

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

ROSSANA BARBA JARAMILLO

ESTUDO DA VIABILIDADE DE PROCESSOS DE USINAGEM  
UTILIZANDO UM MANIPULADOR ROBÓTICO

São Carlos

2011

ROSSANA BARBA JARAMILLO

ESTUDO DA VIABILIDADE DE PROCESSOS DE USINAGEM  
UTILIZANDO UM MANIPULADOR ROBÓTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos  
da Universidade de São Paulo  
Curso de Engenharia Mecatrônica.  
Desenvolvido no Laboratório de  
Otimização de Processos de Fabricação,  
da Escola de Engenharia de São Carlos.

Área de concentração: Processos de manufatura  
Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

São Carlos  
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

J37e Jaramillo, Rossana Barba  
Estudo da viabilidade de processos de usinagem utilizando um manipulador robótico / Rossana Barba Jaramillo; orientador Reginaldo Teixeira Coelho. -- São Carlos, 2011.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Usinagem. 2. Manipulador robótico. 3. Protótipos. 4. Espuma de poliuretano. I. Título.

## Folha de Avaliação

**Candidata:** Rossana Verónica Barba Jaramillo

**Título:** Estudo da viabilidade de processos de usinagem utilizando um manipulador robótico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo  
Curso de Engenharia Mecatrônica

### Banca examinadora

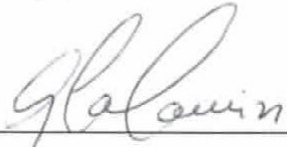
Prof. Dr. Luiz Augusto Martin Gonçalves

Nota atribuída: 10 (DEZ)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luiz Augusto Martin Gonçalves


Prof. Dr. Glauco de Paula Caurin

Nota atribuída: 9 (Nove)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Glauco de Paula Caurin

Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho (orientador)

Nota atribuída: 9,5 (NOVE, CINCO)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

Média: 9,5 (NOVE,5)

Resultado: APROVADA

Data: 25/11/2011

Dedico meu trabalho aos meus pais por  
seu amor, apoio, compreensão e  
respeito; ao meu irmão Carlos Andrés  
por sempre acreditar em mim e por suas  
palavras que sempre me consolam e me  
empurram para nunca desistir e  
finalmente a minha irmã Susana porque  
ela é meu modelo a seguir.

Dedico mi trabajo a mi padres por su  
amor, apoyo, comprensión y respeto; a  
mi ñaño Carlos Andrés por siempre  
creer en mi y por sus palabras certeras  
que me han ayudado a seguir adelante y  
a mi ñaña Susi porque ella es mi modelo  
y mi inspiración.

## **Agradecimentos**

A Deus pela vida, por ter me permitido vivenciar esta experiência e por Sua companhia.

Ao meu orientador Professor Reginaldo por me guiar e orientar durante quase quatro anos.

Ao Rafael Foresto Machado pela ajuda no desenvolvimento do projeto.

Ao Adolfo Ferrarin, técnico do Laboratório OPF, por sua paciência, ajuda e dedicação.

Ao pessoal do Laboratório OPF, por serem meus colegas e amigos, em especial à Vanda, Cláudia, Zé e Olivia, Arai e Ju, André, Aldo, Mary, Rodrigo, Ju e Xela.

Aos meus amigos Célio, Scorsato, Bizerro, Murilo, Hoses, Breno, Mariana, Baiano, Kevin, Roberto, Buneco, Iran, Carimbo, Zé, Sid, Tiazinha, Vikt, Bixão, André M., Rafael G., Timberê, Ricardo, Paulim, Carinhoso e Jair pelas muitas horas fazendo trabalhos e projetos, pelas madrugadas de estudo, baladas, churrascos, viagens, TUSCAs e almoços de domingo.

Aos meus veteranos Markim, Carçaça, Marcel e Grazi, Stevan, Buda, Lâmpada e Ângelo por seus conselhos e carinho.

Ao Bertt, Mariana, André e Ramón por todas as histórias da vida em república.

A minha grande amiga Jeanny por ter me recebido na sua casa, por me escutar e aconselhar, não só hoje mas também cinco anos atrás.

A minha amiga Carolina por estar comigo desde o começo desta grande experiência.

A meus amigos estrangeiros Andrea (paraguaia), Andrea (equatoriana), Tama e Alcina por estar ao meu lado em momentos de saudade.

Ao Joãozinho e ao Wladi do Serviço de Graduação por sua ajuda e paciência nos períodos de matrícula.

À Maíra por fazer possível a minha participação no curso de Programação de Robô da KUKA Roboters Group, por fazer o curso comigo e por todos os conselhos.

À Cris, do Laboratório de Dinâmica, por sua vontade e paciência na hora de ajudar os alunos.

Ao Professor Luiz Augusto, meu tutor, por todos seus conselhos.

A todos os professores da Escola de Engenharia de São Carlos pelo conhecimento passado durante a graduação.

À Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realizar o curso de graduação em Engenharia Mecatrônica.

Ao Instituto Brasileiro-Equatoriano de Cultura, especialmente ao Éverton e Kátia, graças a eles tive a oportunidade de vir estudar no Brasil.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte da minha vida durante a minha graduação.

“La vida no es la que uno vivió, sino la que uno  
recuerda y cómo la recuerda para contarla.”

*Gabriel García Márquez*



## Resumo

Nas últimas três décadas, os robôs industriais, que eram apenas mecanismos repetitivos e pouco flexíveis, se converteram em manipuladores reprogramáveis e multifuncionais. Atualmente, cerca de 95% da aplicação dos robôs industriais se dá nos campos de soldagem, pintura, transporte de materiais entre outros, e apenas 5% nos processos de usinagem, os quais agregam mais valor aos produtos. Realizando a usinagem de três peças de complexidade diferente, em espuma de poliuretano, foi possível concluir que o uso de robôs para prototipagem na indústria é uma opção viável. Este estudo é o primeiro passo para a futura inclusão de robôs industriais nos processos de manufatura, não só de protótipos mais de peças de alta complexidade ou de grandes dimensões.

**Palavras chave:** usinagem, manipulador robótico, protótipos, espuma de poliuretano

## **Abstract**

In the last three decades, industrial robots, which were just repetitive and inflexible mechanisms, have become reprogrammable, multifunctional manipulators. Currently, about 95% of the application of industrial robots is given in the fields of welding, painting, transportation of materials, among others, and only 5% in the machining processes, which add more value to final products. After machining three pieces of different complexity, in polyurethane foam, it was concluded that the use of robots in the prototyping industry is a viable option. This study is the first step to the future inclusion of industrial robots in the manufacturing processes, not only to manufacture prototypes but to create more complex and larger products.

**Keywords:** machining, robotic manipulator, prototypes, polyurethane foam

## Lista de figuras

Figura 1. Fresamento segundo à posição da ferramenta. a) De topo, b) Tangencial (6) .....	21
Figura 2. Fresamento tangencial: a) Concordante, b) Discordante (6) .....	21
Figura 3. Fresamento Concordante/Discordante (6) .....	22
Figura 4. 1) Robô manipulador, 2) Unidade de controle do robô, 3) Unidade manual .....	25
Figura 5. Eixos do KR5 sixx R850 (10) .....	26
Figura 6. Envelope de trabalho do robô. (10) .....	27
Figura 7. Desbaste raster .....	28
Figura 8. Acabamento. a) Espiral, b) Radial .....	28
Figura 9. Arquivo de robô: \$config.dat.....	29
Figura 10. Processo de usinagem com o robô: a) Desenho em CAD, b) Transferência de dados de CAD para CAM, c) Geração de dados NC, d) Conversão de dados NC em programa de robô e simulação do programa, e) Usinagem com o robô. (11) .....	30
Figura 11. Passos para realizar a usinagem com o robô .....	30
Figura 12. Interface KUKA SimPro (13) .....	31
Figura 13. Ferramentas.....	32
Figura 14. Interface KUKA NC-Verify .....	33
Figura 15. Introdução dos parâmetros de usinagem no KUKA SimPro .....	34
Figura 16. Arquivos de robô gerados pelo KUKA SimPro .....	35
Figura 17. Interface Transfer Manager.....	35
Figura 18. Ferramenta: a) Luva de suporte do spindle, b) Fuso montado no eixo 6 .....	36
Figura 19. Unidade de controle NE-147 .....	37
Figura 20. Bloco de espuma rígida de poliuretano.....	38

Figura 21. Fresamento $f=2\text{mm}$ . a) $n=12000\text{rpm}$ , b) $n=18000\text{rpm}$ .....	39
Figura 22. Fresamento $f=5\text{mm}$ . a) $n=12000\text{rpm}$ , b) $n=18000\text{rpm}$ .....	40
Figura 23. Bloco .....	41
Figura 24. Chave inglesa .....	42
Figura 25. Semi-esfera .....	43
Figura 26. a) Bancada real, b) Bancada virtual construida no KUKA Sim Pro.....	44
Figura 27. Bloco. a) CAD, b) Real .....	46
Figura 28. Chave inglesa. a) CAD, b) Real .....	47
Figura 29. Semi-esfera. a) CAD, b) Real .....	48

## Lista de tabelas

Tabela 1. Características de três máquinas diferentes de prototipagem rápida .....	24
Tabela 2. Deslocamento e velocidade com carga nominal de cada eixo .....	26
Tabela 3. Parâmetros de usinagem .....	38

## Lista de abreviaturas e siglas

ISO	International Organization for Standardization
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Comando Numérico Computadorizado
KR	Kuka Robot
NC	Numerical Control
CLP	Controlador Lógico Programável

## Lista de símbolos

$n$	rotação [rpm]
$d$	diâmetro [mm]
$f$	avanço por revolução [mm]
$f_z$	avanço por dente [mm/dente]
$z$	número de dentes
$v_c$	velocidade de corte [m/min]
$v_f$	velocidade de avanço [m/min]
$a_p$	profundidade de corte [mm]
$a_e$	penetração de trabalho [mm]
$t_c$	tempo de corte [min]
$L$	distância percorrida pela ferramenta [m]
$Q$	taxa de remoção de material [mm <sup>3</sup> /min]

## Sumário

1. Introdução .....	17
2. Revisão Bibliográfica .....	19
2.1. Usinagem com robô .....	19
2.2. Processo de fresamento .....	20
2.3. Prototipagem rápida .....	23
3. Trabalho Experimental .....	25
3.1. Robô KUKA KR5 sixx R850 .....	25
3.2. Programas CAM – PowerMill .....	27
3.3. Arquivo <i>\$config.dat</i> .....	28
3.4. CAMRob e processo de usinagem com o robô .....	29
3.5. Ferramenta: Fuso e fresa .....	36
3.6. Material: Espuma de poliuretano rígida .....	37
3.7. Parâmetros de usinagem .....	38
3.8. CAD das peças a serem usinadas .....	40
4. Resultados e Discussão .....	44
5. Conclusões.....	49



## 1. Introdução

*“Um robô industrial é definido como um manipulador programável em três ou mais eixos, controlado automaticamente, reprogramável e multifuncional” (1).*

Nas últimas três décadas, os robôs industriais sofreram significativas mudanças. O que era apenas um mecanismo repetitivo e pouco flexível se converteu em um manipulador reprogramável e multifuncional projetado para mover e manusear materiais, peças, ferramentas, ou dispositivos especiais capazes de desempenhar uma variedade de tarefas por meio de movimentos variáveis programados (2).

