

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM PROJETO E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO - MESTRADO
PROFISSIONAL**

Cristiano Rafael Lopes

**AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE REBARBAMENTO DE PEÇAS
UTILIZANDO UM ROBÔ PNEUMÁTICO**

Passo Fundo

2015

Cristiano Rafael Lopes

**AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE REBARBAMENTO DE PEÇAS
UTILIZANDO UM ROBÔ PNEUMÁTICO**

Orientador: Prof. Dr. Jocarly Patrocínio de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Valdiero

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2015

Cristiano Rafael Lopes

AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE REBARBAMENTO DE PEÇAS UTILIZANDO UM ROBÔ PNEUMÁTICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 21 de agosto de 2015.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Jocarly Patrocínio de Souza, Orientador

Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Antonio Carlos Valdiero, Co-orientador

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ

Professor Doutor Luiz Antônio Rasia

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ

Professor Doutor Fernando Passold

Universidade de Passo Fundo - UPF

*Dedico este trabalho a minha esposa
Diane e a minha filha Gabriela*

AGRADECIMENTOS

Muitas são as pessoas que neste momento merecem meu agradecimento, sem elas não teria chegado aqui, me incentivaram, apoiaram no decorrer do curso do mestrado e por isso merecem um agradecimento de forma especial.

Agradeço a minha esposa Diane, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço. À minha princesinha Gabriela, você também faz parte desta etapa tão preciosa que estou finalizando hoje. Apesar de ainda ser uma criança me incentivou e me apoiou muito ao longo desta minha caminhada.

Ao meu orientador Jocarly pelos ensinamentos, atenção, força e confiança depositados em mim. Quero registrar meu reconhecimento por todas as palavras e pelo apoio, que enriqueceram e formaram o alicerce deste trabalho, em especial as viagens realizadas para visualização da parte prática da pesquisa.

Ao meu coorientador Valdiero pelo valioso tempo cedido, suporte, auxílio, incentivo, durante a realização deste trabalho. Muito do que aprendi e escrevi neste trabalho não teria sido possível sem a sua presença.

À UPF por proporcionar a realização desta dissertação e pela concessão de bolsa de estudos.

À UNIJUI por ceder o espaço para realização da parte prática do meu trabalho.

À toda minha família e particularmente aos meus compadres Márcio e Cristina, que cederam pouso durante as estadias em Passo Fundo no período de aula.

Aos meus pais Luiz e Cladis, vocês foram a base de tudo pra mim, apoiando-me nos momentos difíceis com força, confiança, amor, ensinando-me a persistir nos meus objetivos e ajudando a alcançá-los.

Nesse momento, sintetizo um agradecimento especial aos amigos Marcos, Fernando, Janes, Fabiano, Ricardo, Douglas, Graciano que fizeram parte da construção deste trabalho.

Meus agradecimentos aos estagiários do NIMASS em especial ao Andrey, que contribuíram de forma expressiva no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço à vida que se resume em algo maior, que alguns acreditam ser uma força, outros não conhecem e eu sinto a todo instante que é meu Senhor e meu Deus.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento da aplicação de um robô do tipo Gantry com acionamento pneumático para rebarbamento de arestas de peças oriundas de corte térmico, executado por plasma ou oxicorte. Foram realizadas pesquisas na área de robótica e de rebarbamento para adaptar o protótipo existente no Laboratório de Robótica da UNIJUÍ Câmpus Panambi afim de possibilitar a utilização do mesmo para o lixamento de peças. A programação do robô foi realizada utilizando a ferramenta computacional *Matlab/Simulink*, a qual possibilita a programação em diagrama de blocos. O hardware para aquisição de sinais dos sensores e controle dos atuadores do protótipo é a placa eletrônica DSPACE que trabalha com o software *ControlDesk*, que por sua vez é compatível com o software *Matlab*. Concluídas as adaptações no robô foram realizados alguns testes, inicialmente sem um corpo de prova, para validação da trajetória programada para a realização do processo de rebarbamento. Após pequenos ajustes os testes foram conduzidos já com o corpo de prova e então foram analisados o posicionamento de todas as juntas comparando a posição desejada com a posição realizada e a qualidade da peça rebarbada pelo robô. Percebeu-se um grande potencial da aplicação deste tipo de robô pneumático para tarefas de rebarbamento de peças e com esta aplicação será possível reduzir os tempos e os custos produtivos, melhorar a segurança do processo produtivo e as condições do operador para executar esta atividade.

Palavras-chave: Robô, Acionamento pneumático, Rebarbamento.

ABSTRACT

This work deals with the development of the application of a Gantry robot with pneumatic drive for deburring of parts edges derived from thermal cutting, performed by plasma or oxy cutting. Surveys were conducted in the robotics and deburring field to adapt the existing prototype in the robotics lab of UNIJUI campus Panambi in order to make possible its use for the sanding of parts. The robot programming was performed using the Matlab/Simulink computational tool, which allows the programming in block diagram. The hardware for sensors signals acquiring and control of the prototype's actuators is the DSPACE electronic board that works with the ControlDesk software, which in turn is compatible with the Matlab software. With the adjustments in the robot concluded some tests were carried out, initially with no specimen, for the validation of the programmed trajectory for the execution of the deburring process. After little adjustments the tests were carried out with a specimen and then it was analyzed the positioning of all joints comparing the desired position with the performed position and the quality of the part deburred by the robot. It was perceived a great application potential of this kind of pneumatic robot for parts deburring tasks, and with this application it will be possible to decrease the time and production costs, improve the production process safety and improve the operator conditions to perform this activity.

Keywords: Robot, Pneumatic Drive, deburring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de um robô industrial com 6 graus de liberdade.....	22
Figura 2 – Vista isométrica de um Robô Gantry.....	25
Figura 3 – Vista isométrica de um Robô Cartesiano.....	25
Figura 4 – Vista frontal e superior de um robô de coordenadas cilíndricas	26
Figura 5 – Vista isométrica de um robô de coordenadas esféricas.....	26
Figura 6 – Vista frontal e superior de um robô Scara.....	27
Figura 7 – Vista isométrica de um robô articulado ou antropomórfico.....	27
Figura 8 - Vista isométrica de um Robô paralelo	28
Figura 9 – Gráfico que representa a relação de aplicação de robôs entre setores industriais nos Estados Unidos	29
Figura 10 – Gráfico que representa o percentual de processos industriais executados por robôs nos Estados Unidos.....	30
Figura 11 – Desenho esquemático do robô para lixamento de peças.....	32
Figura 12 – Desenho esquemático de um sistema de referência	33
Figura 13 - Desenho esquemático do corte de uma servoválvula direcional com seus principais	37
Figura 14 - Representação gráfica da não linearidade de zona morta.....	38
Figura 15 – Exemplo de projeto para facilitar o processo de remoção de rebarba.....	41
Figura 16 - Exemplo de minimização de rebarba no processo de fabricação	42
Figura 17 – Desenho que representa a formação de rebarbas em peças usinadas.....	43
Figura 18 – Fotografia de uma peça com rebarbas geradas por um processo de corte mecânico.....	43
Figura 19 - Fotografia de uma peça com rebarbas geradas por um processo de corte térmico.	44
Figura 20 – Fotografia o processo de rebarbamento com disco.....	45
Figura 21 – Fotografia do protótipo do Robô Gantry (Patente requerida)	46
Figura 22 – desenho esquemático do robô com a identificação dos eixos e das juntas.	47
Figura 23 – Desenho do circuito pneumático do robô segundo a ISO 1219.....	47
Figura 24 – Vista isométrica do efetuator final	50
Figura 25 – Fotografia da estação de trabalho.....	51

