330    | 0,7       | 0,02             | 0,04 | 109,03 | 1,46   | 0,20              | 19,84             |

Tabela 13 e 14 – Parâmetros do ensaio de furação

|           |       |
|-----------|-------|
| <b>FM</b> | 14,12 |
| <b>FT</b> | 3,03  |
| <b>Kd</b> | 7000  |
| <b>B</b>  | 1,355 |
| <b>J</b>  | 0,03  |
| <b>W</b>  | 1,3   |
| <b>d</b>  | 4     |
| <b>A</b>  | 1,085 |

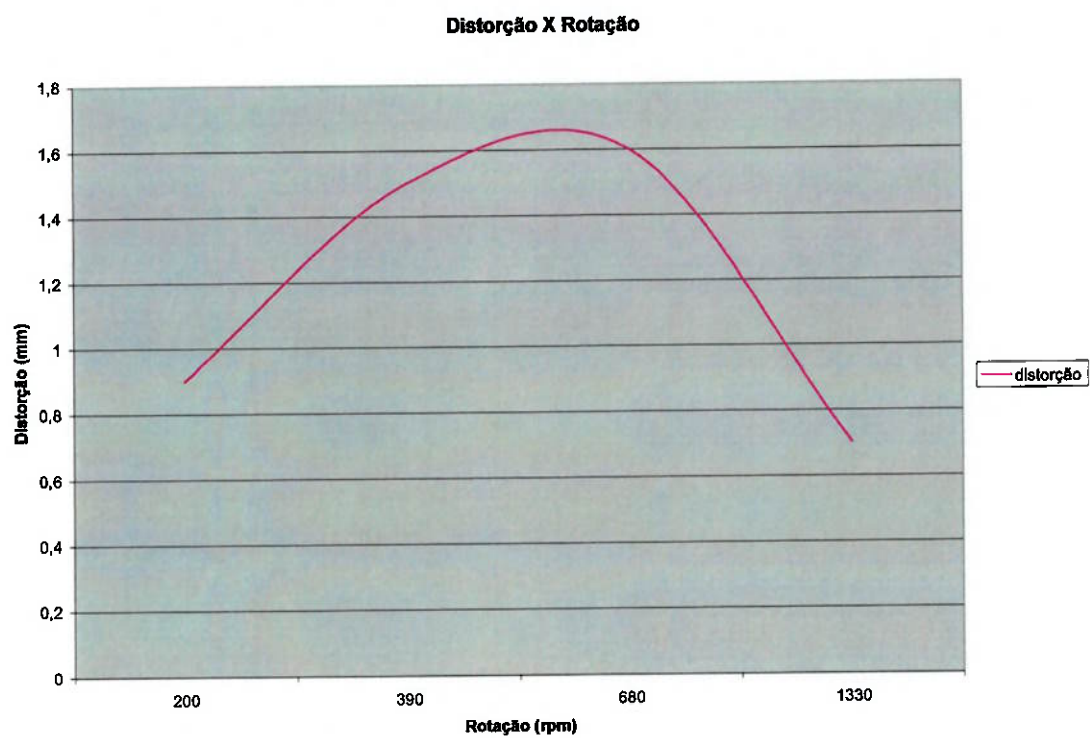


Figura 36 – Gráfico Distorção X Rotação

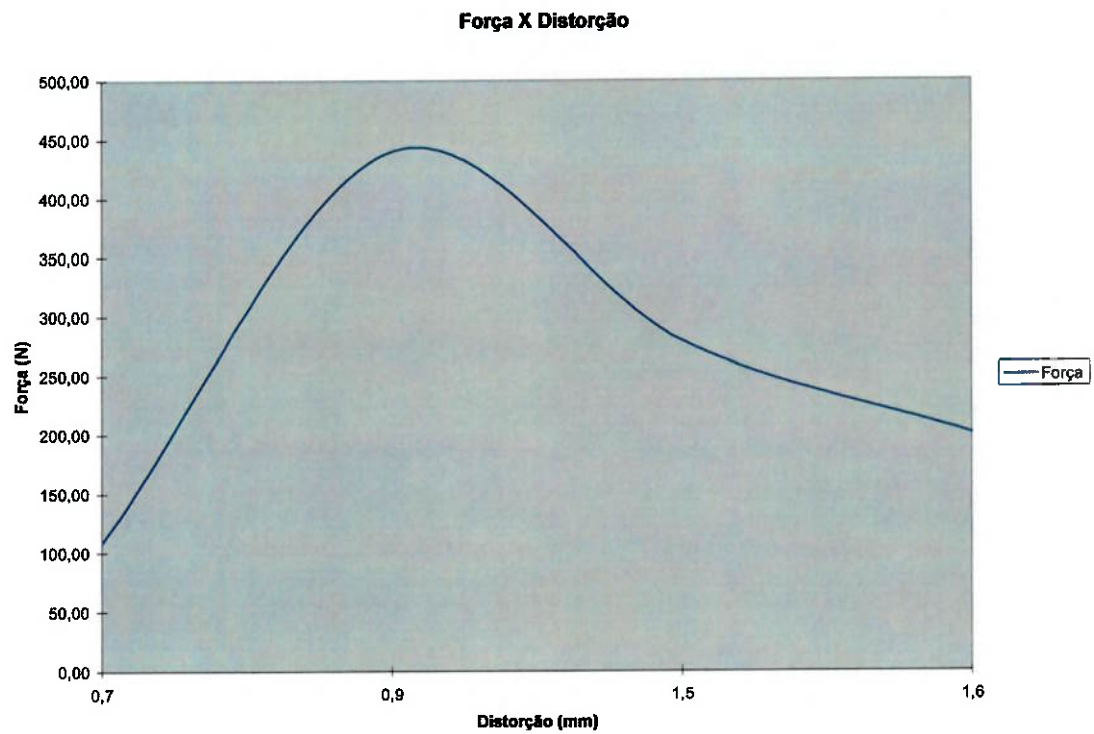


Figura 37 – Gráfico Força X Distorção

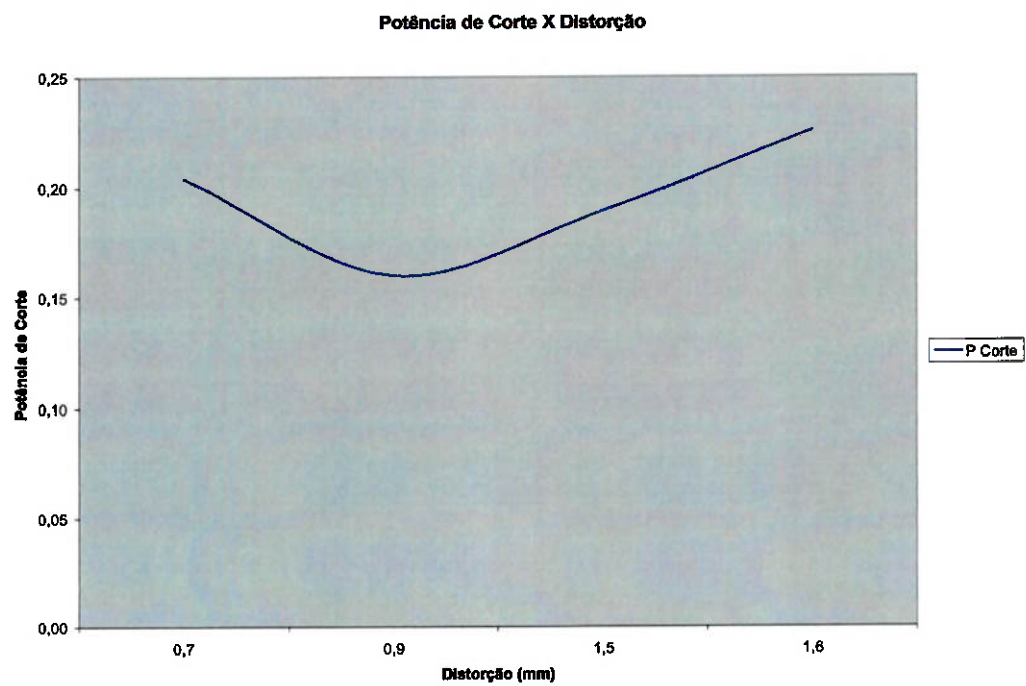


Figura 38 – Potência de Corte X Rotação

## **6º Ensaio**

### **FRESAMENTO**

fresa Helicoidal

ângulo de hélice 35°

diâmetro da fresa 4.3

Máquina Furadeira

n = 1330

Material Parafina

Trajectoria Qualquer

Subir Fuso I

Inicialmente Todos a\* 500

velocidade 20

Fuso I\* 800

Diâmetro canal 5 mm

Distancia Percorrida 39 mm

## **7º Ensaio**

Fresa Helicoidal

ângulo de hélice 35°

diâmetro da fresa 4.3

Máquina Furadeira

n = 1330

Material Parafina

Trajectoria Linear

Inicialmente todos a\* 500mm

Velocidade 0.5 mm/s

Profundidade Desejada = 3mm

Inicialmente todos os fusos em \*I 489 II, III e IV 100

Distancia Solicitada 30mm

Variação de Profundidade 4 mm

Distancia Percorrida 15 mm

Raio do Rasgo menor 4.2

Raio do Rasgo Inicio 5.4

### **8º Ensaio**

Furadeira

n = 1330

ângulo de hélice 35°

diâmetro da fresa 4.3

Material Nylon

Trajectoria Linear

Inicialmente Todos a\* 500mm

Velocidade 0.05 mm/s

\*Parâmetros em décimos de milímetros.

### **Erros de Profundidade Nylon**

| <b>Ensaio</b> | <b>Distancia<br/>Percorrida</b> | <b>Profundidade<br/>Medida</b> | <b>Erro</b> |
|---------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------|
| 1             | 12 mm                           | 10,5 mm                        | 1,5 mm      |
| 2             | 19 mm                           | 18,8 mm                        | 0,2 mm      |
| 3             | 13 mm                           | 11,7 mm                        | 1,3 mm      |

Tabela 15 – Erros profundidade Nylon

Erro Médio: 1,00 mm

Variância: 0,49

Desvio Padrão: 0,70

### Erros de Profundidade Alumínio

| Ensaio | Distancia<br>Percorrida | Profundidade<br>Medida | Erro   |
|--------|-------------------------|------------------------|--------|
| 4      | 6 mm                    | 4,8 mm                 | 1,2 mm |
| 5      | 9 mm                    | 8,8 mm                 | 0,2 mm |

Tabela 16 – Erros profundidade Alumínio

Erro Médio: 0,70 mm

Variância: 0,50

Desvio Padrão: 0,70 mm

### TOTAL

Erro Médio Total: 0,88 mm

Variância Total: 0,40

Desvio Padrão Total: 0,63

Este erro ocorreu devido ao peso do cabeçote sobre a mesa de usinagem.