Atualmente, cerca de 95% da aplicação dos robôs industriais se dá nos campos de soldagem, pintura, transporte de materiais entre outros. Poucos robôs são utilizados em atividades que agregam mais alto valor aos produtos, como o processo de usinagem. Com a mudança dos ciclos de produção, a qual pretende obter produtos de alta qualidade em períodos de tempo menores, não é mais economicamente viável utilizar soluções de automação não flexíveis.

Dentro desse contexto os processos de usinagem com robô industrial podem ter um importante papel na redução de custos de produção nas indústrias. Programando-os corretamente, a flexibilidade na usinagem pode aumentar e o tempo de produção pode diminuir consideravelmente, pois o robô pode usinar em diferentes direções sem necessidade de reposicionar a peça que está sendo usinada, o que facilitaria a usinagem em caso de peças de grandes dimensões.

O presente trabalho irá explorar a utilização de um robô industrial na usinagem de protótipos em materiais de baixa dureza como os polímeros.

### **1.1. Objetivos**

O objetivo deste trabalho é melhorar os processos de usinagem que existem atualmente com a ajuda de um robô industrial. Devido à flexibilidade dos robôs, peças mais complexas podem ser usinadas com maior facilidade e menor custo, pois comparando com máquinas CNC, os robôs são mais baratos e enquanto à comparação com mão de obra, a longo prazo os manipuladores resultam ser mais acessíveis. O foco do projeto é descobrir se os robôs tem capacidade de usinar protótipos.

O projeto não pretende substituir as máquinas ferramentas CNC nem máquinas de prototipagem rápida, mas ampliar a área de utilização dos robôs industriais, pois atualmente a capacidade deles não é explorada como poderia.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Usinagem com robô

Segundo estudos recentes (3), a utilização dos robôs é em 85% dirigida à manipulação de objetos e/ou materiais, 10% na montagem na indústria e finalmente só 5% na usinagem de materiais. Este último campo de trabalho está começando a crescer devido à importância na redução de custos nos processos de fabricação e ao aumento de precisão dos robôs na atualidade.

Até pouco tempo atrás os robôs não eram considerados capazes de realizar o trabalho de fresamento. Mas com o desenvolvimento de novos *softwares* como o CAMRob do Grupo KUKA Roboter esta atividade está convertendo-se em uma realidade.

Uma das qualidades dos robôs aplicados em processos de usinagem é a sua capacidade de usinar peças de alta complexidade em espaços reduzidos, um robô ocupa 40% menos de espaço que uma máquina CNC (4), ou peças de dimensões superiores às do próprio manipulador, sendo que um robô usina com um mínimo de 6 eixos, de acordo a (5), podendo estes aumentar até 7 ou 8, com o uso de mesas giratórias e unidades lineares (trilhos) que podem ser adicionadas ao processo de fabricação.

Os dois maiores inconvenientes encontrados na usinagem com robô são: repetibilidade da posição e a rigidez das juntas.

A repetibilidade da posição dos robôs atuais encontra-se entre  $\pm 0.01\text{mm}$  e  $\pm 0.1\text{mm}$  mas para prototipagem esta repetibilidade é altamente competitiva pois a precisão da prototipagem rápida encontra-se na faixa de  $\pm 0.1\text{mm}$  a  $\pm 0.2\text{mm}$ . Segundo (4),

comparando máquinas ferramentas, prototipagem rápidas e robôs, estes últimos são os mais aptos para realizar a usinagem de protótipos e peças de alta complexidade.

A rigidez dos robôs é um problema de acordo a (4), já que são sistemas multi-articulares cuja força no último eixo não é suficiente para usinar. Devido a essa fraqueza, robôs podem usinar materias de baixa dureza, como espuma, madeira, polímeros, cera, argila, gesso, entre outros, os quais não causarão vibração no braço mecânico. Comparando o robô com as máquinas CNC é uma desvantagem pois o robô não é capaz de usinar metais como aço, mas para prototipagem rápida oferece uma ampla variedade de materiais.

## **2.2. Processo de fresamento**

É a operação de usinagem cujo propósito é obter superfícies de formas diferentes utilizando ferramentas multicortantes denominadas fresas.

As fresas têm duas ou mais arestas cortantes dispostas simetricamente ao redor do eixo, cada aresta tem como objetivo retirar uma camada de material da peça com o movimento rotativo de corte da fresa.

Segundo a disposição dos dentes da fresa, Figura 1, classifica-se a operação da seguinte maneira:

a) Fresamento Frontal ou de Topo é o processo destinado à obtenção de uma superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta.

b) Fresamento Tangencial ou Periférico é o processo destinado à obtenção de uma superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta.

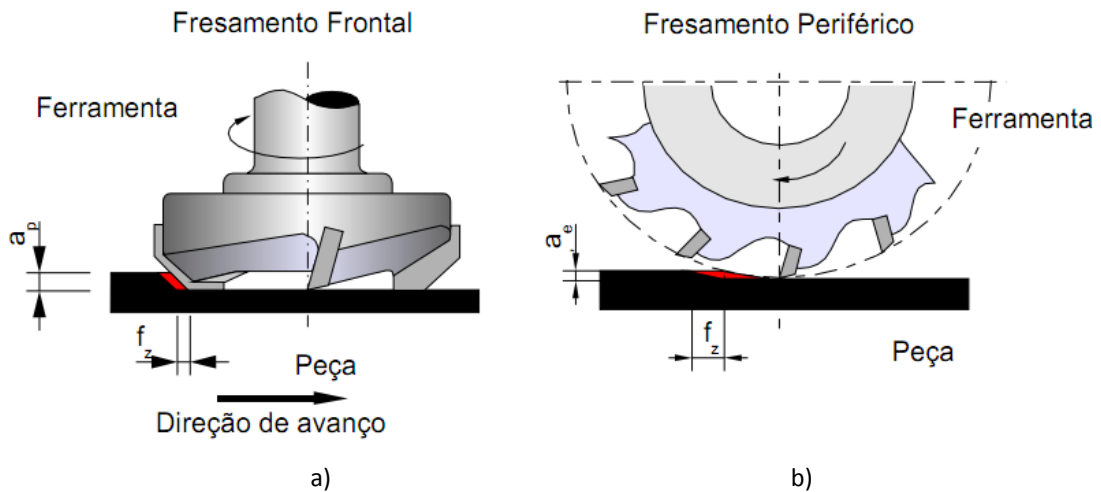


Figura 1. Fresamento segundo à posição da ferramenta. a) De topo, b) Tangencial (6)

Existem duas técnicas de fresamento tangencial, classificadas de acordo com o movimento relativo entre a fresa e a a ferramenta: concordante e discordante, os quais podem ser observados na Figura 2.

Fresamento concordante é aquele cujo sentido do movimento de avanço é o mesmo do movimento de corte. E fresamento discordante é aquele cujo sentido do movimento de avanço é contrário ao sentido rotatório da fresa.

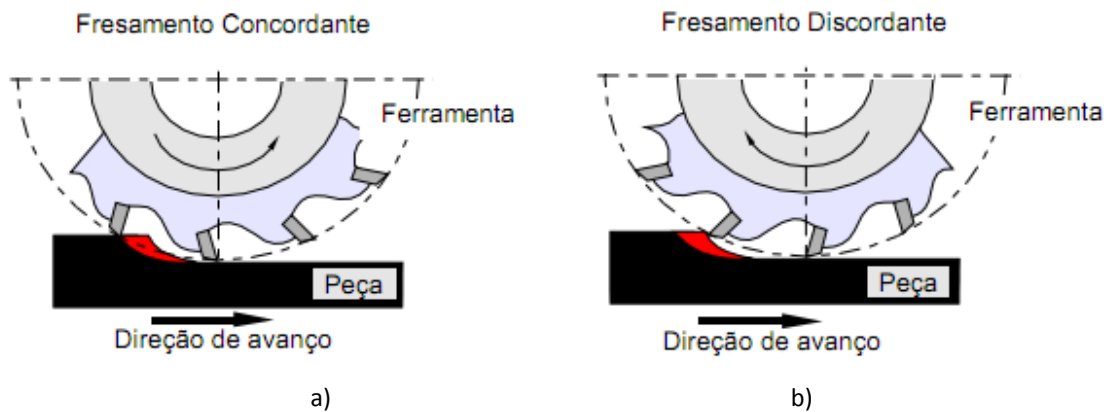


Figura 2. Fresamento tangencial: a) Concordante, b) Discordante (6)

Como pode ser observado na Figura 3, é possível obter fresamento concordante e discordante ao mesmo tempo, isto dependendo do propósito da usinagem.

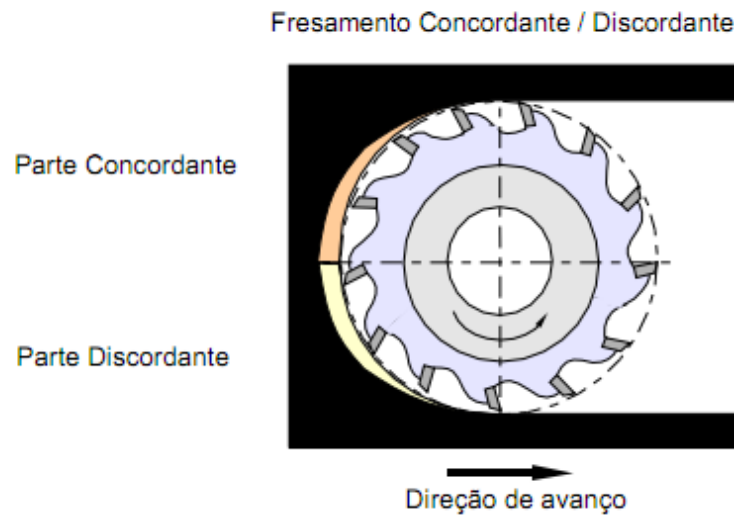


Figura 3. Fresamento Concordante/Discordante (6)

A seguir, de acordo a (7), uma descrição completa de todos os parâmetros necessário para realizar o processo de fresamento.

- Rotação ( $n$ ) [rpm]: é o número de revoluções por unidade de tempo que a fresa realiza em torno do seu eixo.
- Diâmetro ( $d$ ) [mm]: é o diâmetro da fresa.
- Avanço por revolução ( $f$ ) [mm]: é o deslocamento da ferramenta em uma volta.
- Avanço por dente ( $f_z$ ) [mm/dente]: é o deslocamento linear percorrido por um dente a cada volta.
- Número de dentes ( $z$ ): é o número total de dentes da fresa.
- Velocidade de corte ( $v_c$ ) [m/min]: é a velocidade com que os dentes da ferramenta tocam na peça. É calculada em função da rotação e do diâmetro da ferramenta.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

- Velocidade de avanço ( $v_f$ ) [m/min]: é a velocidade de translação da ferramenta sobre a peça ou vice-versa. É calculada em função da rotação, número de dentes e avanço por dente.