Figura 26 – Interface do software Control Desk	52
Figura 27 - Vista isométrica ilustrando as melhorias construtivas na junta 3 do robô: projeto antigo (esquerda) e projeto novo (direita).	54
Figura 28 – Fotografia destacando a nova Junta 3 do robô pneumático.	54
Figura 29 – Imagem representativa do volume de trabalho do robô	55
Figura 30 – Vista isométrica do robô com o sistema de referências	56
Figura 31 – Desenho representativo dos pontos da trajetória programada.....	60
Figura 32 – Esquema de controle do robô com compensação de zona morta.....	61
Figura 33 - Esquema da metodologia para compensação de zona morta	63
Figura 34 - Diagrama de blocos do controle do robô implementado no Matlab/Simulink.....	64
Figura 35 – Fotografia de um corpo de prova com rebarba	64
Figura 36 – Fotografia de um corpo de prova fixo no dispositivo do robô.....	65
Figura 37 – Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 1	66
Figura 38 – Gráfico do erro da junta 1	66
Figura 39 Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 2	67
Figura 40 – Gráfico do erro da junta 12	67
Figura 41 - Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 3.....	68
Figura 42 – Gráfico do erro junta 3	68
Figura 43 - Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 1	69
Figura 44 – Gráfico do erro junta 1	70
Figura 45 - Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 2.....	70
Figura 46 – Gráfico do erro junta 2	71
Figura 47 - Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 3.....	71
Figura 48 - Gráfico do erro junta 3.....	72
Figura 49 - Corpo de prova. Esquerda: após o teste. Direita antes do teste	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição técnica dos componentes do acionamento da Junta 1.....	48
Tabela 2 – Descrição técnica dos componentes do acionamento da Junta 2.....	48
Tabela 3 – Descrição técnica dos componentes do acionamento da Junta 3.....	49
Tabela 4 - Parâmetros de Denavit-Hartenberg	57
Tabela 5 – Faixa de variação das juntas do robô.....	57
Tabela 6 - Coordenadas do seguimento de trajetória do manipulador robótico.....	61
Tabela 7 – Parâmetros do controlador do manipulador robótico	63
Tabela 8 – Tabela comparativa dos erros máximos de posicionamento	73

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
INTRODUÇÃO	15
1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	17
1.1 Justificativa.....	18
1.2 Objetivo geral	19
1.3 Objetivos específicos.....	19
1.4 Organização do trabalho.....	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 Descrição de um Robô industrial	21
2.1.1 Componentes de um robô industrial	21
2.1.2 Tipologia segundo a cadeia cinemática.....	24
2.1.3 Aplicação na indústria.....	28
2.2 Modelagem cinemática de um robô serial.....	32
2.2.1 Cinemática direta	32
2.3 Modelagem dinâmica de um robô	35
2.4 Controladores clássicos	39
2.5 Processo de rebarbamento	40
2.5.1 Características típicas da rebarba	42
2.5.2 Classificação do processo de rebarbamento.....	44
3. SISTEMA PARA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	46
3.1 Mecanismo e acionamento do manipulador.....	46
3.1.1 Especificação técnica da Junta 1	48
3.1.2 Especificação técnica da Junta 2	48

3.1.3	Especificação técnica da Junta 3	49
3.1.4	Efetuator Final.....	50
3.2	Sistema de controle e aquisição de sinais.....	50
3.3	Desenvolvimento de melhorias construtivas no protótipo	52
3.4	Volume de trabalho do robô.....	55
3.5	Modelagem cinemática do robô Gantry	55
3.5.1	Parâmetros de Denavit-Hartenberg	56
3.5.2	Matriz de transformação homogênea	57
3.5.3	Cinemática direta	58
3.5.4	Cinemática Inversa.....	59
4.	TESTES EXPERIMENTAIS.....	60
4.1	Planejamento de trajetória para os testes.....	60
4.2	Descrição do esquema de controle e o ajuste de ganhos do controlador	61
4.3	Descrição do Corpo de prova	64
4.4	Resultados do ensaio sem contato da ferramenta com a peça.....	65
4.5	Resultados do ensaio com contato da ferramenta com a peça	69
4.6	Análise dos resultados	72
	CONCLUSÃO.....	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	ANEXO A – CATÁLOGO CILINDRO DO EIXO 1.....	82
	ANEXO B – CATÁLOGO TRANSDUTOR DE POSIÇÃO DO EIXO 1 E 2.....	83
	ANEXO C – CATÁLOGO VÁLVULA DIRECIONAL DO EIXO 1, 2 E 3.....	84
	ANEXO D – CATÁLOGO CILINDRO DO EIXO 2.....	85
	ANEXO E – CATÁLOGO CILINDRO DO EIXO 3.....	86
	ANEXO F – CATÁLOGO TRANSDUTOR DE POSIÇÃO EIXO 3.....	87
	ANEXO G – CATÁLOGO TRANSDUTOR PROPORCIONAL DE PRESSÃO	88
	ANEXO H – SENSOR DE PRESSÃO.....	89

INTRODUÇÃO

Todo produto necessita de uma ou mais operações de acabamento durante sua fabricação. Estas operações são, na maioria das vezes, executadas manualmente, o que pode aumentar consideravelmente os custos de produção e o tempo necessário para sua fabricação. Desta maneira, está em constante crescimento a utilização de robôs industriais para realizar estas tarefas de acabamento (BOGUE, 2009; BLOSS, 2010).

Um processo que pode ser necessário no acabamento de uma peça é o processo de rebarbamento. As rebarbas podem ser geradas em diversos processos produtivos, como estampagem, usinagem, fundição, entre outros. A remoção de rebarbas em materiais de alta resistência e com características que dificultam o acesso podem tornar esta tarefa inviável. (BLOSS, 2010)

Um dos processos que geram rebarbas em excesso é o corte de chapas metálicas executado por plasma ou oxicorte, onde pode ser observada sua presença em todo o contorno da peça. Estas rebarbas devem ser removidas, pois é um material com baixas propriedades mecânicas e interferem em processos posteriores para confecção dos componentes.

O rebarbamento também é importante por eliminar riscos de lesões ao manipular peças. No entanto este processo, muitas vezes, gera ruídos em excesso, poeira e vibração, o que pode ser danoso para os trabalhadores humanos. Além disso, é uma tarefa manual demorada e repetitiva com alto custo de produção (SONG, 2013).

Como a variedade de peças é grande, tanto no formato, como na espessura, a forma mais adequada de automatizar este processo é utilizando um robô industrial. Atualmente os robôs com servomotor, que correspondem à maioria dos robôs utilizados na indústria, possuem uma limitação, por existir contato neste processo e por ser constituído de juntas serem rígidas. Devido esta característica de processo, um robô com acionamento pneumático é o mais indicado, utilizando a característica de compressibilidade do ar para facilitar o contato.

A pneumática vem ocupando um lugar importante na área de automação, devido a seu baixo custo, facilidade de instalação, abundância de ar em ambientes sob condições normais, facilidade de transporte através de tubulações, facilidade de armazenamento em reservatórios

por serem compressíveis, boa relação entre força e tamanho dos componentes, além de matéria-prima não poluente. Entretanto, existe uma dificuldade de controle de posição de atuadores pneumáticos devido à compressibilidade do ar. Este problema aumenta em velocidades baixas, quando o funcionamento do sistema passa ser influenciado pelo atrito estático e dinâmico que não permitem um movimento proporcional à liberação do ar pela válvula. Avanços na eletrônica e informática proporcionaram uma melhora no controle de atuadores pneumáticos.

A proposta deste trabalho é utilizar um robô pneumático para automatizar o processo de rebarbamento de chapas metálicas, simular trajetórias do robô, estudar a ferramenta a ser utilizada e realizar a análise de desempenho do robô para executar esta atividade.

1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os custos de mão de obra somado ao fato de que muitas operações de rebarbamento são executadas manualmente e na maioria das vezes em um ambiente com elevado nível de ruído, empoeirado e insalubre, fazem deste processo uma operação cara e ineficiente. Como uma alternativa mais viável, um robô industrial pode ser utilizado para remover rebarbas de forma rápida e mais completa do que métodos manuais (YUNMING *et al.*, 2008).

O processo de rebarbamento tem algumas particularidades com relação a riscos que os trabalhadores estão expostos nos postos de trabalho, como:

- Geração de ruído com possível redução da capacidade auditiva;
- Corpo estranho nos olhos com possível lesão no globo ocular;
- Choque elétrico;
- Contato acidental com o disco em rotação;
- Danos nos pés;
- Rompimento do disco com lesões graves.

Analisando esses riscos pode-se concluir que este processo merece uma atenção especial no sentido de sua automação, visando reduzir ou eliminar os possíveis danos aos trabalhadores que hoje executam esta atividade. Pereira *et al.* (2011) realizaram estudos no setor de acabamento de uma empresa de fundição, o objetivo principal foi verificar as posturas e movimentos inadequados para manusear as lixadeiras e peças fundidas que apresentam riscos à saúde do trabalhador. Como resultado foi constatado que 33% das posturas adotadas no setor eram críticas indicando necessidade de mudança em curto prazo. Já no mercado interno 14% das posturas são claramente prejudiciais à saúde do trabalhador.

As operações de rebarbamento e polimento de uma empresa fabricante de rodas de alumínio, por exemplo, são realizadas manualmente e necessitam de um grande número de operadores. Estas operações são responsáveis por muitas ocorrências de lesões por esforços repetitivos. Devido à flexibilidade dos robôs industriais comparados a máquinas convencionais, esses são mais indicados para este tipo de automação (ABELLE, 2006).