### 6.3. Ensaios após implementação de trajetórias e sistema de usinagem

Após a implementação das trajetórias e do sistema de usinagem realizamos um ensaio de fresamento para verificar o comportamento da máquina. Isto seria importante, pois comprovaria a eficácia do novo sistema.

No ensaio realizado o novo sistema se comprovou eficaz surgindo poucas vibrações em nosso sistema, bom acabamento final das peças e possibilidade de utilização de todos os recursos do programa criado para os materiais escolhidos, que foram nylon e parafina.

A máquina mostrou boa repetibilidade em todas as trajetórias, pois por diversas vezes solicitamos um mesmo trajeto pré-definido, e não tivemos distorção nos resultados obtidos. Todos os rasgos têm a largura igual ao diâmetro da fresa.

Porém realizamos apenas um teste visando resultados numéricos, que foi o teste de erros de posicionamento em trajetória linear.

| Largura Solicitada | Largura Medida | Erro |
|--------------------|----------------|------|
| 30,00              | 29,90          | 0,10 |
| 20,00              | 19,85          | 0,15 |
| 20,00              | 19,80          | 0,20 |
| 20,00              | 19,90          | 0,10 |

Tabela 17 – Erros na largura - nylon.

Média: 0,14

Variância:  $2,29 \times 10^{-3}$

Desvio Padrão:  $4,79 \times 10^{-2}$

## **7. Discussão dos Resultados**

Mesmo tendo sido projetada visando entretenimento, a máquina apresentou resultados satisfatórios para os materiais escolhidos como pudemos comprovar pelos diâmetros finais dos furos. Sobre os ensaios vale destacar:

Na primeira série de ensaios ocorreram distorções nos trabalhos com parafina devido à baixa resistência térmica desta e o aquecimento da broca, como podemos comprovar pelas gotas de parafina líquida no suporte após os ensaios.

Na realização dos ensaios foi necessária a colocação de um dispositivo que aumentava a área útil da mesa, que pode ter causado pequenos desvios em alguns resultados. Isto ocorreu devido à limitação das máquinas que estavam disponíveis para a realização dos ensaios.

A máquina apresentou boa rigidez nos processos de furação em parafina e nylon e fresamento em parafina. Para materiais com maior dureza a máquina deve ter suas hastes reforçadas e deve ocorrer também a diminuição do laço estrutural formando entre a ferramenta e a base. Para este caso é recomendada a utilização de plataformas do tipo “hexabot”, que possuem boa rigidez, maior espaço de trabalho com baixo laço estrutural.

Verificou-se um erro médio de 0,88 mm entre os valores desejados e obtidos de profundidade dos furos. Isto ocorreu devido ao peso que o cabeçote da furadeira exercia sobre a mesa e à deflexão da broca e das juntas. O Posicionamento se mostrou preciso quando realizamos ensaios em vazio.

A distorção do diâmetro para o nylon foi semelhante a uma furação realizada em furadeira de bancada. A distorção no diâmetro do alumínio foi devido às forças envolvidas no processo. Para este processo recomendamos os trabalhos com forças de usinagem abaixo de 100 N.

Para a realização das trajetórias mantivemos a linguagem Visual Basic, que por hora atendeu nossas necessidades.

Após a construção do sistema de usinagem a máquina apresentou melhoras consideradas quanto à rigidez e acabamento final das peças usinadas. Porém devido à

irregularidade do piso foi necessário colocar um dispositivo mais sólido na base do sistema.

Todas as interpolações funcionam perfeitamente, com destaque para a interpolação circular, que devido à arquitetura paralela pode realizar movimentos não realizáveis em uma máquina convencional.

Após implementarmos as trajetórias primitivas: linear e circular, acumulamos os conhecimentos da performance desta plataforma para implementação de trajetórias mais complexas a partir de uma função superfície desejada. Como exemplo desta possibilidade, segue abaixo a seguinte função:

$$Z(y) = Z_0 + A * \sin(K * y),$$

Valores de entrada:

- $Z_0$  Cota inicial para evitar os limites da máquina;
- $A$ , sendo a amplitude da senoide;
- $K$ , determina o período da senoide;
- $y$   $[0, 2*\pi]$ , intervalo de variação da variável  $y$  para um ciclo.

Resultados do simulador:

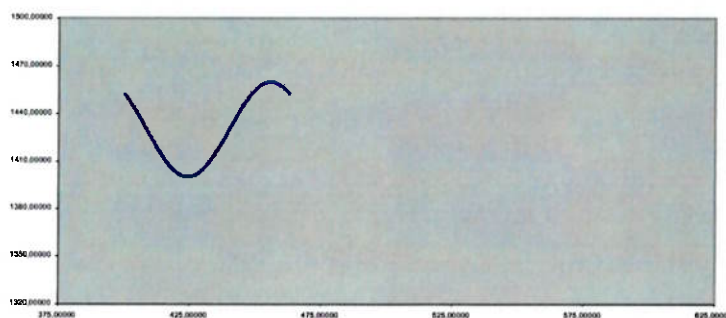


Figura 39 – Trajetória de uma função senoidal

Para obter a saída acima na plataforma utiliza-se a mesma codificação no programa da plataforma e Obtém-se a saída das posições do centro geométrico da plataforma seguindo esta trajetória e tudo que esta fixo a plataforma percorrem a mesma trajetória. Segue no anexo C o código complementar desta saída.

## 8. Conclusão

Embora esta máquina em sua origem tenha sido projetada para funcionar apenas como equipamento de entretenimento, os resultados obtidos neste projeto vêm comprovar a eficácia de um sistema de usinagem com peça movimentada pela plataforma com atuadores em arquitetura paralela. Neste trabalho obtivemos resultados animadores e que viabilizam futuramente a comercialização de máquinas como esta.

O sistema de posicionamento mostrou-se bastante eficaz para um sistema de usinagem. O sistema de posicionamento revelou resultados satisfatórios quanto à rigidez, precisão e acurácia, concluindo assim que uma máquina como esta pode servir como base para movimentação de um centro de usinagem, por exemplo.

Chegamos assim no fim de mais uma etapa deste projeto, que existe desde 1998. Acreditamos que acrescentamos algo na evolução da máquina de cinemática paralela (tetraglide). Gostaríamos de salientar que este trabalho não acaba por aqui e ainda existe muito a pesquisar e implementar visando à melhoria das funcionalidades desta máquina.

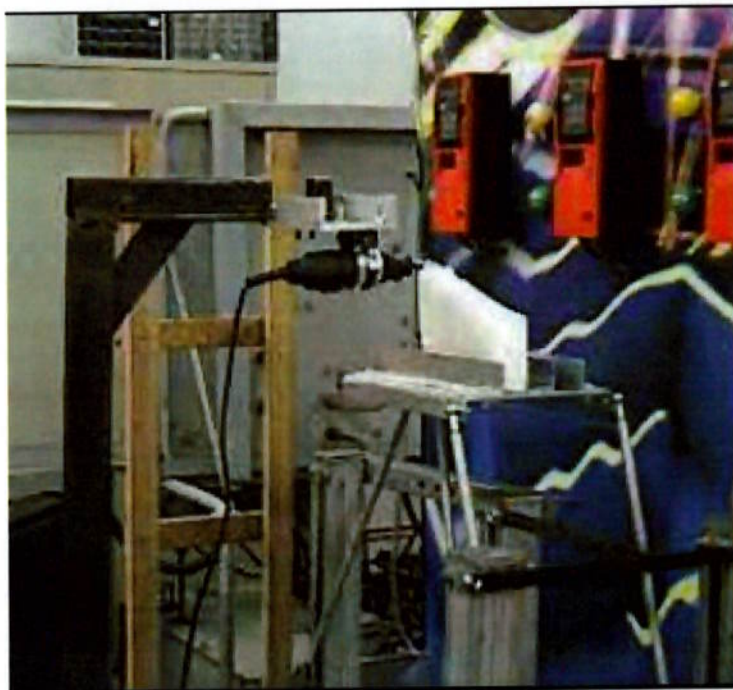


Figura 40 – Sistema de Usinagem Implantado



Figura 41e 42 – Sistema de usinagem implantado fresando parafina

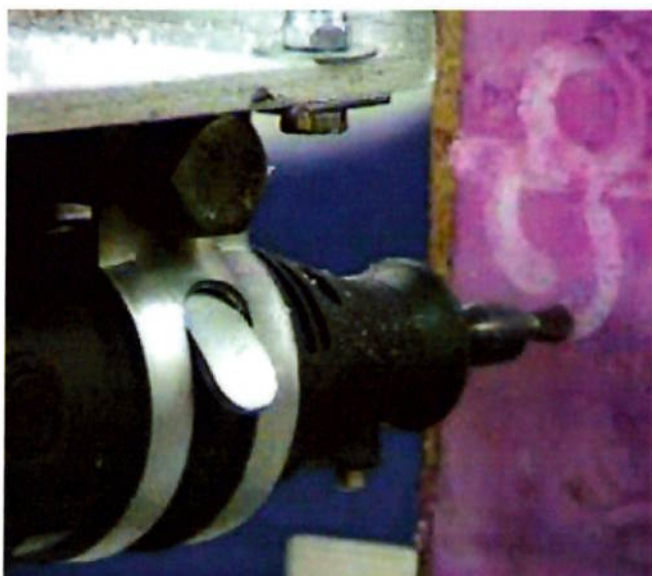


Figura 43 – Sistema de usinagem implantado fresando nylon

## **9. Referência Bibliografias**

ERDMAN, A. G.; SANDOR, G. N. **Mechanism Design: Analysis and Synthesis**. New York: Prentice-Hall. v.1. 3ª Edição. 1997.

RASZL, G.; COELHO, T. A. H. **Characterization of a prototype of a robotic parallel structure considering its potential application as a machine tool**. Paper. São Paulo. Janeiro 2004.

COELHO, T. A. H. **Mecanismos: topologia, análise e síntese**. Paper. São Paulo. Janeiro 2004.

RASL, G. **Avaliação do potencial de utilização de um mecanismo paralelo como máquina ferramenta**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica. Dissertação de Tese para Obtenção do Título de Mestre. São Paulo. Janeiro 2003.

MORAES, D. T. B.; BOCZKO, M. **Sistema de posicionamento por cinemática paralela**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica. Relatório de projeto de formatura. São Paulo. Dezembro 2000.

FILHO, S. C. T.; MARCHIORI, R. **Projeto de um robô de arquitetura paralela do tipo hexaglide para usinagem**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica. Relatório de projeto de formatura. São Paulo. Dezembro 2003.

BLANCO, R. M. **Cinemática Inversa**. Unicamp. Engenharia Mecatrônica. Apostila. Campinas. Janeiro 2003.