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n$$

- Profundidade de corte ( $a_p$ ) [mm]: é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho, na direção do eixo da fresa.
- Penetração de trabalho ( $a_e$ ) [mm]: é a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço.
- Tempo de corte ( $t_c$ ) [min]: é o tempo que efetivamente a ferramenta está em corte.

$$t_c = \frac{L}{v_f} = \frac{L}{f \cdot n}$$

em que  $L$  [m] é a distância percorrida pela fresa.

- Taxa de remoção de material ( $Q$ ) [mm<sup>3</sup>/min]: é o volume de material retirado por unidade de tempo.

$$Q = a_p \cdot a_e \cdot v_f$$

### 2.3. Prototipagem rápida

Segundo, (8), a prototipagem rápida designa um conjunto de tecnologias usadas para se fabricar objetos físicos diretamente a partir de desenhos CAD. Estes métodos agregam e ligam materiais, camada a camada, de forma a construir o objeto desejado. A prototipagem rápida permite aos projetistas criar rapidamente protótipos concretos a partir de seus projetos, ao invés de figuras bidimensionais. Esses modelos apresentam diversos usos. Eles constituem um auxílio visual excelente além de permitir testes de funcionamento dos produtos, discussão prévia com os clientes e colaboradores do projeto, entre outros. De fato, a prototipagem rápida na construção de modelos pode gerar economia da ordem de 70 a 90%.

Dentre os tipos de prototipagem rápida, segundo (9) tem-se:

- CNC Usinagem Tecnologias
- Modelagem por Deposição Fundida
- Métodos de Deposição de Jato de Tinta
- Modelização de Objeto Laminado
- Tecnologias de Formação Laser-Pó
- Sinterização por Laser Seletivo
- Cura em Solo Sólido
- Metal Casting Process
- Metal Spray & Eletrodeposição
- Estereolitografia
- Foto-polimerização métodos (diferente de estereolitografia)
- Impressão Tridimensional (3DP) e tecnologias relacionadas

Comparando diversas máquinas de prototipagem rápida que se encontram no mercado, foi possível elaborar a tabela a seguir:

Tabela 1. Características de três máquinas diferentes de prototipagem rápida<sup>1</sup>

Tamanho da peça	Precisão
254 x 254 x 305 mm	+/-0.241mm
406 x 356 x 406 mm	+/-0.127mm
914 x 610 x 914 mm	+/- 0.089 mm

<sup>1</sup> Informações obtidas da empresa Fortus 3D Production Systems (<http://www.fortus.com>)



### 3. Trabalho Experimental

#### 3.1. Robô KUKA KR5 sixx R850

O robô KUKA KR5 sixx R850 pertence à categoria dos robôs compactos da KUKA e foi selecionado para este projeto para usinar materiais de baixa dureza como espuma de poliuretano, pois é um robô rápido de alta precisão, característica muito importante nos processos de usinagem.

Segundo (10), os principais elementos que fazem parte do sistema do robô se encontram na Figura 4.



Figura 4. 1) Robô manipulador, 2) Unidade de controle do robô, 3) Unidade manual de programação: KCP, 4) Cabos de conexão (10)

O KR5 sixx R850 é um manipulador articulado com 6 eixos (Figura 5) fabricado em metal leve, sendo o movimento de cada eixo limitado como observado na Tabela 2.

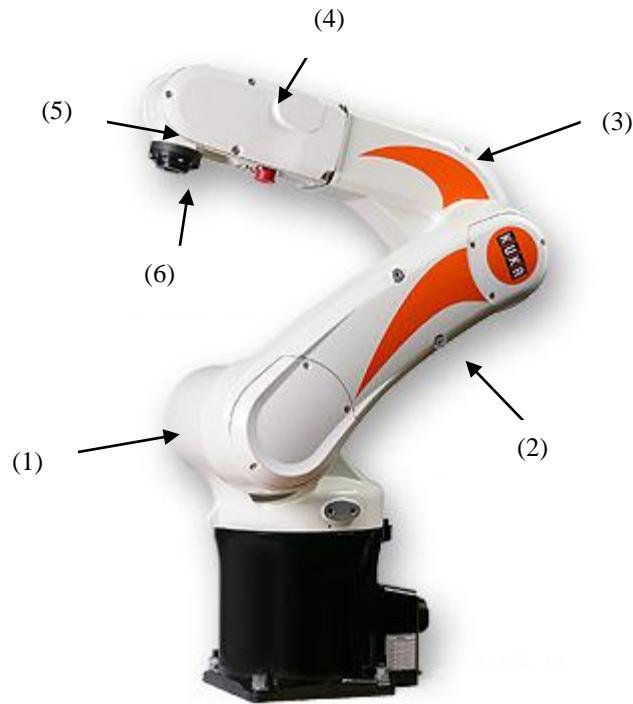


Figura 5. Eixos do KR5 sixx R850 (10)

Tabela 2. Deslocamento e velocidade com carga nominal de cada eixo

Eixo	Ângulo de deslocamento, limitado por <i>software</i>	Velocidade com carga nominal 5kg
1	+/- 170°	250 °/s
2	+45° até - 190°	250 °/s
3	+165° até - 119°	250 °/s
4	+/- 190°	410 °/s
5	+/- 120°	410 °/s
6	+/- 358°	660 °/s

Os eixos do robô permitem seu movimento dentro do envelope de trabalho mostrado na Figura 6.

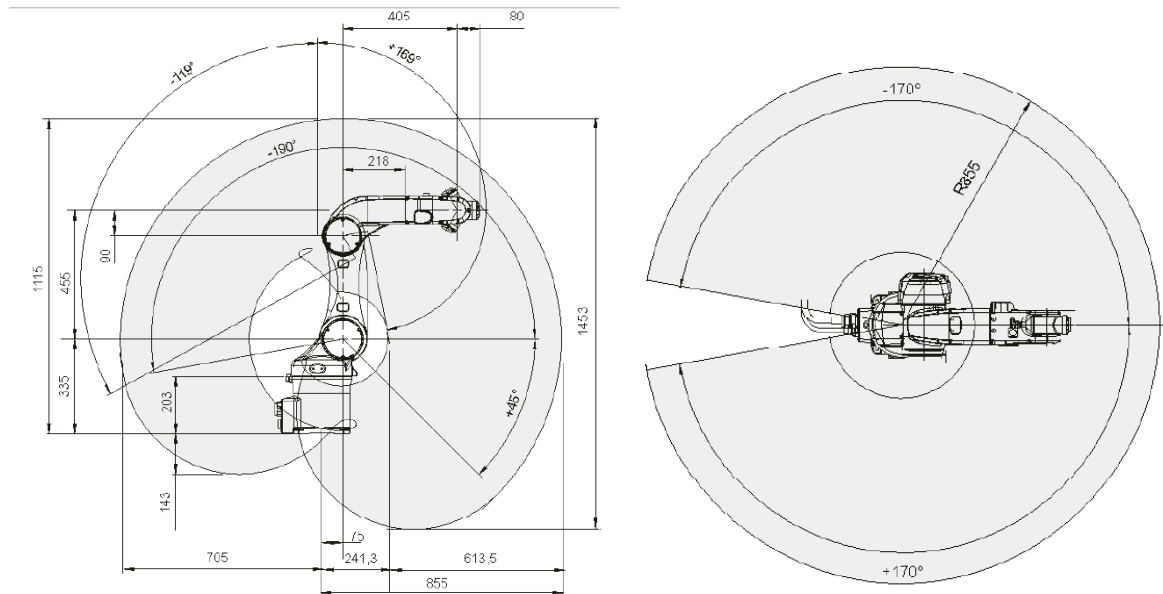


Figura 6. Envelope de trabalho do robô. (10)

Por outro lado, os robôs KUKA contém 16 posições de memória para ferramentas, TOOL\_DATA[n],  $n=1, \dots, 16$ , e 32 posições de memória para bases BASE\_DATA[m],  $m=1, \dots, 32$ .

Analisando este robô é possível observar que o tamanho aproximado das peças que este é capaz de produzir é de 500x500x500mm.

### 3.2. Programas CAM – PowerMill

CAM é o uso de um programa para controlar máquinas ou robôs no processo de manufatura. Dentre os programas utilizados para controlar máquinas CNC tem-se o PowerMill e o SPRIT, sendo os dois compatíveis com o CamRob, o qual é um programa da KUKA Robot Group que transforma arquivos NC em arquivos de robô.

No desenvolvimento deste projeto foi utilizado o PowerMill com estratégias de usinagem de três eixos. Foram utilizadas, uma estratégia de desbaste, operação de usinagem anterior ao acabamento, e duas de acabamento para gerar diversos arquivos NC.

A técnica de desbaste utilizada foi desbaste raster, a qual pode ser observada na Figura 7<sup>2</sup>. E as técnicas de acabamento utilizadas foram radial e espiral, como pode ser observado na Figura 8.

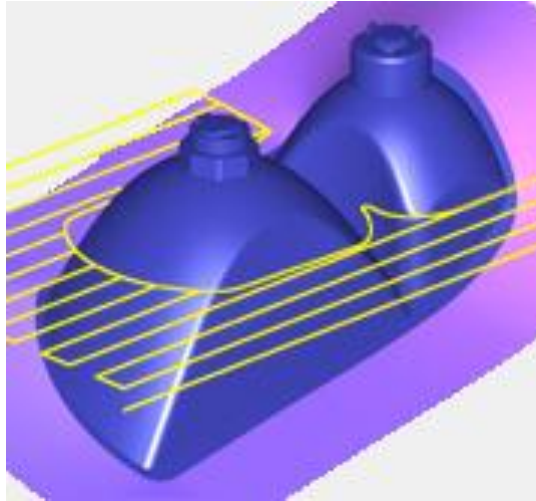
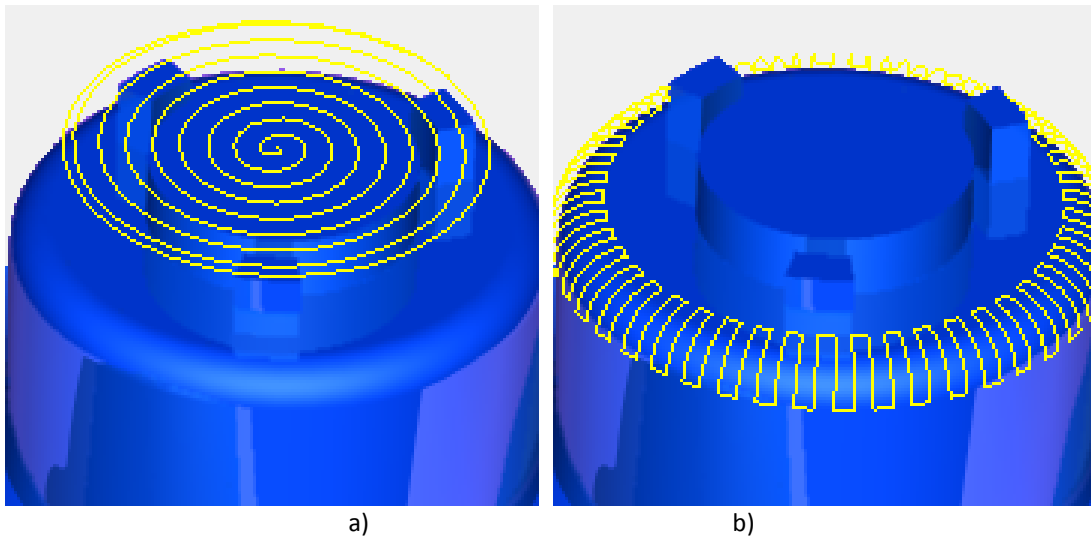


Figura 7. Desbaste raster<sup>2</sup>



a) b)  
Figura 8. Acabamento. a) Espiral, b) Radial<sup>2</sup>

### 3.3. Arquivo *\$config.dat*

Parte da configuração dos parâmetros de usinagem consiste na leitura do arquivo *\$config.dat*, o qual contém todos os dados referentes às bases externas e de ferramenta do

---

<sup>2</sup> As Figura 7e Figura 8 foram obtidas do software PowerMill.

robô, entre outros, sendo este um passo muito importante no processo de simulação da usinagem e um dos passos mais difíceis, pois é neste momento que possíveis problemas de incompatibilidade entre a estrutura virtual e real é descoberta.