Com o intuito de contribuir na solução de tais inconvenientes, pretende-se desenvolver uma aplicação robótica para executar esta atividade. A proposta consiste em fixar as peças de maneira adequada, através de encaixes em suportes presos em uma mesa, ou por algum tipo de ventosa, e que o manipulador robótico realize os movimentos requeridos pelo processo de rebarbamento, com os avanços, pressão de contato e velocidades controlados.

1.1 Justificativa

A utilização de robôs para a substituição da operação manual de rebarbamento tornou-se de extrema importância devido ao alto custo de operação para determinadas peças da indústria. De uma forma geral, pode-se dizer que a operação de rebarbamento é destinada a remoção das rebarbas das bordas das peças garantindo que a dimensão final da peça fique dentro da tolerância do projeto.

Ao conduzir a ferramenta de remoção para executar a tarefa de rebarbamento, os robôs devem implementar dois movimentos principais: um para aplicar a força adequada para lixar a borda da peça para remover as rebarbas e o outro é para executar um movimento de contorno, para garantir que a ferramenta de corte mantenha contato com todas as rebarbas que se formam nas arestas da peça (LEE, 1999). Por este motivo pretende-se utilizar um robô Gantry com acionamento pneumático para executar esta tarefa, pois ele possui a vantagem da possibilidade de controle de força e posição sem a necessidade de sensores de força de alto custo, pois é possível obter a força do cilindro pela multiplicação da área transversal interna de sua câmara pela pressão na câmara. Assim, ao controlar a pressão na câmara, consegue-se determinar a força pneumática do cilindro, e conseqüentemente estimar a força de contato entre a ferramenta e a peça a ser rebarbada.

Além da facilidade da estimativa da força, os robôs com acionamento pneumático, são sistemas muito atrativos para diversas aplicações porque eles têm a vantagem de baixo custo, leveza, durabilidade e são limpos quando comparados com os atuadores hidráulicos. Também possuem facilidade de manutenção, têm boa relação força/tamanho e flexibilidade de instalação, e além disso, o ar comprimido está disponível na maioria das instalações industriais (BOBROW *et al.*, 1998; WEICKGENANNT *et al.*, 2010).

Segundo Hsu (1999), outras dificuldades enfrentadas na robotização do processo de rebarbamento é devido aos problemas de menor rigidez mecânica e o complexo processo de rebarbamento. Para minimizar estes efeitos, neste trabalho será utilizado o protótipo de um robô pneumático Gantry para realização dos testes experimentais. Segundo Rosário (2005), este tipo de robô possui elevado grau de rigidez mecânica e facilidade de localização do efetuador final. Seu controle é simples devido ao desacoplamento cinemático, ou seja em razão do movimento linear das juntas que são ortogonais entre si.

1.2 Objetivo geral

Pesquisar e desenvolver uma solução robotizada com acionamento pneumático para o processo de rebarbamento de chapas metálicas que propiciem a humanização do trabalho, aumento da produtividade e da qualidade do produto acabado.

1.3 Objetivos específicos

- Avaliar as necessidades do processo de rebarbamento e estimar os parâmetros do processo para força e velocidade de rebarbamento;
- Adaptar o protótipo disponível de manipulador robótico acionado pneumaticamente para as necessidades do processo de rebarbamento, desenvolvendo melhorias no projeto existente no NIMASS (Núcleo de Inovação em Máquinas Automáticas e Servo Sistemas) da UNIJUÍ;
- Desenvolver a modelagem cinemática do robô para rebarbamento, inclusive a cinemática inversa e a cinemática diferencial;
- Pesquisar e realizar o planejamento da trajetória adequada ao processo de rebarbamento;
- Implementar a modelagem no protótipo e realizar os testes;

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em 4 capítulos da seguinte forma:

- No Capítulo 2 apresenta-se o embasamento teórico referente à robótica industrial detalhando os tipos de robô existentes no mercado e ao processo de rebarbamento, assim como as características do processo e os tipos de rebarba.
- A bancada utilizada para a realização da parte experimental do trabalho é apresentada no Capítulo 3, onde encontra-se um detalhamento das adaptações realizadas no robô para a aplicação do processo de rebarbamento;
- Os testes realizados são descritos no capítulo 4, juntamente com gráficos e ilustrações que auxiliam na visualização dos resultados obtidos para a tarefa proposta;
- A seguir são apresentadas as conclusões e perspectivas futuras do presente trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Descrição de um Robô industrial

São diversos os conceitos atribuídos ao termo “robô industrial”. Os conceitos que mais se enquadram neste estudo são os apresentados pela:

- *Robotic Industries Association* (RIA) - que define um robô industrial como um manipulador multifuncional reprogramável, projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais, através de diversos movimentos programados, para o desempenho de uma variedade de tarefas (ROBOTICS INDUSTRIES, 2014);
- Norma ISO - que define o robô como uma máquina manipuladora, com vários graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para a utilização em aplicações de automação industrial (ISO 10218-1).

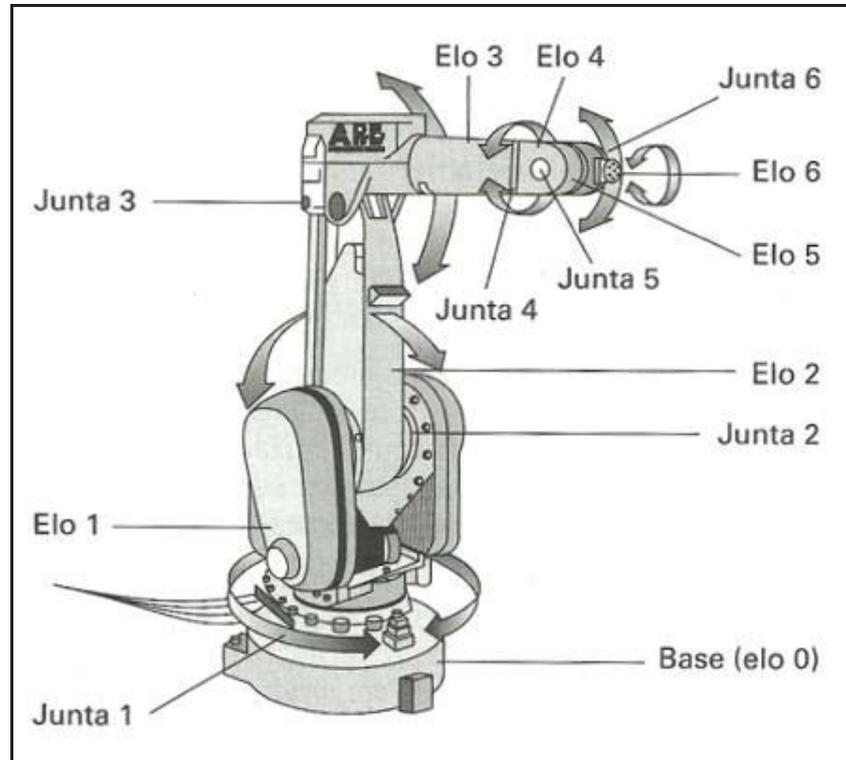
Estas duas definições mostram que um robô é composto pela ligação, ou integração de diversos componentes, tanto mecânicos como elétricos e eletrônicos.

2.1.1 Componentes de um robô industrial

Geralmente um robô industrial possui seis graus de liberdade, onde os três primeiros são responsáveis pelo posicionamento e os três últimos estão relacionados com a orientação do efetuador final no espaço de trabalho. Como principais componentes podem-se citar o manipulador mecânico, os atuadores, os sensores e a unidade de controle, unidade de potência e efetuador final.

O manipulador mecânico refere-se principalmente à estrutura do robô, esta estrutura é articulada e definirá a forma de movimentação do robô no seu espaço de trabalho. A Figura 1 ilustra um manipulador mecânico e seus principais componentes.

Figura 1 – Exemplo de um robô industrial com 6 graus de liberdade.



Fonte: Romano (2002)

Como pode-se observar na Figura 1, um robô é formado pela combinação de elementos estruturais rígidos (elos), ligados entre si através das articulações (juntas) e de um sistema de transmissão. O primeiro elemento do robô é denominado base e o último como extremidade terminal, onde será fixado o efetuator final.

- Base: é a base de sustentação do manipulador;
- Elos: são elementos rígidos que fazem parte do manipulador articulado. São elementos que fornecem robustez e rigidez;
- Juntas: são dispositivos que proporcionam mobilidade entre os elos do manipulador. São elementos de ligação de um par cinemático formado por dois elos adjacentes. Geralmente, em robótica são utilizados dois tipos de juntas: prismáticas (movimento linear) e rotativas (movimento angular). O número de juntas equivale ao número de graus de liberdade.

- Sistema de transmissão: A principal função deste sistema é transmitir a potência mecânica da fonte até o efetuator final, ou seja a potência mecânica gerada pelos atuadores é enviada aos elos para que se movimentem.