CABRAL, E. L. L. **Análise de Robôs**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica. Apostila. Capítulos 2 e 3. São Paulo. Janeiro 2000.

GONÇALVES, L. M. G. **Robótica: Sistemas Sensorial e Motor**. Apostila. Campinas. Janeiro 2003. Disponível em: [www.ic.unicamp.br/~lmarcos/courses/mo810](http://www.ic.unicamp.br/~lmarcos/courses/mo810)

HORIKAWA, O.; **Máquinas Ferramentas de Controle Numérico**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica. Apostila. São Paulo. Abril 2001.

COELHO, T. A. H.; IBRAIN, R. C. PMR2430. **Mecanismos**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica. Notas de Aula. São Paulo. Fevereiro 2003.

BARROS, E. A. PMR2560. **Introdução à Robótica**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica. Notas de Aula. São Paulo. Agosto 2004.

BONEV, I. **The True Origins of Parallel Robots**. Julho 2001. Disponível em: <http://www.parallemic.org/Reviews/>

BONEV, I. **General Terminology Related to Parallel Mechanisms**. Janeiro 2001. Disponível em: <http://www.parallemic.org/Terminology/>

BONEV, I. **The Parallel Mechanisms Information Center**. Novembro 2003. Disponível em: <http://www.parallemic.org/>

HEXEL CORPORATION. **Hexabot Series**. 1<sup>tm</sup>. Junho 2004. Disponível em: <http://www.hexel.com/hexabot.htm>

Group Starrag-Heckert. **Starrag-Heckert.** Junho 2004. Disponível em:  
<http://www.starragheckert.com/>

GE Plastics South America - **Noril GTX** – Setembro 2004 - Tabela das Propriedades  
[http://www.geplastics.com.br/resins/materials/tab\\_noryl\\_gtx.html](http://www.geplastics.com.br/resins/materials/tab_noryl_gtx.html)

## V - ANEXOS

### ***ANEXO A – Código do programa de movimentação da plataforma em Visual Basic***

INTERBUS.BAS

```
*****
** IBS G4 HLI : INTERBUS Controller Initialization Module **
** Application type : Microsoft Visual Basic **
** Controller-ID : ISASC1 **
*****
** Produced by: **
** HLI-Export-Filter Version 1.04 (02/99) **
** (c) Phoenix Contact 01/1998 **
*****

' This array will be set to the bus configuration data
Private IBS_DeviceList(0 To 3) As T_HLI_DEVICE_DATA

' Instance of Controller State Object
Public SC1 As T_HLI_STATE

' private variable to substitute Null reference
Private hliNull As Integer

' Global Process Data Objects
Public PLAT_4_CONTROL As Integer
Public PLAT_4_VEL As Integer
Public PLAT_4_POS As Integer
Public PLAT_4_STATUS As Integer
Public PLAT_4_VEL_STA As Integer
Public PLAT_4_POS_STA As Integer
Public PLAT_3_CONTROL As Integer
Public PLAT_3_VEL As Integer
Public PLAT_3_POS As Integer
Public PLAT_3_STATUS As Integer
Public PLAT_3_VEL_STA As Integer
Public PLAT_3_POS_STA As Integer
Public PLAT_2_CONTROL As Integer
Public PLAT_2_POS As Integer
Public PLAT_2_VEL As Integer
Public PLAT_2_STATUS As Integer
Public PLAT_2_VEL_STA As Integer
```

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| Public PLAT_2_POS_STA | As Integer |
| Public PLAT_1_CONTROL | As Integer |
| Public PLAT_1_VEL     | As Integer |
| Public PLAT_1_POS     | As Integer |
| Public PLAT_1_STATUS  | As Integer |
| Public PLAT_1_VEL_STA | As Integer |
| Public PLAT_1_POS_STA | As Integer |

' function to initialize the device configuration array

Function SC1\_SetConfigList(i As Integer, Seg As Integer, Pos As Integer, ID As Integer, Lg As Integer, Lev As Integer, G As Integer, alt As Integer, deac As Integer, st As String) As Integer

Dim z As Integer

IBS\_DeviceList(i).Segment = Seg

IBS\_DeviceList(i).Position = Pos

IBS\_DeviceList(i).ID\_Code = ID

IBS\_DeviceList(i).LengthCode = Lg

IBS\_DeviceList(i).Level = Lev

IBS\_DeviceList(i).Group = G

IBS\_DeviceList(i).Group = G

IBS\_DeviceList(i).Alternative = alt

IBS\_DeviceList(i).Deactivated = deac

For z = 1 To Len(st)

IBS\_DeviceList(i).Station(z - 1) = Asc(Mid(st, z, 1))

Next

IBS\_DeviceList(i).Station(z) = 0

End Function

```
#####
'#                                                                 #
'#   Call this function for startup of the INTERBUS system        #
'#                                                                 #
'#####
```

Public Function IBS\_HLI\_Init\_SC1() As Integer  
Dim ret As Integer

```
' initialize configuration array
Call SC1_SetConfigList(0, 1, 0, 227, 3, 0, 255, 255, &H0, "PLATAFORMA 4")
Call SC1_SetConfigList(1, 2, 0, 227, 3, 0, 255, 255, &H0, "PLATAFORMA 3")
Call SC1_SetConfigList(2, 3, 0, 227, 3, 0, 255, 255, &H0, "PLATAFORMA 2")
Call SC1_SetConfigList(3, 4, 0, 227, 3, 0, 255, 255, &H0, "PLATAFORMA 1")

' call init function
ret = IBS_HLI_Init_CFG(ISASC1, SC1, IBS_STANDARD, 4, IBS_DeviceList(0))
If ret = HLI_OKAY Then
' call PDO registration functions
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 1, 0,
IBS_PDO_WORD, 0, 0, 16, PLAT_4_CONTROL, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 1, 0,
IBS_PDO_WORD, 2, 0, 16, PLAT_4_VEL, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 1, 0,
IBS_PDO_WORD, 4, 0, 16, PLAT_4_POS, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 1, 0,
IBS_PDO_WORD, 0, 0, 16, PLAT_4_STATUS, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 1, 0,
IBS_PDO_WORD, 2, 0, 16, PLAT_4_VEL_STA, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 1, 0,
IBS_PDO_WORD, 4, 0, 16, PLAT_4_POS_STA, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 2, 0,
IBS_PDO_WORD, 0, 0, 16, PLAT_3_CONTROL, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 2, 0,
IBS_PDO_WORD, 2, 0, 16, PLAT_3_VEL, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 2, 0,
IBS_PDO_WORD, 4, 0, 16, PLAT_3_POS, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 2, 0,
IBS_PDO_WORD, 0, 0, 16, PLAT_3_STATUS, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 2, 0,
IBS_PDO_WORD, 2, 0, 16, PLAT_3_VEL_STA, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 2, 0,
IBS_PDO_WORD, 4, 0, 16, PLAT_3_POS_STA, hliNull)
Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 3, 0,
IBS_PDO_WORD, 0, 0, 16, PLAT_2_CONTROL, hliNull)
```

```

    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 3, 0,
IBS_PDO_WORD, 4, 0, 16, PLAT_2_POS, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 3, 0,
IBS_PDO_WORD, 2, 0, 16, PLAT_2_VEL, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 3, 0,
IBS_PDO_WORD, 0, 0, 16, PLAT_2_STATUS, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 3, 0,
IBS_PDO_WORD, 2, 0, 16, PLAT_2_VEL_STA, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 3, 0,
IBS_PDO_WORD, 4, 0, 16, PLAT_2_POS_STA, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 4, 0,
IBS_PDO_WORD, 0, 0, 16, PLAT_1_CONTROL, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 4, 0,
IBS_PDO_WORD, 2, 0, 16, PLAT_1_VEL, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_OUTPUT, 4, 0,
IBS_PDO_WORD, 4, 0, 16, PLAT_1_POS, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 4, 0,
IBS_PDO_WORD, 0, 0, 16, PLAT_1_STATUS, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 4, 0,
IBS_PDO_WORD, 2, 0, 16, PLAT_1_VEL_STA, hliNull)
    Call IBS_HLI_RegisterPDOObject(ISASC1, IBS_PDO_INPUT, 4, 0,
IBS_PDO_WORD, 4, 0, 16, PLAT_1_POS_STA, hliNull)
' Reset all outputs
Call IBS_HLI_ResetAllOutputs(ISASC1)
' Start bus now
ret = IBS_HLI_StartBus(ISASC1)
End If
IBS_HLI_Init_SC1 = ret

```

End Function

```

#####
'#                                     #
'#           Shut-down of the INTERBUS system -           #
'#   Call this function before your application terminates !   #
'#                                     #
#####

```

```

Public Function IBS_HLI_Exit_SC1() As Integer
    IBS_HLI_Exit_SC1 = IBS_HLI_Exit(ISASC1)
End Function

```

```

#####
'#                                     #
'#      Cyclic processing of the INTERBUS system -      #
'#  This is a PROPOSED FUNCTION for cyclic processing of the  #
'#  HLI state machine and the INTERBUS process data objects  #
'#                                     #
#####

Public Sub IBS_HLI_Process_SC1()
' HLI State machine
Call IBS_HLI_Process(ISASC1)
' Look at the Controller-State-object for INTERBUS-State ...

If SC1.BusState = HLI_IBS_RUN Then

' Update of Interbus-S In-data
Call IBS_HLI_PD_In(ISASC1)

' Here you can place your application-specific code
' for process data control */

' Update of Interbus-S Out-data
Call IBS_HLI_PD_Out(ISASC1)
End If
End Sub

' ----- END OF FILE -----

```

## FORM1.FRM

VERSION 4.00

Begin VB.Form Form1

BorderStyle = 1 'Fixed Single  
Caption = "Tetraglide"  
ClientHeight = 7545  
ClientLeft = 3570  
ClientTop = 675  
ClientWidth = 4335  
ControlBox = 0 'False  
Height = 7950  
Left = 3510  
LinkTopic = "Form1"  
MaxButton = 0 'False  
MinButton = 0 'False  
ScaleHeight = 7545  
ScaleWidth = 4335  
Top = 330  
Width = 4455

Begin VB.Frame frame13

Caption = "Posicao Atual do CG da Plataforma (mm)"  
Height = 615  
Left = 120  
TabIndex = 56  
Top = 2040  
Width = 4095

Begin VB.Label PAtualZ

Caption = "0"  
BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}  
Name = "Arial"  
Size = 12  
Charset = 0  
Weight = 700  
Underline = 0 'False  
Italic = 0 'False  
Strikethrough = 0 'False