Este arquivo é encontrado no disco rígido KRC:\R1\SYSTEM e pode ser observado na Figura 9.

```

DEFDAT $CONFIG
;FOLD BASISTECH GLOBALS
;
;=====
; Default parameters for movement
; These values shouldn't be changed
;=====
;
;-----
; general MOVEMENT - parameters:
;-----

```

Figura 9. Arquivo de robô: \$config.dat

### 3.4. CAMRob e processo de usinagem com o robô

Em 2006 foi lançado ao mercado o *software* KUKA CAMRob, o qual de acordo a (11) e (12), converte arquivos CAM em arquivos de robô, fazendo possível a usinagem com o robô. O robô pode ser utilizado para usinar materiais de densidade média e baixa como polímeros e madeira.

Este *software* permite que o robô realize processos de desbaste e polimento em peças já usinadas, mas também permite realizar processos de manufatura, como fresamento ou torno-fresamento.

O processo de usinagem com o robô segue os passos mostrados na Figura 10. Sendo instalado o *software* CAMRob no PC e na unidade de controle do robô um arquivo em CAD é

transformado em CAM para posteriormente com o *software* CAMRob ser convertido em um arquivo de robô pronto para a usinagem da peça originalmente desenhada.

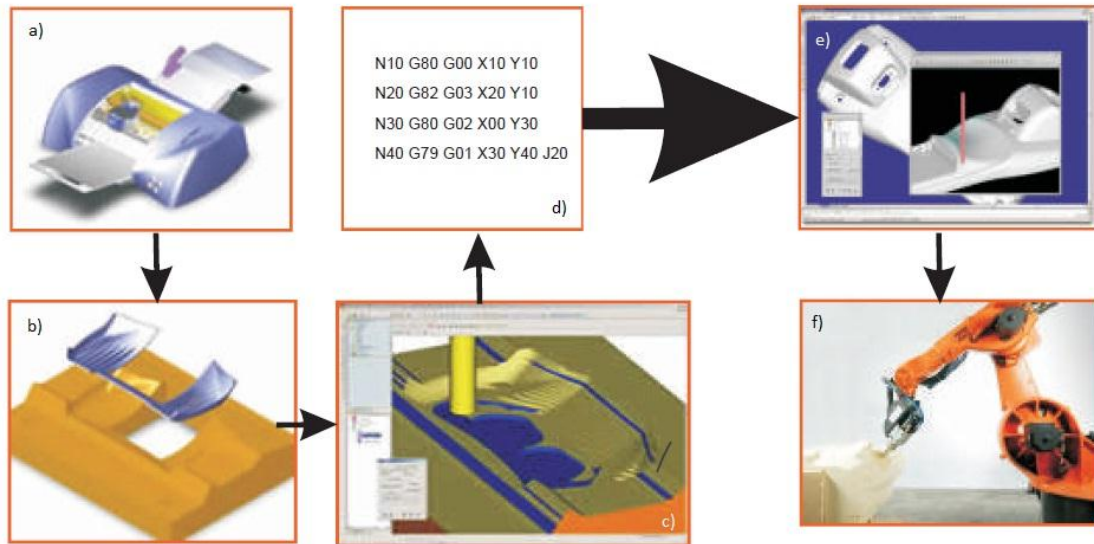


Figura 10. Processo de usinagem com o robô: a) Desenho em CAD, b) Transferência de dados de CAD para CAM, c) Geração de dados NC, d) Conversão de dados NC em programa de robô e simulação do programa, e) Usinagem com o robô. (11)

A seguir serão descritos os passos (Figura 11) que são necessários para obter os arquivos NC.

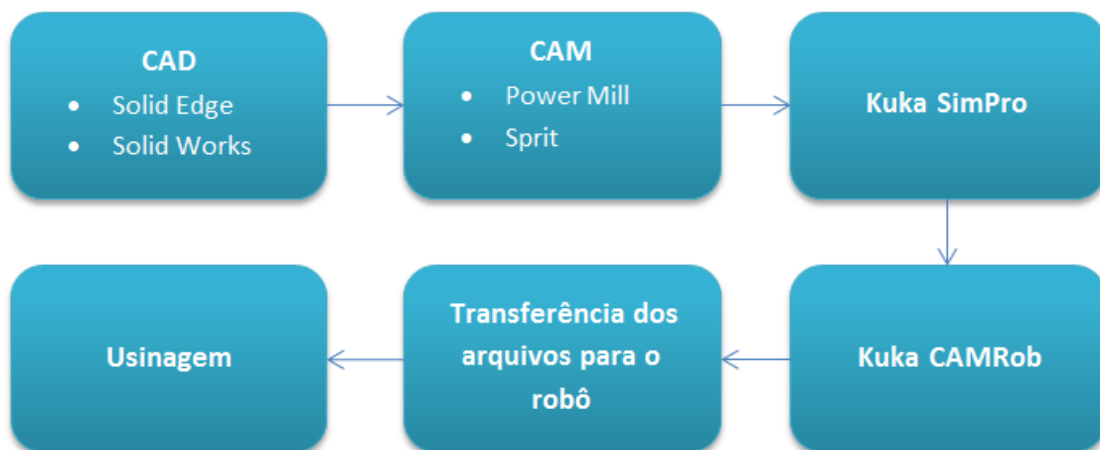


Figura 11. Passos para realizar a usinagem com o robô

O primeiro passo consiste em montar toda a estrutura real do robô no KUKA SimPro para poder realizar a simulação da usinagem e futura geração do programa de robô (Figura

12). Deve-se levar em consideração que os componentes da célula robótica devem estar ligados uns aos outros, com relações pais e filhos, e os componentes básicos da célula de usinagem são: robô, motor, fuso e a peça.

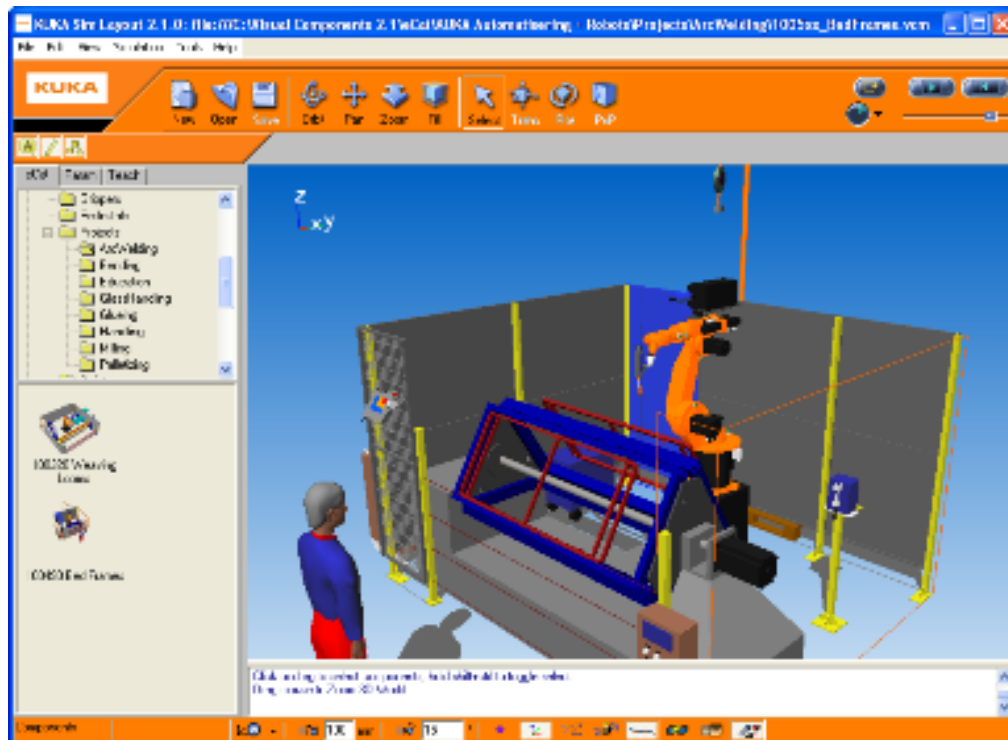


Figura 12. Interface KUKA SimPro (13)

A seguir é necessário configurar o sistema seguindo uma a uma as seguintes opções, (14), as quais podem ser observadas na Figura 13.

- *Synchronize tools*: permite sincronizar as bases das ferramentas do layout com as do robô e vice-versa.
- *Synchronize base*: permite sincronizar as bases das peças do layout com as do robô e vice-versa.
- *Configure robot*: permite configurar os limites do robô e sua posição zero.
- *Assign token*: permite criar relações entre os componentes do layout e os componentes exigidos pelo KUKA Applications para realizar a usinagem. Por exemplo, relaciona o robô com o KR5 sixx 850 e a ferramenta com um dado fuso.

- *Transfer manager*: permite transferir o arquivo gerado no CamRob para o robô.

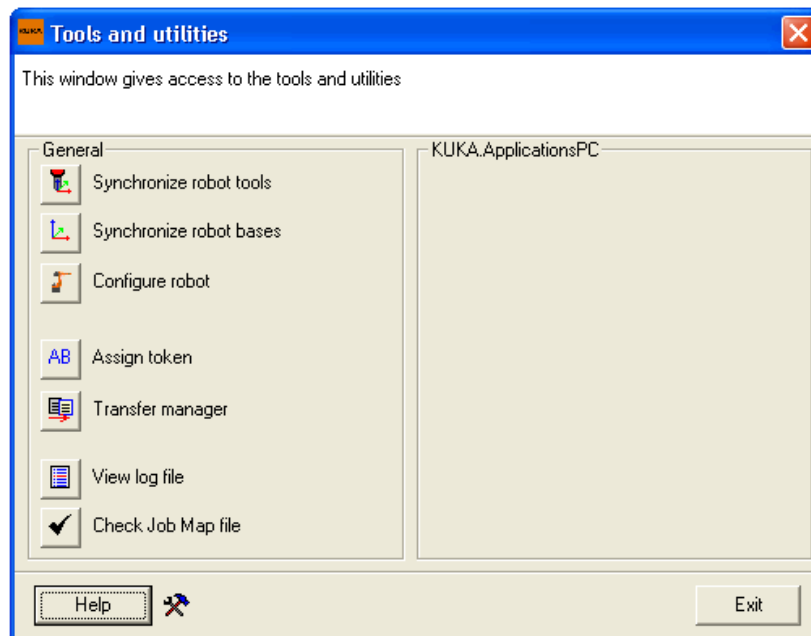


Figura 13. Ferramentas

O próximo passo é verificar se o programa NC poderá ser transformando em um programa de robô, para isto utiliza-se o *software* livre KUKA NC-Verify, como pode ser observado na Figura 14. Antes de rodar o código NC no programa é necessário apagar as informações que o PowerMill coloca sobre o processo de usinagem e linhas que contêm o código G de posicionamento da ferramenta, como são o G54 a G59, pois as coordenadas serão dadas pelo arquivo *\$config.dat* do robô.