Os atuadores são elementos que convertem energia elétrica, hidráulica e pneumática em energia mecânica, eles fornecem a força motriz para o robô e podem ser classificados em três tipos:

Atuadores elétricos – a maioria dos atuadores empregados em robôs industriais são elétricos (rotacionais e lineares). A principal característica desses atuadores é a facilidade de implementar sistemas e estratégias de controle devido ao seu comportamento dinâmico ser aproximadamente linear.

Atuadores hidráulicos – segundo Valdiero (2012), estes tipos de atuadores se caracterizam pela grande capacidade de força e alta razão de potência para peso. O controle de potência é realizado através de servoválvulas controladas pelo circuito elétrico de baixa potência. A fonte de potência para circuitos hidráulicos é volumosa e com baixa eficiência e o custo de servoválvulas com tempo de resposta pequeno é alto.

Atuadores pneumáticos – De acordo com Weickgenannt *et al.* (2010) cilindros pneumáticos são usados em muitas aplicações devido às várias vantagens com peso leve, custo baixo de aquisição, durabilidade, robustez, e mecânica simplificada. A maior desvantagem de atuadores pneumáticos lineares é a existência de não linearidades, devido à compressibilidade do ar pressurizado, a característica do fluxo da servoválvula e as forças de atrito elevadas causada pelo anel de vedação do cilindro.

Segundo Rosário (2005) um sensor pode ser definido como um transdutor que altera a sua característica física interna devido a um fenômeno físico externo, presença ou não de luz, som, gás, campo elétrico, etc. Nos robôs eles irão fornecer parâmetros sobre o comportamento do manipulador, em termos de posição e velocidade dos elos em função do tempo e do modo de interação entre o robô e o ambiente operativo, ou seja, força, torque, sistema de visão para a unidade de controle.

A unidade de controle é um sistema constituído de um processador que recebe os sinais dos sensores e os transforma em dados executando o algoritmo de controle e envia os sinais para acionamento dos atuadores.

A unidade de potência é responsável pelo fornecimento de energia para os atuadores do manipulador. No caso dos atuadores hidráulicos a unidade de potência pode ser uma bomba hidráulica e para os atuadores pneumáticos pode ser um compressor com unidade de condicionamento de ar, como no caso do robô utilizado neste trabalho. Para os motores elétricos a unidade de potência pode ser uma fonte de corrente alternada ou fonte de corrente contínua.

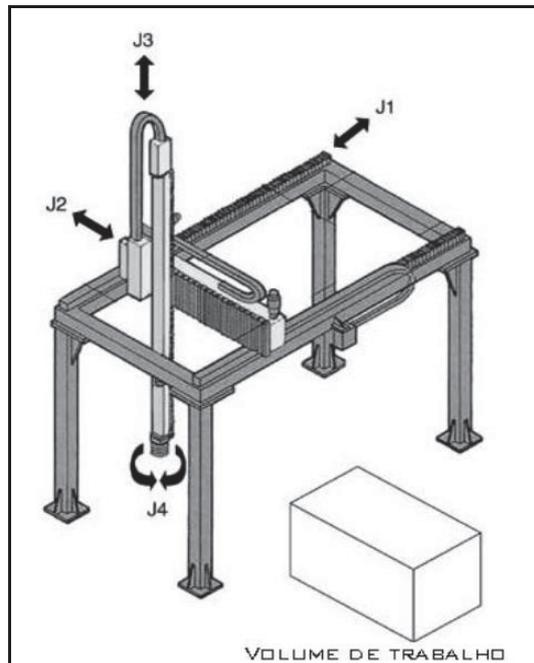
O efetuator final, por sua vez, são elementos acoplados no último elo do robô, que permitem a ligação do robô com o meio que o cerca. Podem ser uma garra ou uma ferramenta, depende da aplicação do robô.

2.1.2 Tipologia segundo a cadeia cinemática

Existem vários tipos de classificação de robôs industriais, disponíveis na bibliografia, quanto à estrutura mecânica, quanto à geração tecnológica, quanto à participação do operador, etc. Esta pesquisa restringe-se apenas a classificação quanto à estrutura mecânica, pois esta é a que usualmente define a nomenclatura dos robôs.

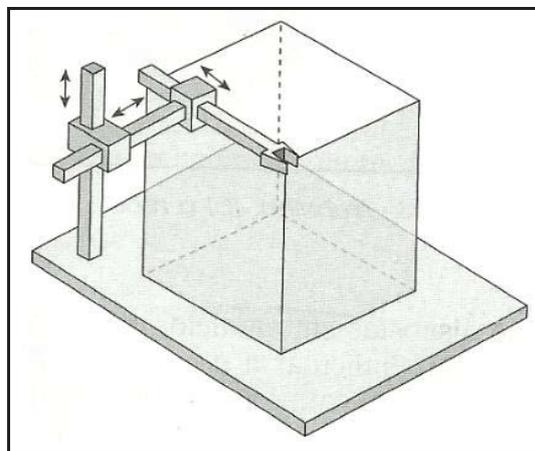
Robô cartesiano ou Gantry – este robô possui três juntas prismáticas, que geralmente estão perpendiculares entre si, resultando num movimento composto de três translações, cujos eixos de movimentação correspondem a um sistema de coordenadas de referência cartesiano. O volume de trabalho gerado é um paralelepípedo, conforme pode ser observado na Figura 2 um exemplo de robô Gantry e na Figura 3 um exemplo de robô cartesiano.

Figura 2 – Vista isométrica de um Robô Gantry.



Fonte: Menuzzi *et al* (2010).

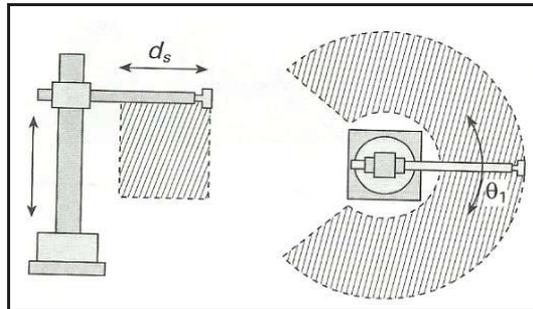
Figura 3 – Vista isométrica de um Robô Cartesiano.



Fonte: Romano (2002).

Robô de coordenadas cilíndricas - Este tipo de robô é formado por duas juntas prismáticas e uma rotativa, resultando em dois movimentos de translação e um de rotação. Os eixos de movimento podem ser descritos no sistema de coordenadas de referência cilíndrica. O volume de trabalho gerado é cilíndrico, conforme pode ser observado na Figura 4.

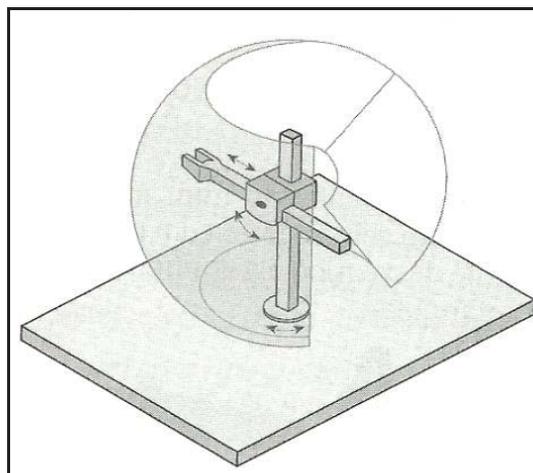
Figura 4 – Vista frontal e superior de um robô de coordenadas cilíndricas



Fonte: Romano (2002).

Robô de coordenadas esféricas - Este robô possui duas juntas rotativas e uma prismática, resultando em dois movimentos de rotação e um de translação, formando um sistema de coordenadas de referência polar. O volume de trabalho gerado é semelhante a uma esfera, como mostra a Figura 5.

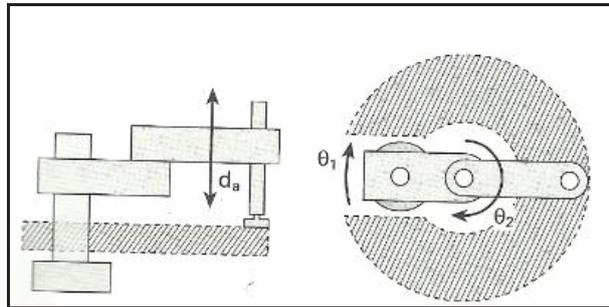
Figura 5 – Vista isométrica de um robô de coordenadas esféricas



Fonte: Romano (2002).