EndProperty

ForeColor = &H000000C0&  
Height = 255  
Left = 2880  
TabIndex = 62  
Top = 240  
Width = 1095

```

End
Begin VB.Label PAtualY
    Caption      = "0"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
        Name      = "Arial"
        Size      = 12
        Charset   = 0
        Weight    = 700
        Underline  = 0 'False
        Italic     = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor    = &H000000C0&
    Height       = 255
    Left         = 960
    TabIndex     = 61
    Top          = 240
    Width        = 975
End
Begin VB.Label Label15
    Caption      = "Posição Z"
    Height       = 255
    Index        = 2
    Left         = 2040
    TabIndex     = 58
    Top          = 240
    Width        = 735
End
Begin VB.Label Label15
    Caption      = "Posição Y"
    Height       = 255
    Index        = 1
    Left         = 120
    TabIndex     = 57
    Top          = 240
    Width        = 735
End
End
Begin VB.Frame Frame6
    Caption      = "Interpolação Circular"
    Enabled      = 0 'False
    Height       = 1215
    Left         = 120
    TabIndex     = 41
    Top          = 5640

```

```

Width      = 4095
Begin VB.TextBox TextFinal
    Enabled   = 0 'False
    Height    = 285
    Left      = 3480
    TabIndex  = 55
    Text      = "2"
    Top       = 720
    Width     = 495
End
Begin VB.TextBox TextInicial
    Enabled   = 0 'False
    Height    = 285
    Left      = 2280
    TabIndex  = 53
    Text      = "1"
    Top       = 720
    Width     = 495
End
Begin VB.TextBox TxRaio
    Enabled   = 0 'False
    Height    = 285
    Left      = 1200
    TabIndex  = 43
    Text      = "0"
    Top       = 360
    Width     = 615
End
Begin VB.TextBox TVeloc
    Enabled   = 0 'False
    Height    = 285
    Left      = 3360
    TabIndex  = 42
    Text      = "10"
    Top       = 360
    Width     = 615
End
Begin VB.Label Label11
    Caption    = "Final :."
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 255
    Left       = 3000
    TabIndex   = 54
    Top        = 840
    Width      = 495

```

```

End
Begin VB.Label Label10
    Caption      = "Inicial :'"
    Enabled      = 0 'False
    Height       = 255
    Left         = 1680
    TabIndex     = 52
    Top          = 840
    Width        = 615
End
Begin VB.Label Label7
    Caption      = "Octantes: 1 a 8 -->"
    Enabled      = 0 'False
    Height       = 255
    Left         = 240
    TabIndex     = 51
    Top          = 840
    Width        = 1335
End
Begin VB.Label Label9
    AutoSize     = -1 'True
    Caption      = "Raio (mm)"
    Enabled      = 0 'False
    Height       = 195
    Left         = 240
    TabIndex     = 45
    Top          = 360
    Width        = 705
End
Begin VB.Label Label8
    Caption      = "Velocidade (mm/s)"
    Enabled      = 0 'False
    Height       = 255
    Left         = 1920
    TabIndex     = 44
    Top          = 360
    Width        = 1335
End
Begin VB.Frame Frame5
    Caption      = "Interpolação linear - inclinação nula"
    Enabled      = 0 'False
    Height       = 855
    Left         = 120
    TabIndex     = 36

```

```

Top      = 4680
Width    = 4095
Begin VB.TextBox FinalZ
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 285
    Index      = 1
    Left       = 1800
    TabIndex   = 59
    Text       = "0"
    Top        = 360
    Width      = 495
End
Begin VB.TextBox VelLinear
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 285
    Left       = 3480
    TabIndex   = 40
    Text       = "10"
    Top        = 360
    Width      = 495
End
Begin VB.TextBox FinalY
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 285
    Index      = 0
    Left       = 600
    TabIndex   = 39
    Text       = "0"
    Top        = 360
    Width      = 495
End
Begin VB.Label Label12
    Caption    = "Zfinal"
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 255
    Left       = 1320
    TabIndex   = 60
    Top        = 360
    Width      = 495
End
Begin VB.Label Label6
    Caption    = "Veloc. (mm/s)"
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 255
    Left       = 2400

```

```

    TabIndex    = 38
    Top         = 360
    Width       = 975
End
Begin VB.Label Label5
    AutoSize    = -1 'True
    Caption     = "Yfinal"
    Enabled     = 0 'False
    Height      = 195
    Left        = 120
    TabIndex    = 37
    Top         = 360
    Width       = 435
End
End
Begin VB.Frame Frame4
    Caption     = "Modo de Movimentação"
    Height      = 1095
    Left        = 2160
    TabIndex    = 33
    Top         = 840
    Width       = 2055
    Begin VB.OptionButton Option3
        Caption   = "Interpolação Circular"
        Height    = 255
        Left      = 120
        TabIndex  = 46
        Top       = 720
        Width     = 1815
    End
    Begin VB.OptionButton Option2
        Caption   = "Interpolação linear"
        Height    = 255
        Left      = 120
        TabIndex  = 35
        Top       = 480
        Width     = 1815
    End
    End
    Begin VB.OptionButton Option1
        Caption   = "Manual"
        Height    = 255
        Left      = 120
        TabIndex  = 34
        Top       = 240
        Width     = 1575
    End
End

```

```

End
End
Begin VB.Frame Frame3
    Caption      = "Manual"
    Enabled      = 0 'False
    Height       = 1815
    Left         = 120
    TabIndex     = 20
    Top          = 2760
    Width        = 4095
Begin VB.PictureBox Picture1
    Appearance    = 0 'Flat
    BackColor     = &H00C0C0C0&
    BorderStyle   = 0 'None
    ForeColor     = &H800000008&
    Height        = 495
    Index         = 1
    Left          = 1560
    ScaleHeight   = 495
    ScaleWidth    = 375
    TabIndex     = 49
    Top           = 1080
    Width         = 375
Begin VB.PictureBox Picture1
    Appearance    = 0 'Flat
    BackColor     = &H00C0C0C0&
    BorderStyle   = 0 'None
    ForeColor     = &H800000008&
    Height        = 495
    Index         = 4
    Left          = 0
    Picture       = "Form1.frx":0000
    ScaleHeight   = 495
    ScaleWidth    = 375
    TabIndex     = 50
    Top           = 0
    Width         = 375
End
End
Begin VB.PictureBox Picture1
    Appearance    = 0 'Flat
    BackColor     = &H00C0C0C0&
    BorderStyle   = 0 'None
    ForeColor     = &H800000008&
    Height        = 495

```

```

Index      = 0
Left       = 600
Picture    = "Form1.frx":030A
ScaleHeight = 495
ScaleWidth  = 375
TabIndex   = 32
Top        = 1080
Width      = 375
End
Begin VB.PictureBox Picture1
    Appearance = 0 'Flat
    BackColor  = &H00C0C0C0&
    BorderStyle = 0 'None
    ForeColor  = &H800000008&
    Height     = 495
    Index      = 2
    Left       = 2520
    ScaleHeight = 495
    ScaleWidth  = 375
   TabIndex    = 31
    Top        = 1080
    Width      = 375
Begin VB.PictureBox Picture1
    Appearance = 0 'Flat
    BackColor  = &H00C0C0C0&
    BorderStyle = 0 'None
    ForeColor  = &H800000008&
    Height     = 495
    Index      = 5
    Left       = 0
    Picture    = "Form1.frx":0614
    ScaleHeight = 495
    ScaleWidth  = 375
   TabIndex    = 47
    Top        = 0
    Width      = 375
End
End
Begin VB.PictureBox Picture1
    Appearance = 0 'Flat
    BackColor  = &H00C0C0C0&
    BorderStyle = 0 'None
    ForeColor  = &H800000008&
    Height     = 495
    Index      = 3

```

```

Left      = 3480
ScaleHeight = 495
ScaleWidth  = 375
TabIndex   = 30
Top        = 1080
Width      = 375
Begin VB.PictureBox Picture1
    Appearance = 0 'Flat
    BackColor  = &H00C0C0C0&
    BorderStyle = 0 'None
    ForeColor  = &H800000008&
    Height     = 495
    Index      = 6
    Left       = 0
    Picture    = "Form1.frx":091E
    ScaleHeight = 495
    ScaleWidth  = 375
   TabIndex    = 48
    Top        = 0
    Width      = 375
End
End
Begin VB.TextBox tPos
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 285
    Left       = 840
    TabIndex   = 27
    Text       = "0"
    Top        = 360
    Width      = 615
End
Begin VB.TextBox tVel
    Height     = 285
    Left       = 2760
    TabIndex   = 26
    Text       = "1500"
    Top        = 360
    Width      = 615
End
Begin VB.Frame Frame1
    Caption    = "Motores"
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 975
    Left       = 120
    TabIndex   = 21

```

```

Top      = 720
Width    = 3855
Begin VB.CheckBox Check1
    Caption    = "1"
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 255
    Left       = 120
    TabIndex   = 25
    Top        = 360
    Value      = 1 'Checked
    Width      = 375
End
Begin VB.CheckBox Check2
    Caption    = "2"
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 255
    Left       = 1080
    TabIndex   = 24
    Top        = 360
    Value      = 1 'Checked
    Width      = 375
End
Begin VB.CheckBox Check3
    Caption    = "3"
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 255
    Left       = 2040
    TabIndex   = 23
    Top        = 360
    Value      = 1 'Checked
    Width      = 375
End
Begin VB.CheckBox Check4
    Caption    = "4"
    Enabled    = 0 'False
    Height     = 255
    Left       = 3000
    TabIndex   = 22
    Top        = 360
    Value      = 1 'Checked
    Width      = 375
End
End
End

```

```

Begin VB.Label Label1
    Caption      = "Posição (mm/10)"
    Enabled      = 0 'False
    Height       = 495
    Index        = 0
    Left         = 120
    TabIndex     = 29
    Top          = 240
    Width        = 615
End
Begin VB.Label Label2
    AutoSize     = -1 'True
    Caption      = "Velocidade"
    Enabled      = 0 'False
    Height       = 195
    Left         = 1800
    TabIndex     = 28
    Top          = 360
    Width        = 795
End
End
Begin VB.CommandButton Command4
    Caption      = "Inicializa"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
        Name      = "MS Sans Serif"
        Size       = 8.25
        Charset    = 0
        Weight     = 700
        Underline  = 0 'False
        Italic     = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    Height       = 375
    Left         = 2160
    TabIndex     = 19
    Top          = 360
    Width        = 2055
End
Begin VB.Frame Frame2
    Caption      = "Status ONLINE"
    Height       = 1575
    Left         = 120
    TabIndex     = 4
    Top          = 360
    Width        = 1935