Se o programa aceitar o código NC este poderá ser utilizado no KUKA CamRob, caso contrário será necessário obter um novo código com outra estratégia de usinagem. Isto é devido aos comandos G, como o G02 e G03, que não são reconhecidos pelo KUKA CamRob.



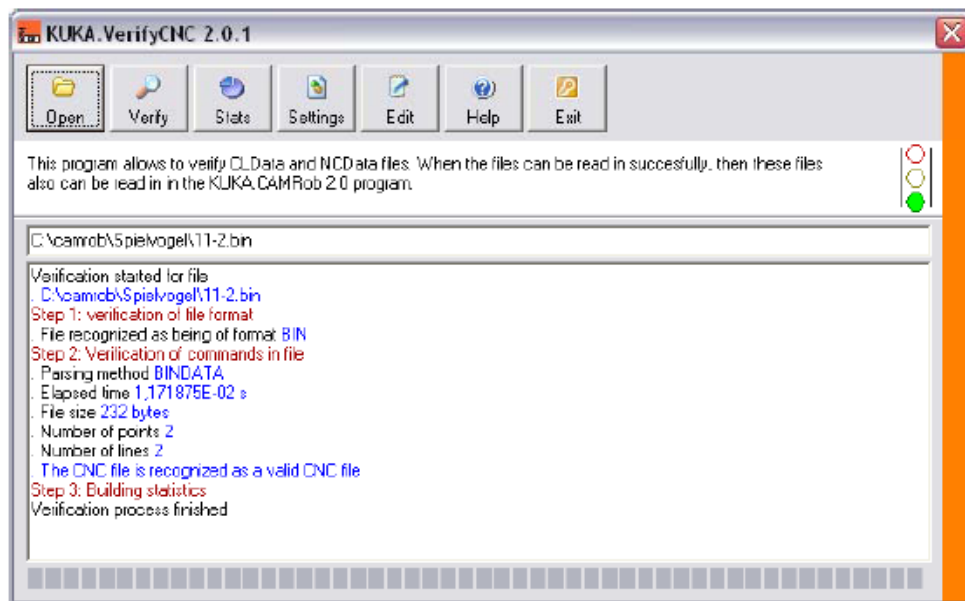


Figura 14. Interface KUKA NC-Verify

Depois de montar esta estrutura, são inseridos todos os parâmetros de usinagem no KUKA CamRob, como pode ser observado na Figura 15, e o *software* lê o arquivo NC para realizar uma simulação da usinagem. A simulação tem como objetivo verificar erros de singularidade<sup>3</sup>, possíveis colisões, ou chegada ao fim de curso dos eixos para posteriormente gerar o programa de usinagem do robô.

É necessário seguir as instruções passo a passo.

- *Robot base number*: lê o arquivo \$config.dat e permite escolher a base na qual o robô usinará.
- *Read*: lê o arquivo NC.
- *Filter*: controla os parâmetros de usinagem da fresa, a velocidade de corte, a utilização de fluido refrigerante e tempo de funcionamento do fuso. Também lê o arquivo \$config.dat e permite escolher a ferramenta com a qual o robô irá trabalhar.

<sup>3</sup> Quando três eixos do robô ficam alinhados e não conseguem sair do lugar, sendo necessária a movimentação manual dos mesmos.

- *Params*: controla os parâmetros de usinagem relacionados com a qualidade da usinagem, como a precisão e tolerância da mesma.
- *Strategy*: permite mudar a posição inicial do fuso ou como este se aproximará da peça.
- *Reach*: analisa possíveis erros de singularidade, fim de curso dos eixos e colisões.
- *Save*: se a simulação rodar sem inconvenientes permite salvar os arquivos do robô que podem ser observados na Figura 16.

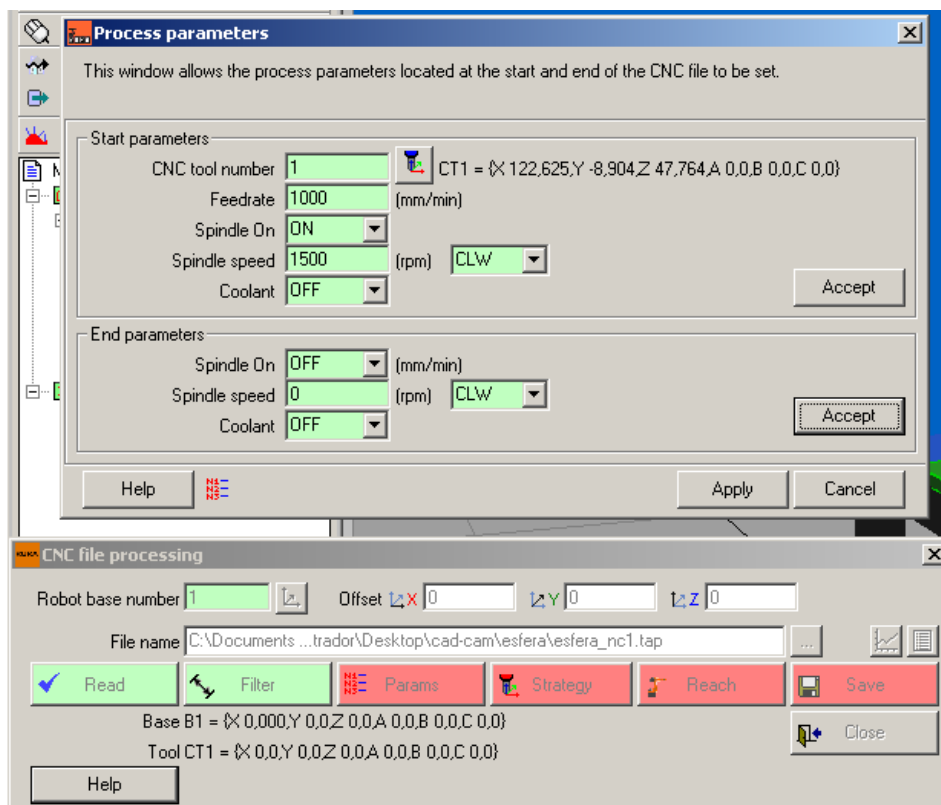


Figura 15. Introdução dos parâmetros de usinagem no KUKA SimPro

A seguir, se a simulação for realizada com sucesso, os arquivos do robô são gerados no Transfer Manager (Figura 17). Sendo que o SimPro gerará duas pastas e cinco arquivos (Figura 16), os quais contém toda a informação necessária para a execução da usinagem.

Images	6/9/2011 3:27 PM	File folder
Styles	6/9/2011 3:27 PM	File folder
bloco_1.00.bin	6/9/2011 3:25 PM	BIN File
teste3_1	6/9/2011 3:26 PM	DAT File
teste3_1	6/9/2011 3:26 PM	Chrome HTML Document
teste3_1	6/9/2011 3:26 PM	Task Scheduler Task Object
teste3_1	6/9/2011 3:26 PM	SRC File

Figura 16. Arquivos de robô gerados pelo KUKA SimPro

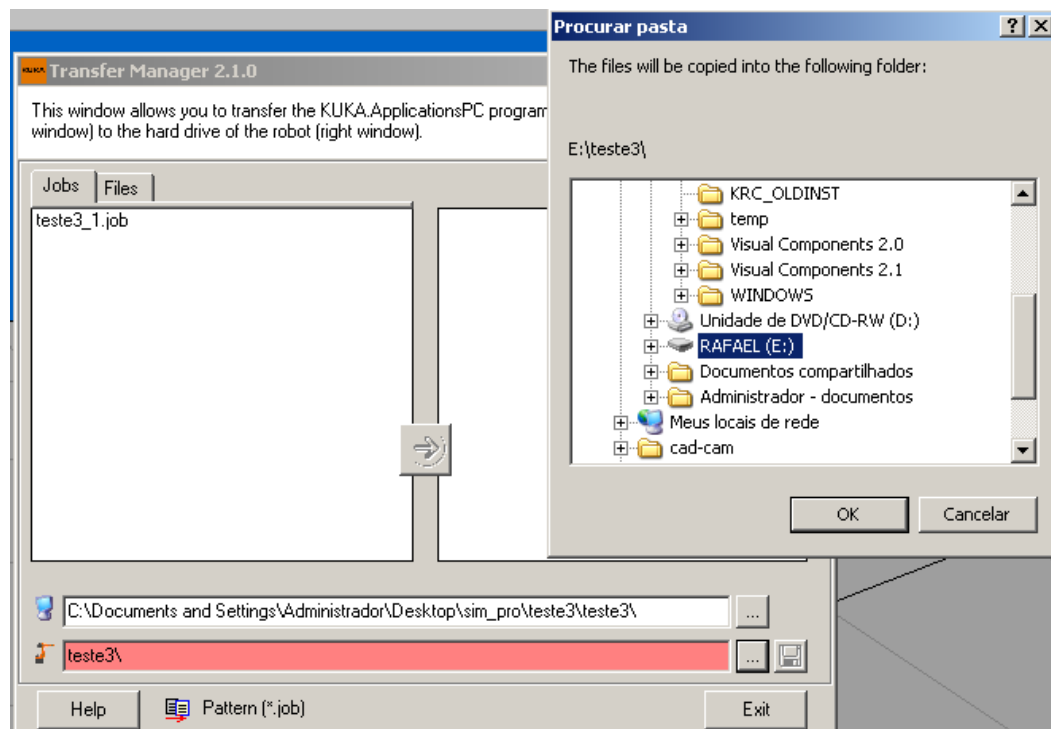


Figura 17. Interface Transfer Manager

No robô os arquivos .src e .dat são enviados para a pasta KRC:\Program, endereço no qual são executados todos os programas do robô. E os outros arquivos, incluindo as pastas, são enviados para o disco rígido do robô d:\applications\_data\nome\_projeto.

### 3.5. Ferramenta: Fuso e fresa

A ferramenta utilizada para usinagem com o robô é composta pelo motor reto EM-405 marca NSK de 350W de potência, o fuso NSK NR3060S de 5000 a 60000rpm e uma fresa ball nose de aço rápido de 6mm de diâmetro.