Robô Scara - Esta configuração apresenta duas juntas rotativas dispostas em paralelo, que possibilita a movimentação num plano e uma junta prismática perpendicular a este plano, resultando em uma translação e duas rotações. O nome Scara vem do inglês *Selective Compliance Assembly Robot Arm*. O volume de trabalho gerado por este tipo de robô é aproximadamente cilíndrico, como mostra a Figura 6.

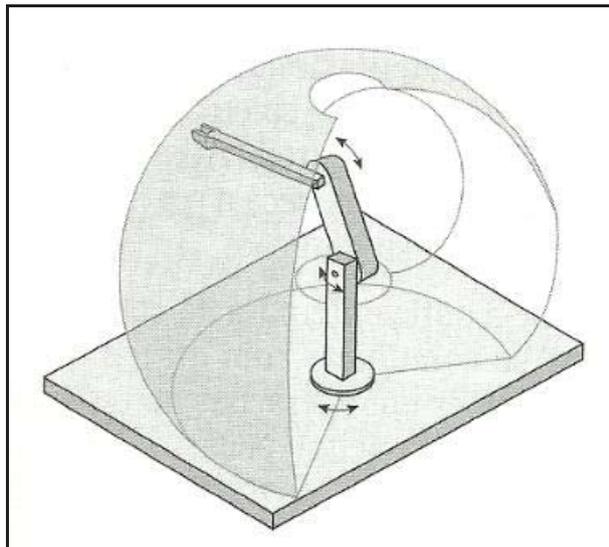
Figura 6 – Vista frontal e superior de um robô Scara.



Fonte: Romano (2002).

Robô articulado ou antropomórfico - É o robô mais utilizado na indústria, é composto pelo menos três juntas rotativas, o que facilita a mobilidade, flexibilidade e habilidade de posicionamento, conforme pode ser observado na Figura 7.

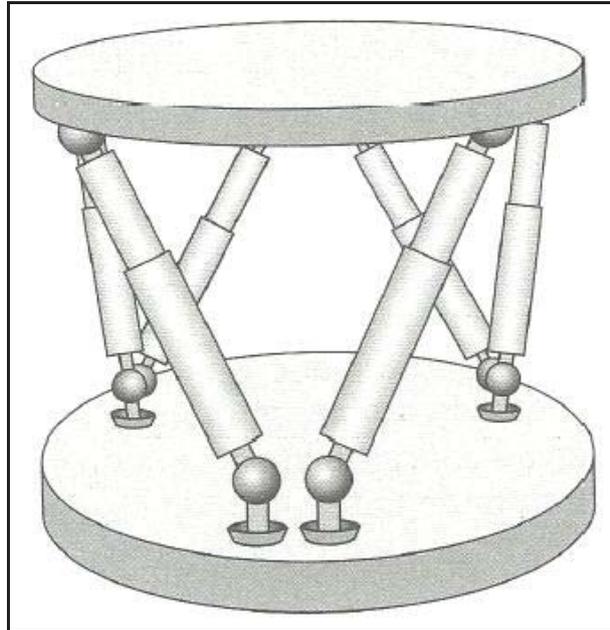
Figura 7 – Vista isométrica de um robô articulado ou antropomórfico



Fonte: Romano (2002).

Robô paralelo – possui configuração tipo plataforma e mecanismos no formato de cadeia cinemática fechada, como mostra a Figura 8. O volume de trabalho resultante é aproximadamente semiesférico.

Figura 8 - Vista isométrica de um Robô paralelo



Fonte: Romano (2002).

Neste trabalho será utilizado o protótipo de um robô Gantry com acionamento pneumático com três graus de liberdade. Este tipo de robô é muito empregado em diversas áreas da indústria, sendo bastante usado na manipulação de cargas, nas máquinas de corte a laser e na usinagem CNC (*Computer Numeric Control*).

Os robôs cartesianos estão presentes na indústria para posicionamento de objetos em posições estratégicas em um sistema de coordenadas espaciais, onde o manuseio e o posicionamento de peças em algum posto de trabalho são exigidos com rapidez e precisão. Como há uma crescente demanda de equipamentos de automação e controle de sistemas em ambientes, técnicas de controle para robôs cartesianos pneumáticos vêm sendo objeto frequente de estudos, pois são capazes de operar com rapidez, além de possuírem as vantagens de qualquer sistema pneumático.

2.1.3 Aplicação na indústria

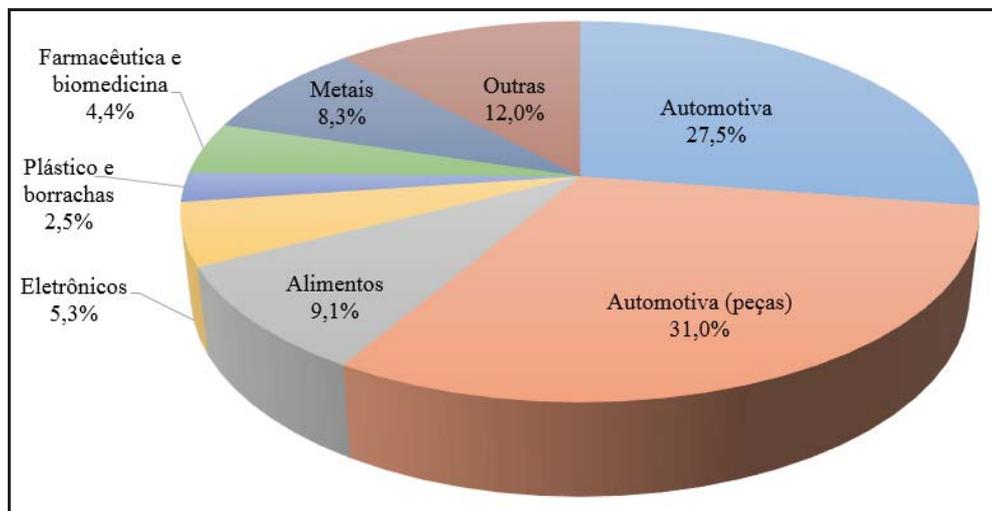
Os robôs estão cada vez mais inseridos no ambiente fabril, desde a área de micro robô para o setor medicinal, que está em constante pesquisa e cada vez mais em utilização, até a área automotiva que possui robôs de maior porte. A aplicação de robô na medicina causa

redução no trauma dos pacientes e também possibilitam acesso a áreas não acessíveis aos seres humanos como artérias do crânio (BOGUE, 2008).

A indústria alimentícia também está na luta constante para redução dos custos produtivos devido aos altos níveis de concorrência, portanto estão à procura cada vez mais de automação e robotização de seus processos produtivos (MASEY, 2010).

Na indústria automotiva é onde está mais difundida a utilização de robôs no processo produtivo, como pode ser observado na Figura 9. A aplicação destes equipamentos em processos de soldagem e montagem já apresentaram excelentes resultados, permitindo também uma redução na força de trabalho.

Figura 9 – Gráfico que representa a relação de aplicação de robôs entre setores industriais nos Estados Unidos

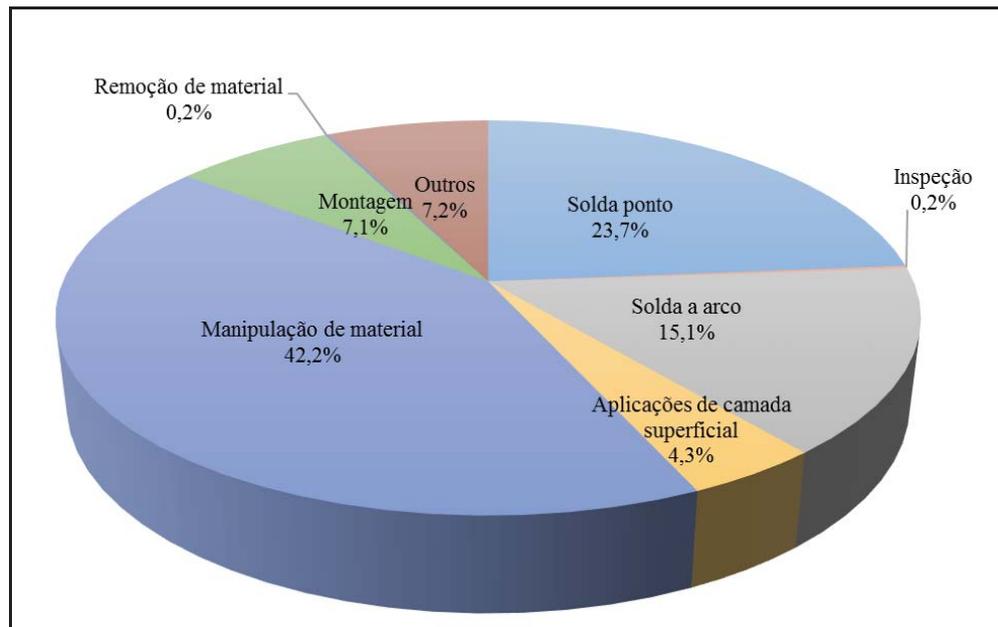


Fonte: Robotics Industries (2014).