```

```

Begin VB.Label Label16
    AutoSize    = -1 'True
    Caption     = "4"
    Height      = 195
    Left        = 240
    TabIndex    = 18
    Top         = 1200
    Width       = 90
End
Begin VB.Label Label15
    AutoSize    = -1 'True
    Caption     = "3"
    Height      = 195
    Index       = 0
    Left        = 240
    TabIndex    = 17
    Top         = 960
    Width       = 90
End
Begin VB.Label Label14
    AutoSize    = -1 'True
    Caption     = "2"
    Height      = 195
    Left        = 240
    TabIndex    = 16
    Top         = 720
    Width       = 90
End
Begin VB.Label Label13
    AutoSize    = -1 'True
    Caption     = "1"
    Height      = 195
    Left        = 240
    TabIndex    = 15
    Top         = 480
    Width       = 90
End
Begin VB.Label StaVel4
    AutoSize    = -1 'True
    Caption     = "1500"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
        Name      = "MS Sans Serif"
        Size      = 12
        Charset    = 0
        Weight    = 700
    EndProperty

```

```

    Underline    = 0 'False
    Italic       = 0 'False
    Strikethrough = 0 'False
EndProperty
ForeColor      = &H00FF0000&
Height         = 300
Left           = 2160
TabIndex       = 14
Top            = 1320
Width          = 615
End
Begin VB.Label StaPos4
    Caption      = "0"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
        Name      = "MS Sans Serif"
        Size       = 12
        Charset    = 0
        Weight     = 700
        Underline  = 0 'False
        Italic     = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor    = &H00FF0000&
    Height       = 300
    Left         = 600
    TabIndex     = 13
    Top          = 1200
    Width        = 1245
End
Begin VB.Label StaVel3
    AutoSize     = -1 'True
    Caption      = "1500"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
        Name      = "MS Sans Serif"
        Size       = 12
        Charset    = 0
        Weight     = 700
        Underline  = 0 'False
        Italic     = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor    = &H00FF0000&
    Height       = 300
    Left         = 2160
    TabIndex     = 12

```

```

Top      = 1080
Width    = 615
End
Begin VB.Label StaPos3
Caption   = "0"
BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
Name      = "MS Sans Serif"
Size      = 12
Charset   = 0
Weight    = 700
Underline = 0 'False
Italic    = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
ForeColor = &H00FF0000&
Height    = 300
Left      = 600
TabIndex  = 11
Top       = 960
Width     = 1245
End
Begin VB.Label StaVel2
AutoSize  = -1 'True
Caption   = "1500"
BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
Name      = "MS Sans Serif"
Size      = 12
Charset   = 0
Weight    = 700
Underline = 0 'False
Italic    = 0 'False
Strikethrough = 0 'False
EndProperty
ForeColor = &H00FF0000&
Height    = 300
Left      = 2160
TabIndex  = 10
Top       = 840
Width     = 615
End
Begin VB.Label StaPos2
Caption   = "0"
BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
Name      = "MS Sans Serif"
Size      = 12

```

```

    Charset      = 0
    Weight       = 700
    Underline    = 0 'False
    Italic       = 0 'False
    Strikethrough = 0 'False
EndProperty
ForeColor      = &H00FF0000&
Height         = 300
Left           = 600
TabIndex       = 9
Top            = 720
Width          = 1245
End
Begin VB.Label StaVel1
    AutoSize     = -1 'True
    Caption      = "1500"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
        Name      = "MS Sans Serif"
        Size       = 12
        Charset    = 0
        Weight     = 700
        Underline  = 0 'False
        Italic     = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor    = &H00FF0000&
    Height       = 300
    Left         = 2160
    TabIndex     = 8
    Top          = 600
    Width        = 615
End
Begin VB.Label StaPos1
    Caption      = "0"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
        Name      = "MS Sans Serif"
        Size       = 12
        Charset    = 0
        Weight     = 700
        Underline  = 0 'False
        Italic     = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    ForeColor    = &H00FF0000&
    Height       = 300

```

```

Left      = 600
TabIndex  = 7
Top       = 480
Width     = 1245
End
Begin VB.Label Label4
    AutoSize    = -1 'True
    Caption     = "Velocidade:"
    Height      = 195
    Left        = 2040
    TabIndex    = 6
    Top         = 360
    Width       = 840
End
Begin VB.Label Label3
    AutoSize    = -1 'True
    Caption     = "Posição (mm/10)"
    Height      = 195
    Left        = 240
    TabIndex    = 5
    Top         = 240
    Width       = 1200
End
End
Begin VB.CommandButton Command3
    Caption     = "Sair"
    Height      = 495
    Left        = 2880
    TabIndex    = 3
    Top         = 6960
    Width       = 1335
End
Begin VB.CommandButton Command2
    Caption     = "Para"
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
        Name      = "MS Sans Serif"
        Size      = 8.25
        Charset    = 0
        Weight    = 700
        Underline  = 0 'False
        Italic     = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    Height      = 495
    Left        = 1440

```

```

    TabIndex    = 2
    Top         = 6960
    Width       = 1335
End
Begin VB.Timer TimerInterbus
    Interval     = 1
    Left         = 0
    Top          = 1920
End
Begin VB.CommandButton Command1
    Caption      = "Gira"
    Default      = -1 'True
    Enabled      = 0 'False
    BeginProperty Font {0BE35203-8F91-11CE-9DE3-00AA004BB851}
        Name      = "MS Sans Serif"
        Size      = 8.25
        Charset   = 0
        Weight    = 700
        Underline  = 0 'False
        Italic     = 0 'False
        Strikethrough = 0 'False
    EndProperty
    Height       = 495
    Left         = 120
    TabIndex     = 0
    Top          = 6960
    Width        = 1215
End
Begin VB.Label display
    Alignment     = 2 'Center
    BackColor     = &H0080FF80&
    Caption       = "Display Status"
    ForeColor     = &H00800080&
    Height        = 255
    Left          = 0
    TabIndex      = 1
    Top           = 0
    Width         = 4455
End
End
Attribute VB_Name = "Form1"
Attribute VB_Creatable = False
Attribute VB_Exposed = False

```

Private Sub Frame7\_DragDrop(Source As Control, X As Single, Y As Single)

End Sub

Private Sub Plataforma(py As Double, pz As Double, py ponto As Double, pz ponto As Double)

|             |            |                                       |
|-------------|------------|---------------------------------------|
| Dim h1      | As Double  | 'posição dos fusos                    |
| Dim h2      | As Double  |                                       |
| Dim h3      | As Double  |                                       |
| Dim h4      | As Double  |                                       |
| Dim h1ponto | As Double  | 'velocidade dos fusos                 |
| Dim h2ponto | As Double  |                                       |
| Dim h3ponto | As Double  |                                       |
| Dim h4ponto | As Double  |                                       |
| Dim L1      | As Double  | 'tamanho das astes                    |
| Dim L2      | As Double  |                                       |
| Dim L3      | As Double  |                                       |
| Dim L4      | As Double  |                                       |
| Dim DP1y    | As Double  | 'posição y das articulações           |
| Dim DP2y    | As Double  |                                       |
| Dim DP3y    | As Double  |                                       |
| Dim DP4y    | As Double  |                                       |
| Dim DP1z    | As Double  | 'posição z das articulações           |
| Dim DP2z    | As Double  |                                       |
| Dim DP3z    | As Double  |                                       |
| Dim DP4z    | As Double  |                                       |
| Dim An1y    | As Double  | 'distancia das bases                  |
| Dim An2y    | As Double  |                                       |
| Dim An3y    | As Double  |                                       |
| Dim An4y    | As Double  |                                       |
| Dim delta1  | As Double  | 'variavel aux. calculo de hi e hponto |
| Dim delta2  | As Double  |                                       |
| Dim delta3  | As Double  |                                       |
| Dim delta4  | As Double  |                                       |
| Dim dis     | As Integer | 'valor da precisao                    |

L1 = 527

L2 = 468

L3 = 468

L4 = 468

DP1y = -135

DP1z = -15

DP2y = -85

DP2z = -18

DP3y = 145

DP3z = -10

DP4y = 145

DP4z = -10

An1y = 103

An2y = 531

An3y = 796.5

An4y = 796.5

theta = 0

dis = 10

'eixo 1

delta1 = Cos(theta) \* DP1y - Sin(theta) \* DP1z + py - An1y

h1 = CInt(dis \* ((Sin(theta) \* DP1y + Cos(theta) \* DP1z + pz) - Sqr(L1 ^ 2 - delta1 ^ 2)))

h1ponto = pzponto + (delta1 \* py ponto) / Sqr(L1 ^ 2 - delta1 ^ 2)

'eixo2

delta2 = Cos(theta) \* DP2y - Sin(theta) \* DP2z + py - An2y

h2 = CInt(dis \* ((Sin(theta) \* DP2y + Cos(theta) \* DP2z + pz) - Sqr(L2 ^ 2 - delta2 ^ 2)))

h2ponto = pzponto + (delta2 \* py ponto) / Sqr(L2 ^ 2 - delta2 ^ 2)

'eixo3

delta3 = Cos(theta) \* DP3y - Sin(theta) \* DP3z + py - An3y

h3 = CInt(dis \* ((Sin(theta) \* DP3y + Cos(theta) \* DP3z + pz) - Sqr(L3 ^ 2 - delta3 ^ 2)))

h3ponto = pzponto + (delta3 \* py ponto) / Sqr(L3 ^ 2 - delta3 ^ 2)

'eixo4

delta4 = Cos(theta) \* DP4y - Sin(theta) \* DP4z + py - An4y

h4 = CInt(dis \* ((Sin(theta) \* DP4y + Cos(theta) \* DP4z + pz) - Sqr(L4 ^ 2 - delta4 ^ 2)))

$h4ponto = pzponto + (\text{delta}4 * py\text{ponto}) / \text{Sqr}(L4^2 - \text{delta}4^2)$

'movimentando

PLAT\_1\_VEL = CInt(30.7 \* Abs(h1ponto))

PLAT\_1\_POS = -357 \* dis + h1

PLAT\_2\_VEL = CInt(30.7 \* Abs(h2ponto))

PLAT\_2\_POS = -355 \* dis + h2

PLAT\_3\_VEL = CInt(30.7 \* Abs(h3ponto))

PLAT\_3\_POS = -368 \* dis + h3

PLAT\_4\_VEL = CInt(30.7 \* Abs(h4ponto))

PLAT\_4\_POS = -368 \* dis + h4

'fechando a malha

While ((CInt(Pos1) <> (-357 \* dis + h1)) Or (CInt(Pos2) <> (-355 \* dis + h2)) Or  
(CInt(Pos3) <> (-368 \* dis + h3)) Or (CInt(Pos4) <> (-368 \* dis + h4)))