O motor tem uma conexão para uma mangueira de ar comprimido, cuja função é o resfriamento do mesmo para permitir seu uso contínuo durante longos períodos de tempo.

Para realizar a montagem do fuso uma luva de alumínio comum foi usinada e fixada em uma chapa de alumínio aeronáutico como pode ser observado na Figura 18. A chapa de fixação é de alumínio aeronáutico para absorver todos os esforços do processo de usinagem.

O peso foi um dos problemas observados pois a carga máxima suportada pelo robô é de 5kg, por este motivo a ferramenta e seu suporte não ultrapassam 1kg.

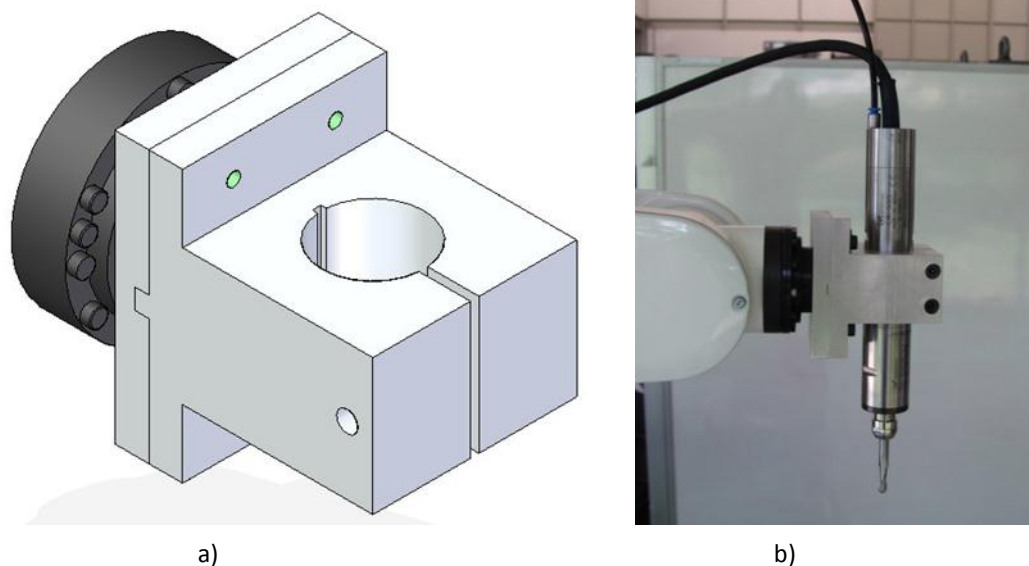


Figura 18. Ferramenta: a) Luva de suporte do spindle, b) Fuso montado no eixo 6

O fuso é controlado pela unidade de controle NSK NE-147 (Figura 19) a qual foi regulada manualmente durante o processo de usinagem. A pressão do ar comprimido para manter o motor e fuso resfriados foi de 1.5atm.



Figura 19. Unidade de controle NE-147

### 3.6. Material: Espuma de poliuretano rígida

O material escolhido para este trabalho foi a espuma de poliuretano rígida, por ser um polímero de baixa densidade e baixa dureza, duas características importantes considerando que a carga máxima suportada pelo robô é 5kg.

As principais matérias primas utilizadas na elaboração da espuma de poliuretano rígida, segundo (15), são isocianato (comumente MDI polimérico) e um ou mais polióis, além desses dois componentes utiliza-se aditivos como surfactantes, catalisadores, entre outros.

Para realizar a usinagem foram adquiridos vários blocos semelhantes aos da Figura 20, cujas características são:

- Dimensões: ~100x70x230mm, e
- Densidade: ~15kg/m<sup>3</sup>.



Figura 20. Bloco de espuma rígida de poliuretano

### 3.7. Parâmetros de usinagem

Para levantar os parâmetros de usinagem da espuma de poliuretano utilizada neste projeto foram realizadas usinagens lineares seguindo os dados da Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de usinagem

$f$ [mm]	$v_c$ [m/min]	$n$ [rpm]
<b>2</b>	6	12000
	4.8	12000
	3.6	12000
	6	18000
	4.8	18000
	3.6	18000
<b>5</b>	6	12000
	4.8	12000
	3.6	12000

	6	18000
	4.8	18000
	3.6	18000

Os resultados podem ser observados nas Figura 21 e Figura 22 onde as velocidades de corte foram: i) 6m/min, ii) 4.8m/min e iii) 3.6m/min e a usinagem concordante e discordante foram na parte superior e inferior de cada trilha, respectivamente.

Assim, depois de observar as Figura 21 e Figura 22 pode-se concluir que a usinagem concordante e  $f=2\text{mm}$ ,  $n=18000\text{rpm}$  e  $v_c=6\text{m/min}$  (Figura 21b) dão melhores resultados, portanto estes serão os parâmetros utilizados na usinagem das próximas peças.

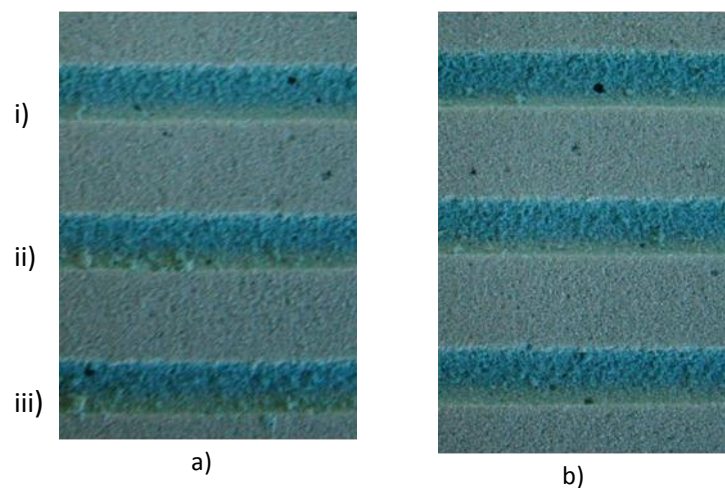


Figura 21. Fresamento  $f=2\text{mm}$ . a)  $n=12000\text{rpm}$ , b)  $n=18000\text{rpm}$

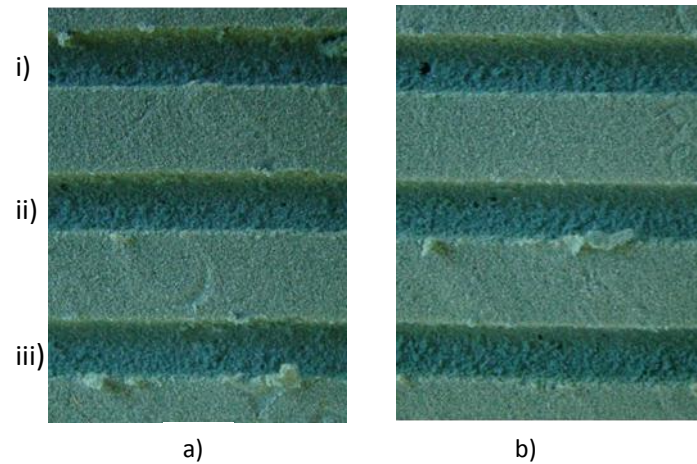


Figura 22. Fresamento  $f=5\text{mm}$ . a)  $n=12000\text{rpm}$ , b)  $n=18000\text{rpm}$

### 3.8. CAD das peças a serem usinadas

As três peças usinadas com o robô, Figura 23, Figura 24 e Figura 25, utilizaram a técnica de desbaste raster do PowerMill e os seguintes parâmetros de usinagem: com  $f=2\text{mm}$ ,  $v_c=6\text{m/min}$ ,  $n=18000\text{rpm}$  e tolerância de 0.1mm.

O objetivo da primeira peça usinada, Figura 23, foi entender o funcionamento do *software* e como são definidas as bases do robô no CAMRob, este foi o motivo do desenho do L e o quarto de uma esfera.



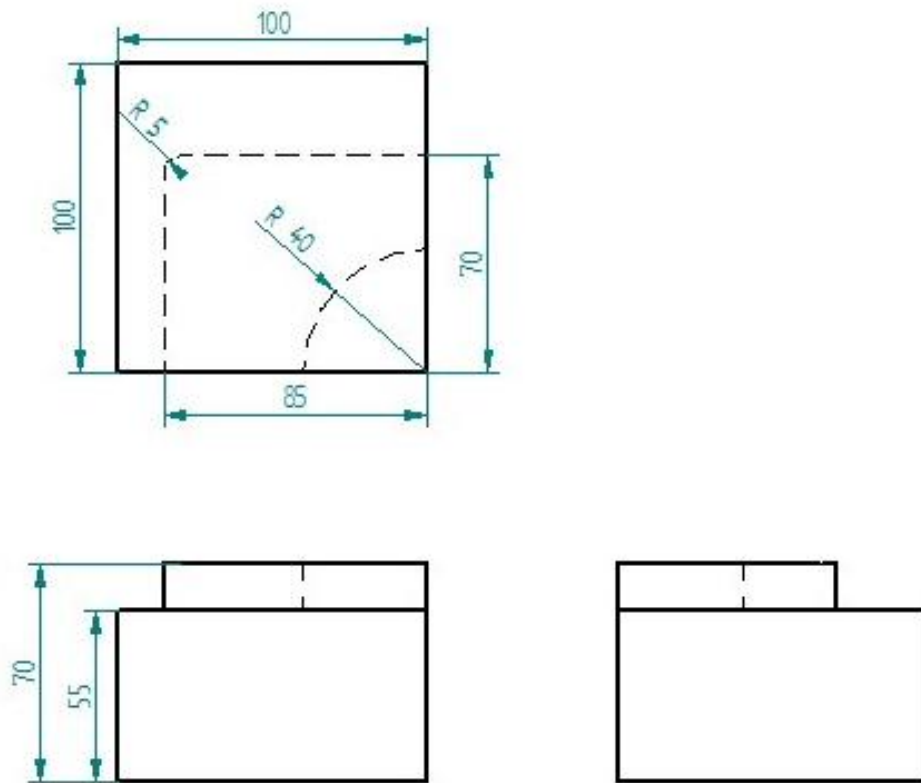


Figura 23. Bloco

A segunda peça usinada foi uma chave inglesa, Figura 24, para determinar se o robô teria a capacidade de usinar uma peça de maior complexidade.