As aplicações de robô na indústria são das mais variadas formas e dependem de suas características operacionais, como: configuração, desempenho indicado nos catálogos de fabricantes e das tarefas planejadas a serem realizadas. Para cada tarefa, é utilizado diferentes ferramentas, escolhidas especificamente para promover a correta interação entre a extremidade terminal do manipulador mecânico e o objeto a ser trabalhado.

A maioria das atividades relacionadas a robôs industriais em processos de produção envolvem operações de movimentação, processamento e controle de qualidade, conforme ilustra a Figura 10.

Figura 10 – Gráfico que representa o percentual de processos industriais executados por robôs nos Estados Unidos



Fonte: Robotics Industries (2014).

Analisando o gráfico mostrado na Figura 10 e considerando que em processos de aplicações de material em superfícies e de manipulação de materiais não se exige altos níveis de precisão, conclui-se que cerca de 46,5 % dos processos não necessitam altos níveis de precisão, abrindo uma grande aplicação de robôs pneumáticos para estes tipos de processos.

Em relação ao ponto de vista da interação com o meio, as aplicações robóticas podem ser divididas em duas categorias de acordo com Gorinevsky *apud* Cruz (2010, p. 34):

- As que se caracterizam por uma interação fraca com o meio, para as quais é suficiente controlar o movimento do efetador do robô, fazendo-o seguir uma trajetória pré-estabelecida, caso típico da pintura e soldagem;
- As que apresentam significativa interação com o meio, caso típico das operações de usinagem, que demandam, além do controle do movimento, o controle

das forças e momentos gerados sobre o robô, em consequência das restrições ao movimento impostas pelo meio.

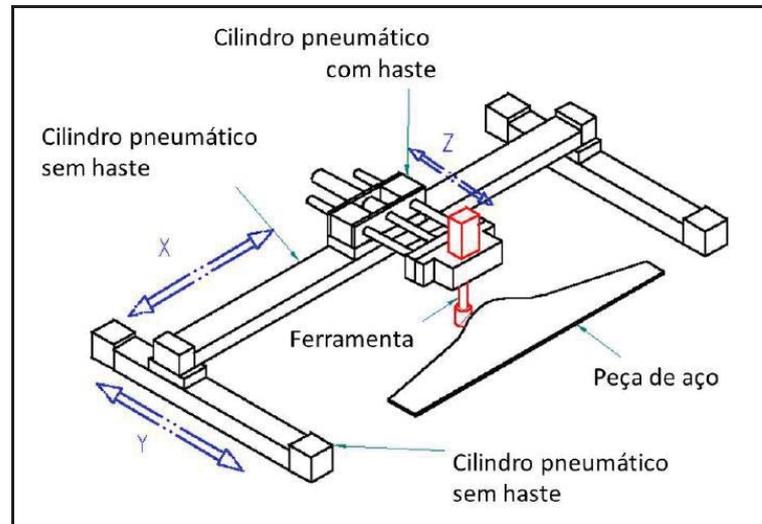
Atualmente a maioria dos robôs é empregado em operações que se enquadram na primeira categoria de aplicação, ou seja, em aplicações que não impõem restrições ao movimento de seus efetadores. Na presença de restrições, provenientes da interação do robô com o meio, como nas tarefas de usinagem, seu emprego é bem reduzido, decorrente das limitações científico-tecnológicas ainda existentes. Este estudo se enquadra na segunda categoria, o robô aplicará uma força para realizar a remoção de material e executar o rebarbamento da peça.

Cruz (2010) apresenta um estudo para aplicação de um robô em processos de usinagem, onde um modelo matemático, representativo das forças de interação que se manifestam no robô e o meio, que, trabalhando em conjunto com algumas estratégias de controle pré-selecionadas, garanta o cumprimento da tarefa requisitada. Ambas as metodologias de controle testadas se mostraram eficazes na realização dos testes que lhes foram impostos. Entretanto, estes modelos não aparentam ser robustos a alterações nas condições de trabalho.

Pires *et al.* (2002), fez um estudo para utilização de sensor de força em robôs industriais na tarefa de rebarbamento de peças fundidas em moldes de areia. Para a execução dos testes o robô era programado para seguir a superfície da peça a rebarbar, a velocidade era alterada caso a caso, dependendo da peça, mas ela era controlada e mantida constante. A força perpendicular à superfície da peça era controlada e ajustada no valor de 35 N.

Raoufi *et al.* (2005), avaliaram experimentalmente a habilidade de um robô Gantry pneumático para esmerilhar as arestas de peças de aço, cujo desenho esquemático do robô é mostrado na Figura 11. Foi constatado que a qualidade da superfície da peça lixada melhorou com a aplicação do robô. A aplicação da força ficou regulada em 30 ± 5 N. O melhor desempenho obtido foi quando a força aplicada foi controlada por um sistema de controle PID com um circuito pneumático utilizando uma válvula proporcional para acionamento dos atuadores. Eles afirmam que havia um índice de rejeição de peças lixadas manualmente de 10% e com a robotização deste processo conseguiram reduzir o índice a 2%.

Figura 11 – Desenho esquemático do robô para lixamento de peças



Fonte: Adaptado de Raoufi *et al* (2005).

Samhour *et al.* (2005) apresenta um estudo para o controle de um robô pneumático Gantry para lixamento de arestas de peças metálicas utilizando um sistema neuro-fuzzy adaptativo para sintonizar on-line um controlador PID, modelando os ganhos do controlador e os dados de saída. Neste trabalho foram alcançados resultados experimentais que chegaram a 95 % de precisão.

2.2 Modelagem cinemática de um robô serial

2.2.1 Cinemática direta

Cinemática é a ciência que estuda o movimento do mecanismo sem considerar as forças que o causam. O estudo da cinemática de manipuladores robóticos refere-se a todas as propriedades dos movimentos que sejam geométricas e baseadas no tempo, como a posição, velocidade, aceleração.

A maioria dos robôs industriais possui uma configuração estrutural em cadeia cinemática aberta, isto é, são constituídos por um conjunto de elos rígidos ligados em série através de juntas rotativas ou prismáticas. O modelo cinemático, no caso geral, pode ser representado pela equação (1) de acordo com Craig (2012).

$$X = f(q) \quad (1a) \quad q = f^{-1}(X) \quad (1b)$$

Onde:

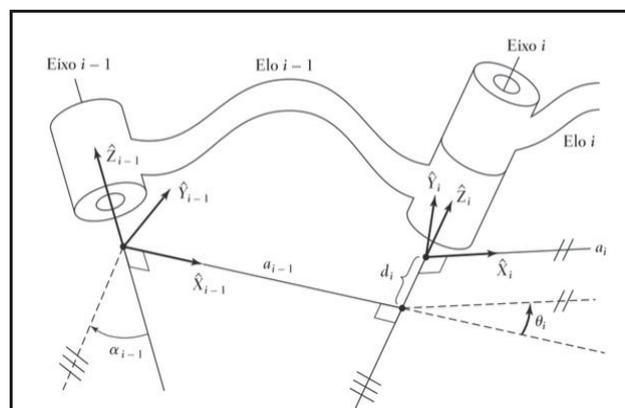
- X (símbolo de pertence)
- R_m representa um vetor de coordenadas no espaço operacional,
- q (símbolo de pertence)
- R_n representa um vetor no espaço de juntas
- f é uma aplicação não linear de $R_n \rightarrow R_m$,
- n indica o número de graus de liberdade do robô
- m é a dimensão do espaço dimensional.

Assim, ao contrário do modelo cinemático direto (equação 1a), o modelo cinemático inverso (equação 1b) é complexo e difícil de obter de forma analítica.

Um robô pode ser modelado como um sistema de elos articulados através de juntas no espaço tridimensional. Para definir a posição de dois elos no espaço são necessários pelo menos dois parâmetros a distância e ângulo de torção entre eles. A convenção de Denavit-Hartenberg (DH) é uma ferramenta utilizada para sistematizar a descrição cinemática de sistemas mecânicos articulados com n graus de liberdade.

Com o objetivo de descrever a localização de cada em relação aos seus vizinhos, deve-se ser definido um sistema de referência fixado a cada elo. Os sistemas referência são identificados com mesmo número do elo que estão fixados. A Figura 12 mostra a um sistema de referência $\{i\}$ rigidamente fixo ao elo i .