    If (PLAT\_1\_POS\_STA < 0) Then

        Pos1 = (2 \* 32768 + CInt(PLAT\_1\_POS\_STA)) / 20.48

    Else

        Pos1 = CInt(PLAT\_1\_POS\_STA) / 20.48

    End If

    If (PLAT\_2\_POS\_STA < 0) Then

        Pos2 = (2 \* 32768 + CInt(PLAT\_2\_POS\_STA)) / 20.48

    Else

        Pos2 = CInt(PLAT\_2\_POS\_STA) / 20.48

    End If

    If (PLAT\_3\_POS\_STA < 0) Then

        Pos3 = (2 \* 32768 + CInt(PLAT\_3\_POS\_STA)) / 20.48

    Else

        Pos3 = CInt(PLAT\_3\_POS\_STA) / 20.48

    End If

    If (PLAT\_4\_POS\_STA < 0) Then

        Pos4 = (2 \* 32768 + CInt(PLAT\_4\_POS\_STA)) / 20.48

    Else

        Pos4 = CInt(PLAT\_4\_POS\_STA) / 20.48

    End If

    IBS\_HLI\_Process\_SC1

Wend

End Sub

```
Private Sub Command1_Click()
```

```

    Dim Inicio      As Double    'octante inicial
    Dim Fim         As Double    'octante final

    Dim r           As Double    'raio da circunferencia
    Dim a           As Double    'variavel aux. calculo ponto da circunferencia
    Dim c           As Double

    Dim k           As Double    'posição Z centro da circunferencia
    Dim h           As Double    'posição Y centro da circunferencia

    Dim incr        As Double    'contadores
    Dim b           As Integer

    Dim Y           As Double    'posição Y
    Dim Z           As Double    'posição Z
    Dim Yponto      As Double    'Veloc. Y
    Dim Zponto      As Double    'Veloc. Z

```

```

If (Option1.Value = True) Then
'Movimentação manual ponto a ponto

```

```

    If (StaPos1.Caption > tPos.Text) Then
        b = -1                'sentido de avanço
    Else
        b = 1
    End If

```

```
For incr = StaPos1.Caption To tPos.Text Step b
```

```

    If Check1.Value = 1 Then
        PLAT_1_VEL = tVel.Text
        PLAT_1_POS = incr
        DoEvents
    End If

```

```

    If Check2.Value = 1 Then
        PLAT_2_VEL = tVel.Text
        PLAT_2_POS = incr
        DoEvents
    End If

```

```

    If Check3.Value = 1 Then
        PLAT_3_VEL = tVel.Text

```

```

    PLAT_3_POS = incr
    DoEvents
End If

If Check4.Value = 1 Then
    PLAT_4_VEL = tVel.Text
    PLAT_4_POS = incr
    DoEvents
End If

Next
End If

If (Option2.Value = True) Then
'Trajetória linear com inclinação 0 graus da plataforma

    Yponto = VelLinear.Text
    Zponto = VelLinear.Text

    Y1 = PAtualY.Caption
    Z1 = PAtualZ.Caption - 490

    Y2 = FinalY(0).Text
    Z2 = FinalZ(1).Text - 490

    Z = Z1
    Y = Y1

    passo = 1 / 8

    If (Y2 - Y1) = 0 Then
        If Z1 < Z2 Then
            f = passo
        Else
            f = -passo
        End If

        For j = Z1 To Z2 Step f

            PAtualY.Caption = Y
            PAtualZ.Caption = Z + 490

            Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

            Z = Z + f

```

```

Next

ElseIf (Z2 - Z1) = 0 Then

    If Y1 < Y2 Then
        f = passo
    Else
        f = -passo
    End If

    For j = Y1 To Y2 Step f

        PAtualY.Caption = Y
        PAtualZ.Caption = Z + 490

        Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

        Y = Y + f
    Next

Else
    dY = Abs(Y2 - Y1)
    dZ = Abs(Z2 - Z1)
    m = (Z2 - Z1) / (Y2 - Y1)

    If dY > dZ Then
        If Y1 < Y2 Then
            f = passo
        Else
            f = -passo
        End If

        For j = Y1 To Y2 Step f

            PAtualY.Caption = Y
            PAtualZ.Caption = Z + 490

            Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

            Y = Y + f
            Z = Z + m * (Y - Y1)
            Y1 = Y
        Next
    Else

```

```

    If Z1 < Z2 Then
        f = passo
    Else
        f = -passo
    End If

    For j = Z1 To Z2 Step f

        PAtualY.Caption = Y
        PAtualZ.Caption = Z + 490

        Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

        Z = Z + f
        Y = Y + (Z - Z1) / m
        Z1 = Z
    Next
End If

End If
End If

If (Option3.Value = True) Then
'Movimentação circular: Cinematica Inversa

    Yponto = TVeloc.Text
    Zponto = TVeloc.Text

    Inicio = TextInicial.Text
    Fim = TextFinal.Text

    r = TxRaio.Text

    Yatual = PAtualY.Caption
    Zatual = PAtualZ.Caption - 490

    Partes = 45                'discretização de um grau

    If Inicio = Fim Then        'define sentido de rotação para um octante
        Horario = MsgBox("SE A TRAJETORIA FOR NO SENTIDO HORARIO TECLE
'Sim', CASO CONTRARIO TECLE 'Não'", 32 + 4, "VERIFIQUE !!!")
        If Horario = 6 Then
            f = 1
        Else
            f = -1
        End If
    End If

```

```

ElseIf Inicio < Fim Then
    f = 1
Else
    f = -1
End If

If f = -1 Then                                'define centro de curvatura
    If Inicio = 8 Then
        h = Yatual
        k = Zatual - r
    ElseIf Inicio = 7 Then
        h = Yatual + r * Sin(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual - r * Cos(3.14159265358979 / 4)
    ElseIf Inicio = 6 Then
        h = Yatual + r
        k = Zatual
    ElseIf Inicio = 5 Then
        h = Yatual + r * Sin(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual + r * Cos(3.14159265358979 / 4)
    ElseIf Inicio = 4 Then
        h = Yatual
        k = Zatual + r
    ElseIf Inicio = 3 Then
        h = Yatual - r * Sin(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual + r * Cos(3.14159265358979 / 4)
    ElseIf Inicio = 2 Then
        h = Yatual - r
        k = Zatual
    ElseIf Inicio = 1 Then
        h = Yatual - r * Sin(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual - r * Cos(3.14159265358979 / 4)
    End If
Else
    If Inicio = 1 Then
        h = Yatual
        k = Zatual - r
    ElseIf Inicio = 2 Then
        h = Yatual - r * Sin(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual - r * Cos(3.14159265358979 / 4)
    ElseIf Inicio = 3 Then
        h = Yatual - r
        k = Zatual
    ElseIf Inicio = 4 Then
        h = Yatual - r * Cos(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual + r * Sin(3.14159265358979 / 4)

```

```

ElseIf Inicio = 5 Then
    h = Yatual
    k = Zatual + r
ElseIf Inicio = 6 Then
    h = Yatual + r * Cos(3.14159265358979 / 4)
    k = Zatual + r * Sin(3.14159265358979 / 4)
ElseIf Inicio = 7 Then
    h = Yatual + r
    k = Zatual
ElseIf Inicio = 8 Then
    h = Yatual + r * Cos(3.14159265358979 / 4)
    k = Zatual - r * Sin(3.14159265358979 / 4)
End If
End If

For j = Inicio To Fim Step f
    If j = 1 Or j = 3 Or j = 5 Or j = 7 Then 'define a simetria
        If f = 1 Then
            Com = 0
            Ter = Partes
            Ava = 1
            a = 0
            c = r
        Else
            Com = Partes
            Ter = 0
            Ava = -1
            a = r / Sqr(2)
            c = a
        End If
    Else
        If f = 1 Then
            Com = Partes
            Ter = 0
            Ava = -1
            a = r / Sqr(2)
            c = a
        Else
            Com = 0
            Ter = Partes
            Ava = 1
            a = 0
            c = r
        End If
    End If
End If

```

```

For i = Com To Ter Step Ava
  If j = 1 Then
    Y = a + h
    Z = c + k
  ElseIf j = 2 Then
    Y = c + h
    Z = a + k
  ElseIf j = 3 Then
    Y = c + h
    Z = -a + k
  ElseIf j = 4 Then
    Y = a + h
    Z = -c + k
  ElseIf j = 5 Then
    Y = -a + h
    Z = -c + k
  ElseIf j = 6 Then
    Y = -c + h
    Z = -a + k
  ElseIf j = 7 Then
    Y = -c + h
    Z = a + k
  ElseIf j = 8 Then
    Y = -a + h
    Z = c + k
  End If

  a = a + (Ava * r / Sqr(2) / Partes)
  c = Sqr(r ^ 2 - a ^ 2)

  PAtualY.Caption = Y
  PAtualZ.Caption = Z + 490

  FinalY(0).Text = Y
  FinalZ(1).Text = Z + 490

  Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

Next
Next
End If
End Sub

```

```

Private Sub Command2_Click()
    PLAT_1_CONTROL = &H1 'Finaliza Motor 1
    PLAT_2_CONTROL = &H1 'Finaliza Motor 1
    PLAT_3_CONTROL = &H1 'Finaliza Motor 1
    PLAT_4_CONTROL = &H1 'Finaliza Motor 1
End Sub

Private Sub Command3_Click()
    IBS_HLI_Exit_SC1
End Sub

Private Sub Command4_Click()

    'Inicializar rede Interbus
    Form1.display.Caption = "Iniciando Rede Interbus"
    IBS_HLI_Init_SC1

    While SC1.BusState <> HLI_IBS_RUN
        IBS_HLI_Init_SC1
    Wend
    Form1.TimerInterbus.Enabled = True
    Form1.display.Caption = "Aguardando Sinal de PRONTO dos MD's"

    While Not (Hex(PLAT_1_STATUS And &H100) = 100)
        IBS_HLI_Process_SC1
    Wend
    While Not (Hex(PLAT_2_STATUS And &H100) = 100)
        IBS_HLI_Process_SC1
    Wend
    While Not (Hex(PLAT_3_STATUS And &H100) = 100)
        IBS_HLI_Process_SC1
    Wend
    While Not (Hex(PLAT_4_STATUS And &H100) = 100)
        IBS_HLI_Process_SC1
    Wend

    Form1.display.Caption = "Enviando Sinal de PC PRONTO"
    PLAT_1_CONTROL = PLAT_1_CONTROL Or &H100
    PLAT_2_CONTROL = PLAT_2_CONTROL Or &H100
    PLAT_3_CONTROL = PLAT_3_CONTROL Or &H100
    PLAT_4_CONTROL = PLAT_4_CONTROL Or &H100
    IBS_HLI_Process_SC1