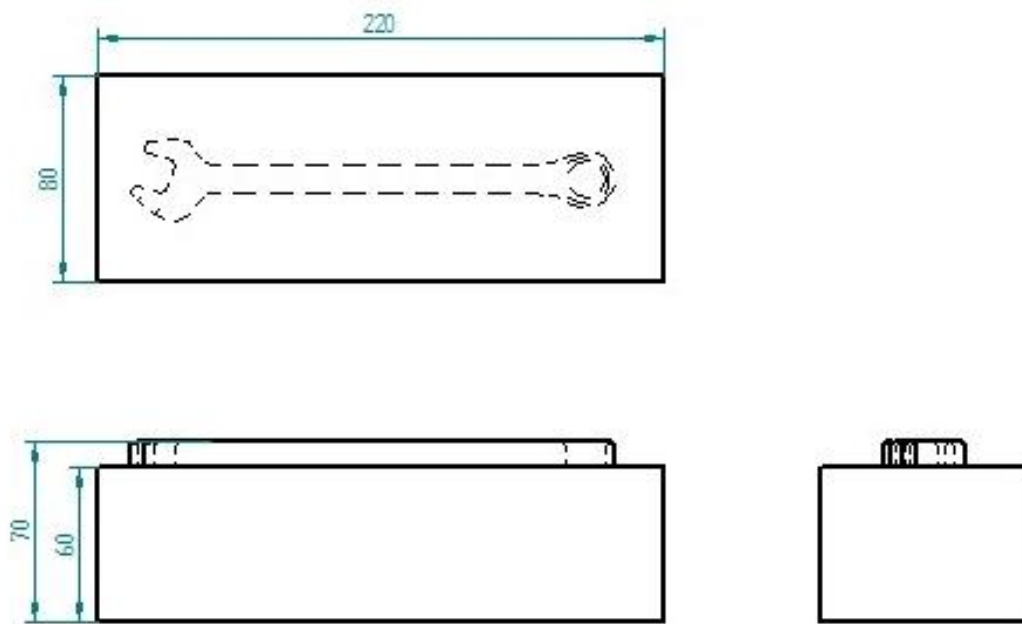


Figura 24. Chave inglesa

Finalmente, foi usinada uma semi-esfera, cujo desenho no CAD pode ser observado na Figura 25. Além do desbaste raster, nesta peça foram aplicadas duas técnicas de acabamento: espiral e radial. A tolerância do acabamento espiral foi 0.01mm e do radial 0.001mm.

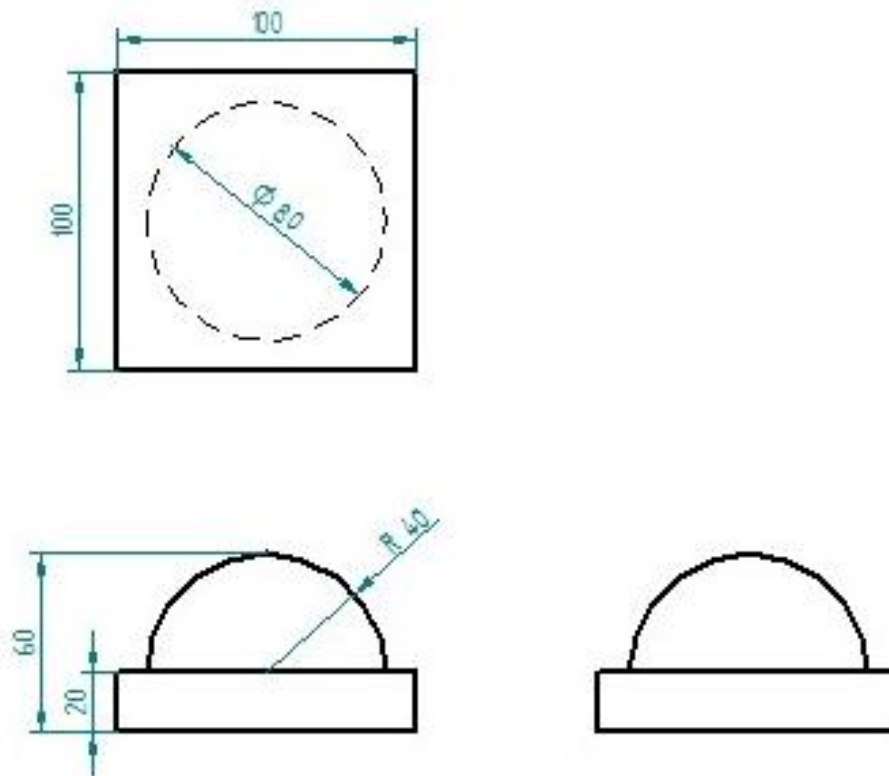


Figura 25. Semi-esfera

## 4. Resultados e Discussão

Comparando a precisão e o tamanho das peças que tanto os robôs quanto as máquinas de prototipagem rápida são capazes de produzir é possível concluir que o robô é capaz de usinar protótipos de maior volume e maior precisão. Para confirmar esta afirmação seria necessário usinar outros materiais para poder medir a precisão das peças finais, já que a espuma de poliuretano é um material frágil no qual não é possível realizar estas medições.

No software KUKA CAMRob foi montada a mesma estrutura física na qual pretendia-se realizar os ensaios, a bancada física foi medida para implementar a bancada no *software* e o resultado foi próximo do real, como pode ser observado na Figura 26.

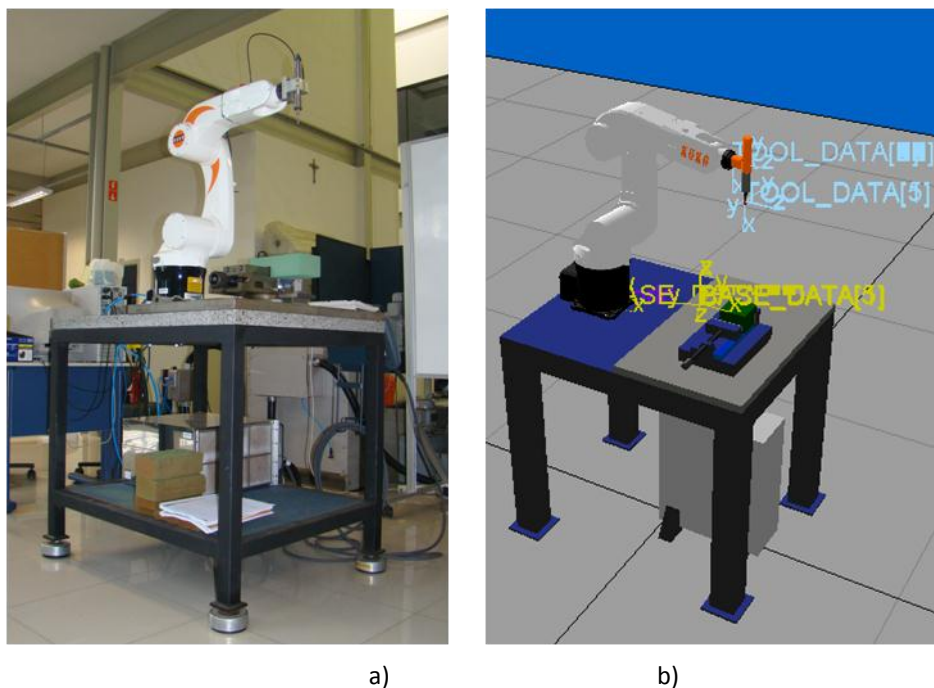


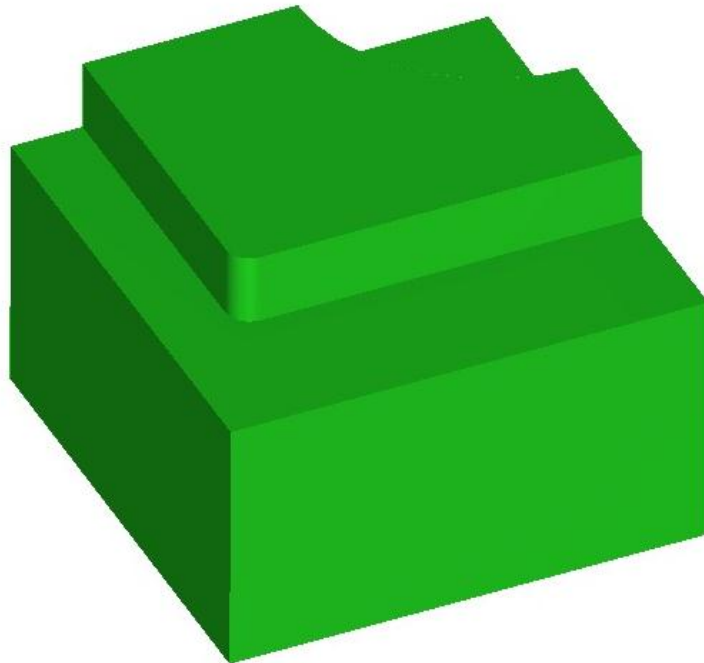
Figura 26. a) Bancada real, b) Bancada virtual construída no KUKA Sim Pro

No processo de usinagem os resultados serão descritos a seguir:

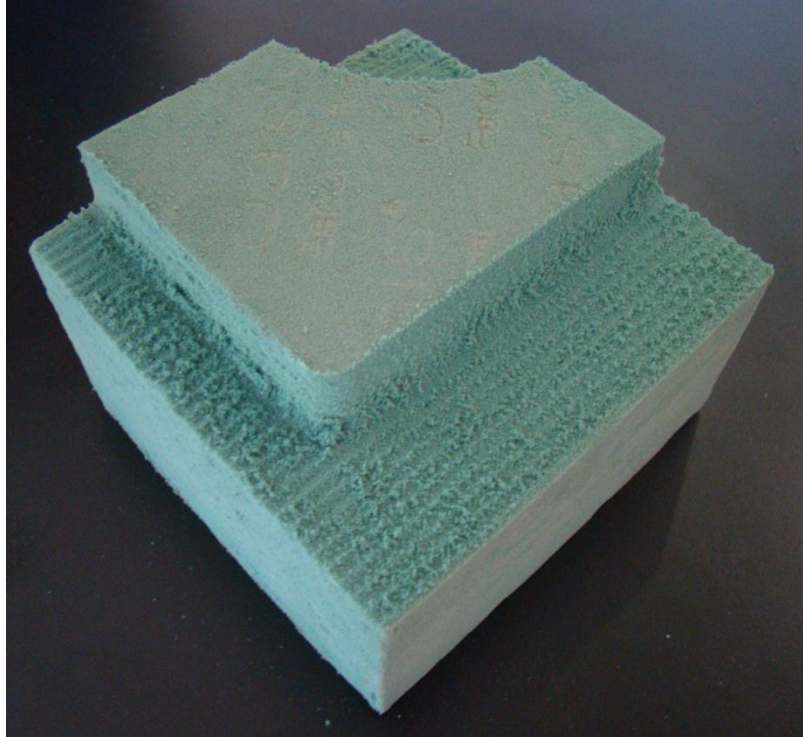
No caso da primeira peça, o bloco, a usinagem da mesma permitiu entender as bases do robô, pois o eixo no qual a ferramenta se desloca é o X+ e não Z- como nas máquinas ferramentas, assim ao gerar os arquivos de usinagem do robô, vários erros de colisão eram

detectados pelo CAMRob, impossibilitando a usinagem. Assim com esta peça de desenho abstrato foi possível entender e mudar o eixo principal da ferramenta de X+ para X- permitindo assim realizar todas as outras usinagens.

Comparando as fotos do desenho em CAD e da peça usinada, observa-se que as duas primeiras peças, Figura 27 e Figura 28, deram resultados altamente satisfatórios, pois foi possível usar com o manipulador. A peça final teve falhas no acabamento, dando assim uma peça com certas irregularidades.