Figura 12 – Desenho esquemático de um sistema de referência



Fonte: Craig (2012)

A convenção de D-H pode ser dividida em 4 etapas:

1º passo: Escolha dos sistemas de referência dos elos pela convenção de D-H

O objetivo desta etapa é identificar todas as coordenadas de junta do sistema robótico a partir de um eixo referencial, posicionado na base do robô, para posteriormente determinar os parâmetros de Denavit-Hartenberg e os movimentos do manipulador, gerado pelo movimento das juntas.

2º passo definição dos parâmetros de D-H.

Nesta etapa, foram levantados os parâmetros das juntas de acordo com a notação de Denavit-Hartenberg. Para encontrar estes valores deve ser levado em consideração o sistema de referência mencionado anteriormente obedecendo às seguintes regras:

- a_i – é a distância entre os eixos z_{i-1} e z_i na normal comum;
- d_i – é a coordenada medida ao longo do eixo z_{i-1} que representa a posição de x_i em relação a x_{i-1} ;
- α_i – é o ângulo entre z_{i-1} e z_i em torno do x_i ;
- θ_i – é o ângulo entre os eixos x_{i-1} e x_i em torno do eixo z_{i-1} ;

3º passo: cálculo das matrizes de transformação homogênea

Nesta etapa deve-se substituir os parâmetros de D-H na matriz apresentada na equação (2):

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i \cos\alpha_i & \text{sen}\theta_i \text{sen}\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \text{sen}\alpha_i & a_i \text{sen}\theta_i \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

4º passo: Matriz de transformação para o sistema de referência da base: Cinemática Direta.

A partir das matrizes de transformação homogênea que relacionam um sistema de referência em relação ao anterior é possível calcular uma nova matriz de transformação homogênea que relaciona o sistema de referência do efetuador final em relação ao sistema de referência do Elo 0 (base fixa) utilizando-se do produto de matrizes a esquerda como mostra a equação (3).

$$T_3^0 = A_1^0 \cdot A_2^1 \cdot A_3^2 \Rightarrow T_3^0 = (A_1^0 \cdot A_2^1) \cdot A_3^2 \quad (3)$$

2.3 Modelagem dinâmica de um robô

Nesta secção apresenta-se o modelo dinâmico do robô com três graus de liberdade de elos rígidos não considerando a dinâmica do atuador pneumático. O modelo explicitado apresenta a equações que relacionam as forças geradas nas juntas e o movimento da estrutura.

As equações dinâmicas do movimento são obtidas a partir das formulações de *Lagrange* que encontra-se desenvolvidas no trabalho de (SCIAVICCO *et al.*, 1996) que fazem o detalhamento dessas equações.

Ao considerar o robô Gantry com três graus de liberdade e ignorando as forças do efetuador bem como a variabilidade do atrito na estrutura, encontra-se um modelo dinâmico no espaço de juntas por meio da formulação de *Lagrange* e pode ser representado através da equação (4):

$$M(d)\ddot{d} + F_{\text{atrito}} = F \quad (4)$$

Onde:

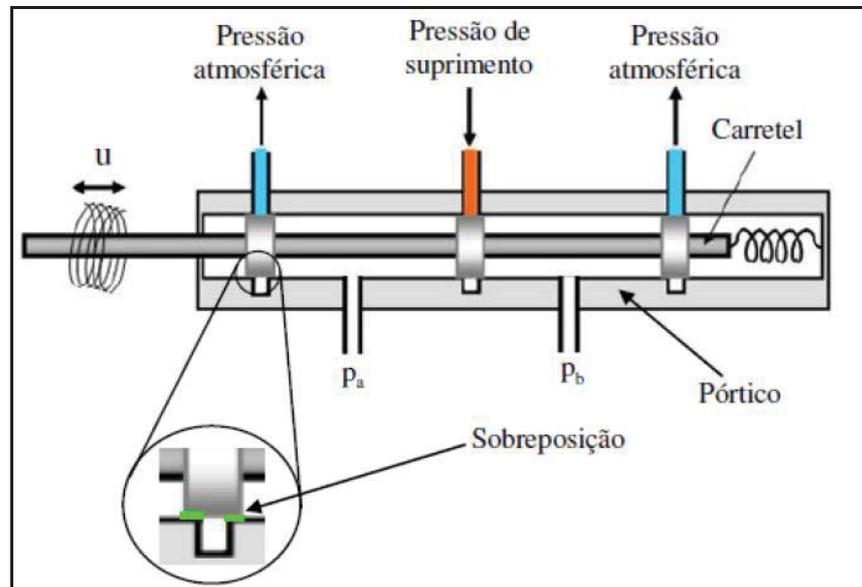
- $d \in R^n$ - é o vetor de coordenadas das juntas;
- $M(d) \in R^{n \times n}$ - é matriz de inércia simétrica;
- F_{atrito} - é a força de atrito presente no manipulador;
- $F \in R^n$ - é o vetor de forças do movimento das juntas;

A modelagem matemática consiste na aquisição de um conjunto de relações matemáticas que descrevem um fenômeno real. Para Valdiero (2012) a dedução do modelo dinâmico de um robô é importante para fins de simulação computacional, de análise de desempenho e de projeto de algoritmos de controle. As simulações computacionais permitem testar estratégias de controle, prevendo problemas de projeto do controlador e/ou do manipulador, sem riscos de acidentes provenientes de instabilidades ou falhas de projeto. Também fornecem informações estimativas de variáveis do sistema, como: velocidades, acelerações, torques e forças, as quais são importantes para a análise da estrutura mecânica do robô e no projeto e especificação de seus componentes. Bobrow *et al.* (1998) enfatiza em seu estudo que a chave para um sistema pneumático de alta performance é um bom modelo matemático.

Segundo Ritter (2010), para que se torne possível a obtenção de um modelo teórico que seja implementável em um algoritmo de simulação ou no projeto de um controlador, alguns efeitos físicos devem ser desprezados ou parcialmente considerados. Os atuadores pneumáticos possuem uma natureza essencialmente não linear, o que torna sua modelagem matemática bastante complexa.

Para este trabalho será realizada a compensação da não linearidade que ocorre devido a uma imperfeição comum em válvulas pneumáticas, conhecida como a zona morta. Ela é causada pela sobreposição do ressalto do carretel da servoválvula no do orifício da passagem do ar comprimido, conforme ilustra a Figura 13, porque a largura do carretel é maior que a abertura da servoválvula.

Figura 13 - Desenho esquemático do corte de uma servoválvula direcional com seus principais



Fonte: Bavaresco (2007)

A Figura 13 percebe-se, esquematicamente e em corte uma servoválvula direcional com seus principais elementos mecânicos. Um sinal de controle u energiza os solenoides da válvula produzindo uma força magnética que é aplicada no carretel da válvula. Quando não existe sinal de controle, as forças provenientes das molas de centragem mantêm o carretel bloqueando os orifícios de passagem do ar.

A zona morta prejudica o desempenho dos controladores de posição, causando atrasos na resposta do sistema, por isso é necessário à identificação e compensação dessa não linearidade para obter bons resultados no controle dos robôs.

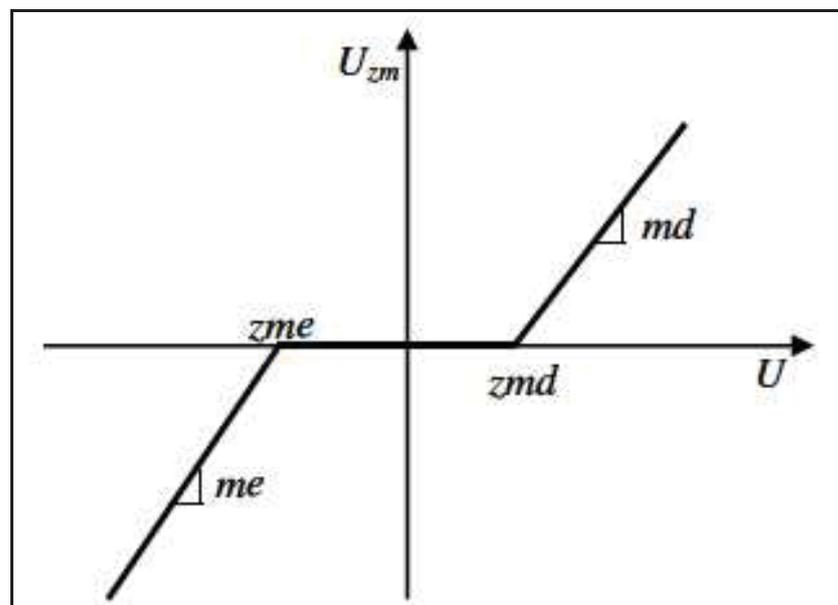
Sendo a zona morta uma relação estática de entrada e saída, em que para uma faixa de domínio não há resposta, ou seja, a saída é nula, apresenta-se um modelo genérico para a zona morta em servoválvulas de controle direcional baseado em Tao *et al.* (1996), pela equação (5):

$$U_{zm}(t) = \begin{cases} md(U_T(t) - zmd) & \text{se } U_T(t) \geq zmd \\ 0 & \text{se } zme < U_T(t) < zmd \\ me(U_T(t) - zme) & \text{se } U_T(t) \leq zme \end{cases} \quad (5)$$

onde $U_T(t)$ é o sinal de entrada, $U_{zm}(t)$ é o valor de saída, zmd é o limite direito da zona morta, zme é o limite esquerdo da zona morta, md é a inclinação direita da zona morta e me é a inclinação esquerda da zona morta.