```

```

'Referenciando Motores
Form1.display.Caption = "Referenciando Motores"
PLAT_1_CONTROL = &H106 'Inicializa Motor 1
PLAT_2_CONTROL = &H106 'Inicializa Motor 1
PLAT_3_CONTROL = &H106 'Inicializa Motor 1
PLAT_4_CONTROL = &H106 'Inicializa Motor 1

While Not ((PLAT_1_STATUS And &H200) = &H200)
  IBS_HLI_Process_SC1
Wend
While Not ((PLAT_2_STATUS And &H200) = &H200)
  IBS_HLI_Process_SC1
Wend
While Not ((PLAT_3_STATUS And &H200) = &H200)
  IBS_HLI_Process_SC1
Wend
While Not ((PLAT_4_STATUS And &H200) = &H200)
  IBS_HLI_Process_SC1
Wend

'Passa_Modo_Operacao_MoviDrive
Form1.display.Caption = "Status MoviDrives OK"
PLAT_1_CONTROL = PLAT_1_CONTROL Or &H200
PLAT_1_CONTROL = PLAT_1_CONTROL And &HFDFF
PLAT_2_CONTROL = PLAT_2_CONTROL Or &H200
PLAT_2_CONTROL = PLAT_2_CONTROL And &HFDFF
PLAT_3_CONTROL = PLAT_3_CONTROL Or &H200
PLAT_3_CONTROL = PLAT_3_CONTROL And &HFDFF
PLAT_4_CONTROL = PLAT_4_CONTROL Or &H200
PLAT_4_CONTROL = PLAT_4_CONTROL And &HFDFF

PLAT_1_VEL = 1000
PLAT_1_POS = 0
PLAT_2_VEL = 1000
PLAT_2_POS = 0
PLAT_3_VEL = 1000
PLAT_3_POS = 0
PLAT_4_VEL = 1000
PLAT_4_POS = 0

PAtualY.Caption = 500
PAtualZ.Caption = 830 + 490
FinalY(0).Text = PAtualY.Caption
FinalZ(1).Text = PAtualZ.Caption

```

```

    Command1.Enabled = True

End Sub

Private Sub Option1_Click()
'modo interpolação linear desabilitado
Frame5.Enabled = False
Label5.Enabled = False
Label6.Enabled = False
FinalY(0).Enabled = False
FinalZ(1).Enabled = False
VelLinear.Enabled = False
Label12.Enabled = False

'modo interpolação circular desabilitado
Frame6.Enabled = False
Label8.Enabled = False
Label9.Enabled = False
TxRaio.Enabled = False
TVeloc.Enabled = False
Label7.Enabled = False
Label10.Enabled = False
Label11.Enabled = False
TextInicial.Enabled = False
TextFinal.Enabled = False

'modo manual habilitado
Frame3.Enabled = True
Label1(0).Enabled = True
Label2.Enabled = True
tPos.Enabled = True
tVel.Enabled = True
Frame1.Enabled = True
Check1.Enabled = True
Check2.Enabled = True
Check3.Enabled = True
Check4.Enabled = True

End Sub

Private Sub Option2_Click()
'modo manual desabilitado
Frame3.Enabled = False
Label1(0).Enabled = False

```

```
Label2.Enabled = False
tPos.Enabled = False
tVel.Enabled = False
Frame1.Enabled = False
Check1.Enabled = False
Check2.Enabled = False
Check3.Enabled = False
Check4.Enabled = False
```

```
'modo interpolação circular desabilitado
```

```
Frame6.Enabled = False
Label8.Enabled = False
Label9.Enabled = False
TxRaio.Enabled = False
TVeloc.Enabled = False
Label7.Enabled = False
Label10.Enabled = False
Label11.Enabled = False
TextInicial.Enabled = False
TextFinal.Enabled = False
```

```
'modo interpolação linear habilitada
```

```
Frame5.Enabled = True
Label5.Enabled = True
Label6.Enabled = True
Label12.Enabled = True
FinalY(0).Enabled = True
FinalZ(1).Enabled = True
VelLinear.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Option3_Click()
```

```
'modo manual desabilitado
```

```
Frame3.Enabled = False
Label1(0).Enabled = False
Label2.Enabled = False
tPos.Enabled = False
tVel.Enabled = False
Frame1.Enabled = False
Check1.Enabled = False
Check2.Enabled = False
Check3.Enabled = False
```

Check4.Enabled = False

'modo interpolação linear desabilitado

Frame5.Enabled = False

Label5.Enabled = False

Label6.Enabled = False

FinalY(0).Enabled = False

FinalZ(1).Enabled = False

VelLinear.Enabled = False

Label12.Enabled = False

'modo interpolação circular habilitado

Frame6.Enabled = True

Label8.Enabled = True

Label9.Enabled = True

TxRaio.Enabled = True

TVeloc.Enabled = True

Label7.Enabled = True

Label10.Enabled = True

Label11.Enabled = True

TextInicial.Enabled = True

TextFinal.Enabled = True

End Sub

Private Sub Text2\_Change()

End Sub

Private Sub Text1\_Change(Index As Integer)

End Sub

Private Sub TimerInterbus\_Timer()

IBS\_HLI\_Process\_SC1

If (PLAT\_1\_POS\_STA < 0) Then

StaPos1.Caption = (2 \* 32768 + CInt(PLAT\_1\_POS\_STA)) / 20.48

Else

StaPos1.Caption = CInt(PLAT\_1\_POS\_STA) / 20.48

End If

If (PLAT\_2\_POS\_STA < 0) Then

StaPos2.Caption = (2 \* 32768 + CInt(PLAT\_2\_POS\_STA)) / 20.48

Else

StaPos2.Caption = CInt(PLAT\_2\_POS\_STA) / 20.48

```
End If
If (PLAT_3_POS_STA < 0) Then
  StaPos3.Caption = (2 * 32768 + CInt(PLAT_3_POS_STA)) / 20.48
Else
  StaPos3.Caption = CInt(PLAT_3_POS_STA) / 20.48
End If
If (PLAT_4_POS_STA < 0) Then
  StaPos4.Caption = (2 * 32768 + CInt(PLAT_4_POS_STA)) / 20.48
Else
  StaPos4.Caption = CInt(PLAT_4_POS_STA) / 20.48
End If

StaVel1.Caption = PLAT_1_VEL_STA
StaVel2.Caption = PLAT_2_VEL_STA
StaVel3.Caption = PLAT_3_VEL_STA
StaVel4.Caption = PLAT_4_VEL_STA

End Sub
```

## **ANEXO B - Códigos Fonte do Simulador Linear e Circular**

Sub Plataforma(py As Double, pz As Double, py ponto As Double, pz ponto As Double)

|             |            |                                       |
|-------------|------------|---------------------------------------|
| Dim h1      | As Double  | 'posição dos fusos                    |
| Dim h2      | As Double  |                                       |
| Dim h3      | As Double  |                                       |
| Dim h4      | As Double  |                                       |
| Dim h1ponto | As Double  | 'velocidade dos fusos                 |
| Dim h2ponto | As Double  |                                       |
| Dim h3ponto | As Double  |                                       |
| Dim h4ponto | As Double  |                                       |
| Dim L1      | As Double  | 'tamanho das astes                    |
| Dim L2      | As Double  |                                       |
| Dim L3      | As Double  |                                       |
| Dim L4      | As Double  |                                       |
| Dim DP1y    | As Double  | 'posição y das articulações           |
| Dim DP2y    | As Double  |                                       |
| Dim DP3y    | As Double  |                                       |
| Dim DP4y    | As Double  |                                       |
| Dim DP1z    | As Double  | 'posição z das articulações           |
| Dim DP2z    | As Double  |                                       |
| Dim DP3z    | As Double  |                                       |
| Dim DP4z    | As Double  |                                       |
| Dim An1y    | As Double  | 'distancia das bases                  |
| Dim An2y    | As Double  |                                       |
| Dim An3y    | As Double  |                                       |
| Dim An4y    | As Double  |                                       |
| Dim delta1  | As Double  | 'variavel aux. calculo de hi e hponto |
| Dim delta2  | As Double  |                                       |
| Dim delta3  | As Double  |                                       |
| Dim delta4  | As Double  |                                       |
| Dim dis     | As Integer | 'valor da precisao                    |
| L1 = 527    |            |                                       |
| L2 = 468    |            |                                       |
| L3 = 468    |            |                                       |
| L4 = 468    |            |                                       |

```

DP1y = -135
DP1z = -15
DP2y = -85
DP2z = -18
DP3y = 145
DP3z = -10
DP4y = 145
DP4z = -10

An1y = 103
An2y = 531
An3y = 796.5
An4y = 796.5

theta = 0

dis = 10

'eixo 1
delta1 = Cos(theta) * DP1y - Sin(theta) * DP1z + py - An1y
h1 = CInt(dis * ((Sin(theta) * DP1y + Cos(theta) * DP1z + pz) - Sqr(L1 ^ 2 - delta1 ^
2))))
h1ponto = pzponto + (delta1 * py ponto) / Sqr(L1 ^ 2 - delta1 ^ 2)

'eixo2
delta2 = Cos(theta) * DP2y - Sin(theta) * DP2z + py - An2y
h2 = CInt(dis * ((Sin(theta) * DP2y + Cos(theta) * DP2z + pz) - Sqr(L2 ^ 2 - delta2 ^
2))))
h2ponto = pzponto + (delta2 * py ponto) / Sqr(L2 ^ 2 - delta2 ^ 2)

'eixo3
delta3 = Cos(theta) * DP3y - Sin(theta) * DP3z + py - An3y
h3 = CInt(dis * ((Sin(theta) * DP3y + Cos(theta) * DP3z + pz) - Sqr(L3 ^ 2 - delta3 ^
2))))
h3ponto = pzponto + (delta3 * py ponto) / Sqr(L3 ^ 2 - delta3 ^ 2)

'eixo4
delta4 = Cos(theta) * DP4y - Sin(theta) * DP4z + py - An4y
h4 = CInt(dis * ((Sin(theta) * DP4y + Cos(theta) * DP4z + pz) - Sqr(L4 ^ 2 - delta4 ^
2))))
h4ponto = pzponto + (delta4 * py ponto) / Sqr(L4 ^ 2 - delta4 ^ 2)

Cells(Range("K2"), 1) = py
Cells(Range("K2"), 2) = pz + 490

```

```

Range("K3") = py
Range("K4") = pz + 490
Cells(Range("K2"), 3) = h1 - 357 * dis
Cells(Range("K2"), 4) = h2 - 355 * dis
Cells(Range("K2"), 5) = h3 - 368 * dis
Cells(Range("K2"), 6) = h4 - 368 * dis
Cells(Range("K2"), 7) = h1ponto
Cells(Range("K2"), 8) = h2ponto
Cells(Range("K2"), 9) = h3ponto
Cells(Range("K2"), 10) = h4ponto
Range("K2") = Range("K2") + 1

```

End Sub

Sub VoltarUltimoComando()

```

Range("A" & Range("L2") & ":J" & Range("K2")).Select
Selection.ClearContents
Range("A7").Select

Range("K2") = Range("L2")
Range("K3") = Range("L3")
Range("K4") = Range("L4")
Range("K5") = Range("L5")
Range("K6") = Range("L6")