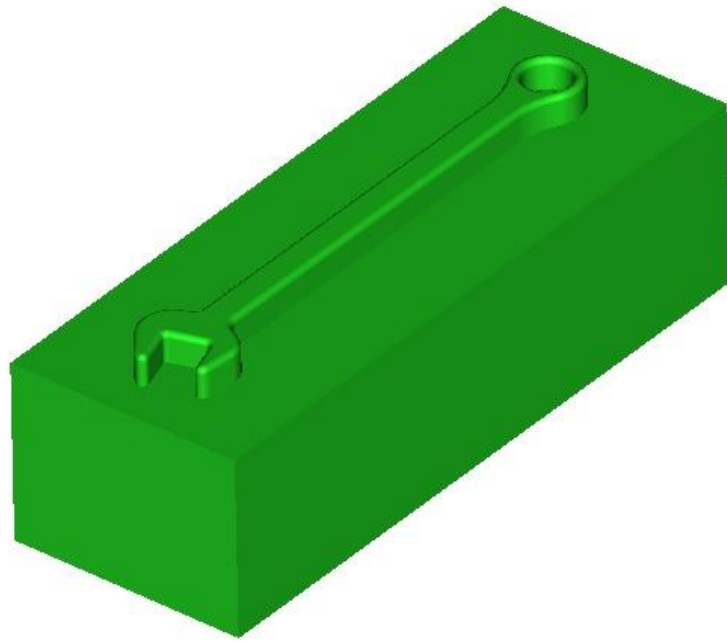
a)



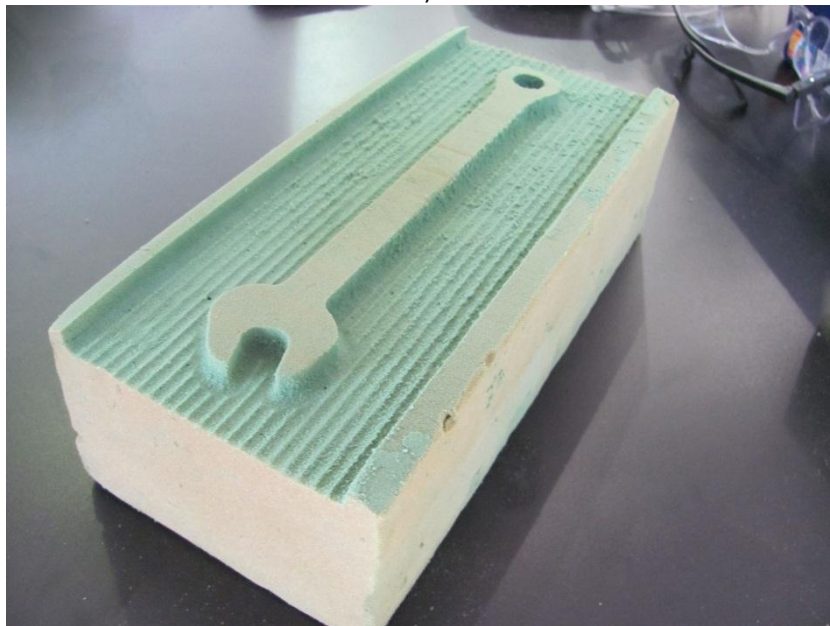
b)

Figura 27. Bloco. a) CAD, b) Real

Com a usinagem da chave inglesa, Figura 28, foi possível concluir que realmente o robô seria capaz de usinar protótipos em materiais de baixa dureza. Portanto, proseguiu-se a usinar a semi-esfera.



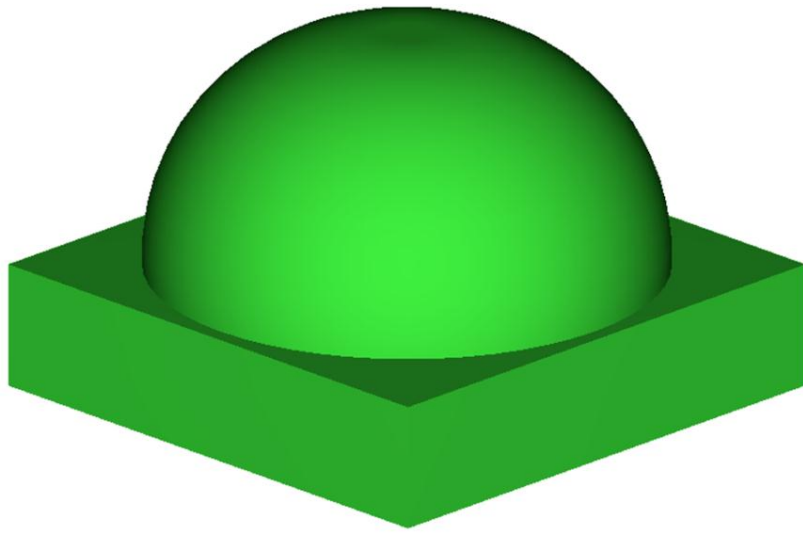
a)



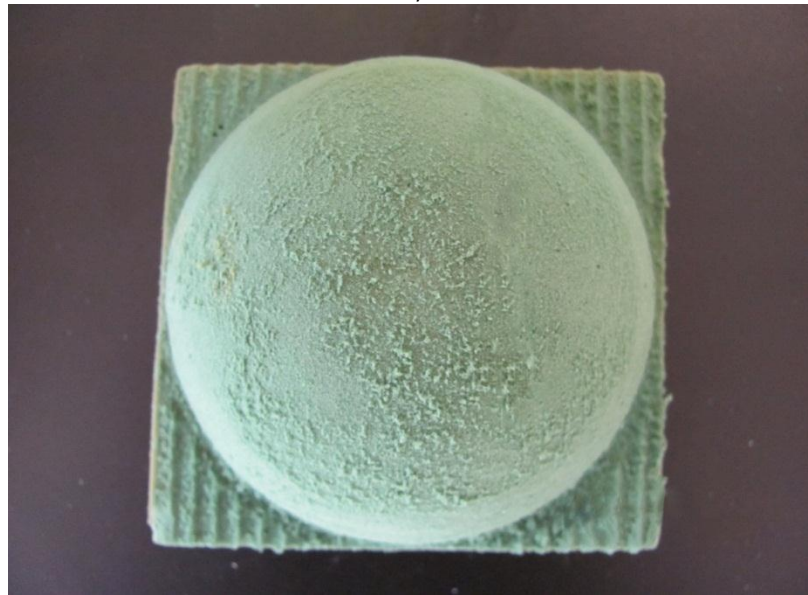
b)

Figura 28. Chave inglesa. a) CAD, b) Real

Finalmente, na usinagem da semi-esfera foram utilizados dois tipos de acabamento concluindo assim que o robô seria capaz de usinar peças de maior complexidade com um melhor acabamento, e realmente observando a Figura 29 foi possível concluir que o robô é capaz de usinar peças de alta complexidade.



a)



b)

Figura 29. Semi-esfera. a) CAD, b) Real



## 5. Conclusões

Após usinar três peças de complexidade diferente, em espuma de poliuretano, foi possível concluir que o robô tem capacidade de usinar protótipos em materiais de baixa dureza, concluindo assim que o uso de robôs para prototipagem na indústria é uma opção viável.

A usinagem com robô ainda é limitada pela falta de compatibilidade dos *softwares* de CAM com os *softwares* de robô, já que ainda tem muitos comandos da linguagem G que não são reconhecidos pelo robô, dificultando assim o processo de manufatura.

Cada vez mais é possível observar na mídia que a indústria de robôs vende a idéia da aplicação de robôs não só na manipulação de objetos mas em opções que agregam mais valor à indústria, como a usinagem, portanto é uma questão de tempo até que os robôs sejam utilizados na usinagem tanto de protótipos como de peças de alta complexidade ou de grandes dimensões.

## Referências Bibliográficas

1. **ISO.** ISO 8373:1994 - Manipulating industrial robots – Vocabulary. 1994.
2. **Instituto de Robôs da América RIA.** Robot Institute of América.
3. **KUKA Corporation.** Robotic Applications in Wood Industries. s.l. : KUKA Robot Group, 2010.
4. *Application of industrial robot in rapid prototype manufacturing technology.* **Fei, Meng, Haiou, Zhang e Guilan, Wang.** 2010.
5. **KUKA Corporation.** KUKA.CamRob Sistemas Completos de robots para el mecanizado automático CNC. Gersthofen, Alemania : KUKA roboter GMBH, 2006.
6. **Storeteau, Rodrigo Lima.** UFSC - Laboratório de Mecânica de Precisão. [Online] [Citado em: 30 de 10 de 2011.] <http://www.imp.ufsc.br/disciplinas/emc5240/Aula-18-21-U-2007-1-fresamento-fabric-engrenagens.pdf>.
7. **CIMM.** Variáveis e parâmetros de corte. *CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica.* [Online] [http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/4861-variveis-e-parmetros-de-corte#.Tq2GW\\_Qr2so](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/4861-variveis-e-parmetros-de-corte#.Tq2GW_Qr2so).
8. Introdução à prototipagem rápida e seus processos. [Online] 10 de 09 de 2003. <http://www.gorni.eng.br/protrap.html>.
9. Factory of Factories. *RP - Prototipagem Rápida.* [Online] [http://www.fabricadefabricas.com/fof\\_br/rapidprotot\\_br.htm](http://www.fabricadefabricas.com/fof_br/rapidprotot_br.htm).
10. **KUKA Corporation.** KR 5 sixx R650, R850 Specification. Augsburg, Germany : KUKA Robot Group, 20, 2007.
11. —. Kuka CamRob 2.1. s.l. : KUKA Robot Group, 2008.
12. **Bay, Alex.** Chiseled in Stone: KUKA.CAMRob enables the robot to understand CNC data. s.l. : KUKA Roboter GmbH, 2006.

13. **KUKA Corporation.** SL - KUKA.Sim Layout. [Online]

[http://www.kuka.be/main/college/kukasim\\_layout/e\\_kukasim\\_layout.htm](http://www.kuka.be/main/college/kukasim_layout/e_kukasim_layout.htm).

14. **KUKA Corporation.** KUKA.Applications PC.

15. **Vilar, Walter.** Livro Química e Tecnologia dos Poliuretanos. *QUÍMICA E TECNOLOGIA DOS POLIURETANOS*. [Online] <http://www.poliuretanos.com.br/Cap5/51mp.htm>.

## ANEXO I

### Trabalhos Futuros

- Desenvolver uma célula de usinagem que imite as máquinas ferramentas em certos aspectos como o de limpeza e descarte de cavaco, troca de ferramenta, mesa com rasgos T para posicionamento das peças.
- Fazer uma estação de ferramentas e ao invés da luva de alumínio atual um porta-ferramentas pneumático que permita realizar a troca de ferramenta de acordo à usinagem a ser realizada.
- Usinagem de protótipos em diferentes materiais como madeira e nylon para poder fazer medições e análise de tolerância.
- Realizar usinagens utilizando estratégias de 5 eixos no robô e em máquinas CNC para futura comparação das peças obtidas.
- Construir um CLP para controle do fuso e do começo da usinagem. O CLP também pode ser utilizado para aumentar a segurança do processo sendo que este não permitirá começar a usinagem enquanto as portas da célula não estiverem fechadas.