```

End Sub

Sub Inicialização()

```

Range("A7:J" & Range("K2")).Select
Selection.ClearContents
Range("A7").Select

Range("K2") = 7
Range("K3") = 500
Range("K4") = 830
Range("K5") = 0
Range("K6") = 0
Range("A3") = 0
Range("I5") = Range("K3")
Range("J5") = Range("K4") + 490

Range("L2") = Range("K2")
Range("L3") = Range("K3")

```

```

Range("L4") = Range("K4")
Range("L5") = Range("K5")
Range("L6") = Range("K6")

Call Plataforma(Range("K3"), Range("K4"), 500, 500)

End Sub
Sub PosicionamentoRapido()

Range("K3") = Range("I5")
Range("K4") = Range("J5")

Range("L2") = Range("K2")
Range("L3") = Range("K3")
Range("L4") = Range("K4")
Range("L5") = Range("K5")
Range("L6") = Range("K6")

Call Plataforma(Range("I5"), Range("J5") - 490, 500, 500)

End Sub

Sub Linear()

Dim Y           As Double   'posicao Y
Dim Z           As Double   'posicao Z
Dim Yponto      As Double   'Veloc. Y
Dim Zponto      As Double   'Veloc. Z

Yponto = Range("B5")
Zponto = Range("B5")

Y1 = Range("G5")
Z1 = Range("H5") - 490

Y2 = Range("I5")
Z2 = Range("J5") - 490

Range("L2") = Range("K2")
Range("L3") = Range("K3")
Range("L4") = Range("K4")
Range("L5") = Range("K5")
Range("L6") = Range("K6")

```

```

Z = Z1
Y = Y1

passo = 1 / 8

If (Y2 - Y1) = 0 Then
  If Z1 < Z2 Then
    f = passo
  Else
    f = -passo
  End If

  For j = Z1 To Z2 Step f

    Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

    Z = Z + f
  Next

ElseIf (Z2 - Z1) = 0 Then

  If Y1 < Y2 Then
    f = passo
  Else
    f = -passo
  End If

  For j = Y1 To Y2 Step f

    Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

    Y = Y + f
  Next

Else
  dy = Abs(Y2 - Y1)
  dz = Abs(Z2 - Z1)
  m = (Z2 - Z1) / (Y2 - Y1)

  If dy > dz Then
    If Y1 < Y2 Then
      f = passo
    Else
      f = -passo
    End If
  End If

```

```

For j = Y1 To Y2 Step f

    Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

    Y = Y + f
    Z = Z + m * (Y - Y1)
    Y1 = Y
Next
Else
    If Z1 < Z2 Then
        f = passo
    Else
        f = -passo
    End If

    For j = Z1 To Z2 Step f

        Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

        Z = Z + f
        Y = Y + (Z - Z1) / m
        Z1 = Z
    Next
End If
End Sub
Sub Circular()

    Dim Inicio      As Double    'octante inicial
    Dim Fim         As Double    'octante final

    Dim r           As Double    'raio da circunferencia
    Dim a           As Double    'variavel aux. calculo ponto da circunferencia
    Dim c           As Double

    Dim k           As Double    'posição Z centro da circunferencia
    Dim h           As Double    'posição Y centro da circunferencia

    Dim Y           As Double    'posição Y
    Dim Z           As Double    'posição Z
    Dim Yponto      As Double    'Veloc. Y
    Dim Zponto      As Double    'Veloc. Z

    Yponto = Range("B5")

```

```

Zponto = Range("C5")

Inicio = Range("E3")
Fim = Range("F3")

r = Range("A3")

Yatual = Range("G5")
Zatual = Range("H5") - 490

Range("L2") = Range("K2")
Range("L3") = Range("K3")
Range("L4") = Range("K4")
Range("L5") = Range("K5")
Range("L6") = Range("K6")

Partes = 45

If Inicio = Fim Then                                'define sentido de rotaçao
    Horario = MsgBox("SE A TRAJETORIA FOR NO SENTIDO HORARIO TECLE
'Sim', CASO CONTRARIO TECLE 'Não'", 32 + 4, "VERIFIQUE !!!")
    If Horario = 6 Then
        f = 1
    Else
        f = -1
    End If
ElseIf Inicio < Fim Then
    f = 1
Else
    f = -1
End If

If f = -1 Then                                        'define centro de curvatura
    If Inicio = 8 Then
        h = Yatual
        k = Zatual - r
    ElseIf Inicio = 7 Then
        h = Yatual + r * Sin(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual - r * Cos(3.14159265358979 / 4)
    ElseIf Inicio = 6 Then
        h = Yatual + r
        k = Zatual
    ElseIf Inicio = 5 Then
        h = Yatual + r * Sin(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual + r * Cos(3.14159265358979 / 4)

```

```

ElseIf Inicio = 4 Then
    h = Yatual
    k = Zatual + r
ElseIf Inicio = 3 Then
    h = Yatual - r * Sin(3.14159265358979 / 4)
    k = Zatual + r * Cos(3.14159265358979 / 4)
ElseIf Inicio = 2 Then
    h = Yatual - r
    k = Zatual
ElseIf Inicio = 1 Then
    h = Yatual - r * Sin(3.14159265358979 / 4)
    k = Zatual - r * Cos(3.14159265358979 / 4)
End If
Else
    If Inicio = 1 Then
        h = Yatual
        k = Zatual - r
    ElseIf Inicio = 2 Then
        h = Yatual - r * Sin(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual - r * Cos(3.14159265358979 / 4)
    ElseIf Inicio = 3 Then
        h = Yatual - r
        k = Zatual
    ElseIf Inicio = 4 Then
        h = Yatual - r * Cos(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual + r * Sin(3.14159265358979 / 4)
    ElseIf Inicio = 5 Then
        h = Yatual
        k = Zatual + r
    ElseIf Inicio = 6 Then
        h = Yatual + r * Cos(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual + r * Sin(3.14159265358979 / 4)
    ElseIf Inicio = 7 Then
        h = Yatual + r
        k = Zatual
    ElseIf Inicio = 8 Then
        h = Yatual + r * Cos(3.14159265358979 / 4)
        k = Zatual - r * Sin(3.14159265358979 / 4)
    End If
End If

Range("K5") = h
Range("K6") = k

```

```

For j = Inicio To Fim Step f
  If j = 1 Or j = 3 Or j = 5 Or j = 7 Then 'define a simetria
    If f = 1 Then
      Com = 0
      Ter = Partes
      Ava = 1
      a = 0
      c = r
    Else
      Com = Partes
      Ter = 0
      Ava = -1
      a = r / Sqr(2)
      c = a
    End If
  Else
    If f = 1 Then
      Com = Partes
      Ter = 0
      Ava = -1
      a = r / Sqr(2)
      c = a
    Else
      Com = 0
      Ter = Partes
      Ava = 1
      a = 0
      c = r
    End If
  End If

  For i = Com To Ter Step Ava
    If j = 1 Then
      Y = a + h
      Z = c + k
    ElseIf j = 2 Then
      Y = c + h
      Z = a + k
    ElseIf j = 3 Then
      Y = c + h
      Z = -a + k
    ElseIf j = 4 Then
      Y = a + h
      Z = -c + k
    ElseIf j = 5 Then

```

```

        Y = -a + h
        Z = -c + k
    ElseIf j = 6 Then
        Y = -c + h
        Z = -a + k
    ElseIf j = 7 Then
        Y = -c + h
        Z = a + k
    ElseIf j = 8 Then
        Y = -a + h
        Z = c + k
    End If

    a = a + (Ava * r / Sqr(2) / Partes)
    c = Sqr(r ^ 2 - a ^ 2)

    Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)

Next
Next
End Sub

```

## **ANEXO C – Código da figura 39**

Sub QualquerFunção()

|            |           |            |
|------------|-----------|------------|
| Dim Y      | As Double | 'posição Y |
| Dim Z      | As Double | 'posição Z |
| Dim Yponto | As Double | 'Veloc. Y  |
| Dim Zponto | As Double | 'Veloc. Z  |

```
Y1 = Range("G5")
Z1 = Range("H5") - 490
Y2 = Range("I5")
Z2 = Range("J5") - 490
Yponto = Range("B5")
Zponto = Range("C5")
```

```
Y = Y1
Z = Z2
```

```
Amp = 30
P = 1 / 10
```

```
passo = 2 * 3.14159265358979 / 360
```

```
If Y1 <= Y2 Then
    f = passo * 1 / P
Else
    f = -passo * 1 / P
End If
```

```
For j = Y1 To (Y1 + 2 * 3.14159265358979 * 1 / P) Step f
```

```
    Call Plataforma(Y, Z, Yponto, Zponto)
```

```
    Y = Y + f
```

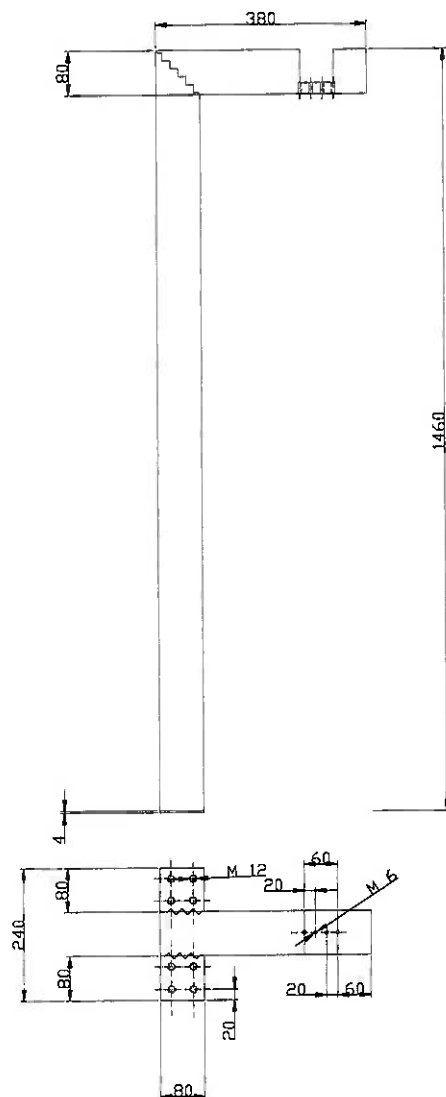
```
    Z = Z2 + Amp * Sin(P * Y)
```

```
    Range("I5") = Y
    Range("J5") = Z + 490
```

```
Next
End Sub
```

## ANEXO D – Suporte de Dremmel para Usinagem - Desenhos

ANEXO 4 - MODELO PROPOSTO PARA USINAGEM



Trabalho de Formatura

Material: Tubo 80 x 80 SAE 1020

Escala: 1:10

Peça: Base para Usinagem