A Figura 14 mostra a representação gráfica do trecho de zona morta do sinal de entrada $U = U_T$ em relação ao sinal de saída U_{zm} . A identificação da zona morta e como os valores foram utilizados no controle do sistema estão descritos no Capítulo 4.

Figura 14 - Representação gráfica da não linearidade de zona morta



Fonte: Bavaresco (2007)

Para Bavaresco (2007), a modelagem de atuadores pneumáticos é complexa quando comparada a outros tipos de acionamentos, devido a algumas características não lineares, como: alta compressibilidade do ar, comportamento não linear das vazões mássicas nos orifícios da servoválvula e o atrito entre as partes móveis e as vedações do atuador.

Gervini (2014) faz um estudo de uma metodologia baseada no uso de redes neurais para a determinação de modelos matemáticos precisos que possam ser aplicados tanto para a simulação do seu comportamento dinâmico quanto na estrutura de controladores que utilizam estratégias baseadas em modelos. Os resultados dos experimentos foram satisfatórios, onde que o controlador proposto consegue seguir trajetórias de referência com precisão e com relativa robustez a variações na massa da carga.

2.4 Controladores clássicos

Os controles clássicos lineares de posição podem ser do tipo proporcional (P), o proporcional-derivativo (PD), proporcional-integral (PI) e o proporcional-integral-derivativo (PID).

Na estratégia de controle proporcional (P), o sinal de controle (u) do controlador é um sinal diretamente proporcional ao erro de posição ($y - y_d$), que é considerado a diferença algébrica entre a posição medida e a posição desejada, multiplicada por uma constante (k_p), que é considerada o ganho proporcional de acordo com a equação (6).

$$u = k_p(y - y_d) \quad (6)$$

Para diminuir o erro de seguimento da trajetória realizada pelo robô utiliza-se o controle PD, no qual o sinal de controle é a soma das parcelas diretamente proporcionais ao erro de posição e de velocidade do sistema, no qual k_d é o ganho derivativo proporcional à velocidade, derivada do erro em relação ao tempo, é dado pela equação (7).

$$u = k_p(y - y_d) + k_d(\dot{y} - \dot{y}_d) \quad (7)$$

Outra variação do controle proporcional (P) é o controle proporcional-integral (PI), onde a saída é a soma de um sinal diretamente proporcional ao erro de posição com um sinal proporcional a integral do erro, sendo sendo k_i o ganho integral, conforme mostra a equação (8).

$$u = k_p(y - y_d) + k_i \int_0^t (y - y_d) dt \quad (8)$$

Locatelli (2011), faz o controle de posição de um sistema servopneumático com acionamento por válvula direcional on/off de rápida comutação. Foi proposto duas metodologias de controle para o sistema, uma com um controlador PID associado à técnica de modulação por largura de pulso e a outra com um controle por estrutura variável por modos deslizantes, onde obteve melhores resultados do ponto de vista de precisão (menor erro de posicionamento), porém o mesmo apresenta maior comutação da válvula, o que reduz a vida útil.

A literatura mostra diferentes técnicas de controle para utilização em servoposicionadores lineares, entre estas pode-se citar:

- Controle por estrutura variável (sliding Mode Control) estudados por Taher (2014), Weickegannt (2010).
- Controladores híbridos de força e posição apresentados em Cruz (2010) e Bobrow (1998).
- *Generalized Predictive Control* estudado por Vale (2011), que apresenta o projeto de um controlador adaptativo preditivo e de um híbrido para um robô manipulador eletropneumático de três graus de liberdade cartesiano. Ela apresenta também em seu estudo resultados de vários testes com diferentes controladores, onde destacou-se o GPC (*Generalized Predictive Control*) híbrido, que apresentou uma resposta mais condizente com o esperado na maioria dos experimentos.

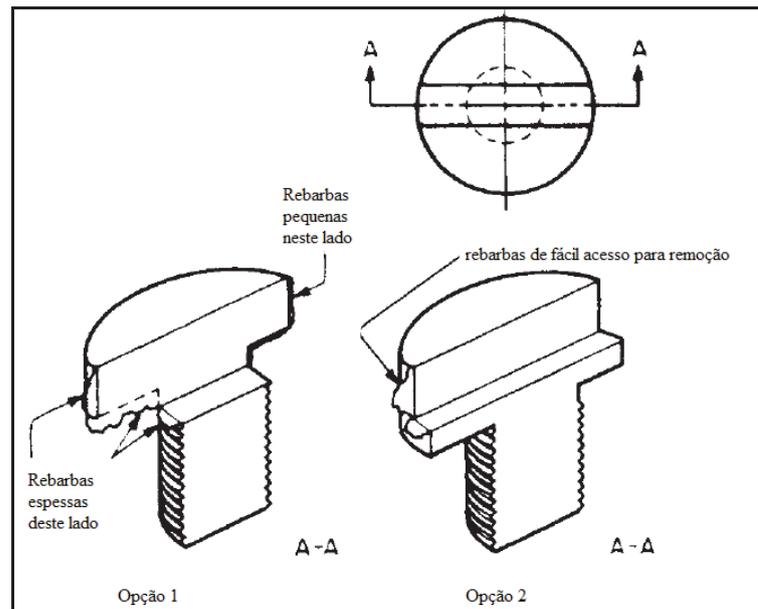
2.5 Processo de rebarbamento

É um processo mecânico de usinagem por abrasão, executado por abrasivo aderido a uma ferramenta e movimentado com pressão contra a peça. É um processo de acabamento de superfície e um dos processos finais de uma peça de trabalho de alta qualidade. No entanto, o processo de rebarbamento gera, na maioria das vezes, ruído excessivo, poeira e vibração, o que pode ser perigoso para trabalhadores. Além disso é um processo demorado e repetitivo, uma tarefa manual intensiva e de baixa produtividade.

Este processo é afetado pelas variações nas propriedades mecânicas da rebarba, observando que geralmente a rebarba possui maior dureza do que o material original e devido a variação da altura da rebarba, que é a principal variável do processo de remoção. Estudos mostram que em processos de rebarbamento manual, o tempo de processo aumenta exponencialmente em relação a espessura da rebarba e a dificuldade de acesso a elas (GRONINGER, 2009).

Segundo Bralla (2004), o projeto da peça pode minimizar os custos de fabricação relacionados ao processo de rebarbamento, pois influencia diretamente no tipo e quantidade de rebarba gerada após um processo de usinagem, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de projeto para facilitar o processo de remoção de rebarba

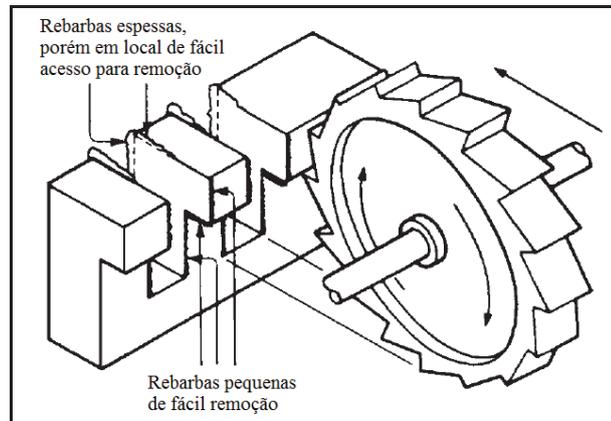


Fonte: Adaptado de Bralla (2004)

Como pode ser observado na Figura 14, a opção 1 apresenta uma pequena alteração de projeto em relação a opção 2, ela possui um rasgo usinado em todo o ressalto da peça, o que acaba trazendo consequências negativas para sua fabricação, pois gera mais rebarbas e elas encontram-se em locais de difícil acesso para remoção com qualquer tipo de ferramenta, mesmo sendo um processo manual.

Bralla 2004, traz também exemplos de métodos de usinagem que acabam influenciando no processo de rebarbamento, como pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Exemplo de minimização de rebarba no processo de fabricação



Fonte: Adaptado de Bralla (2004)

Outro ponto a ser analisado é a variação da forma das rebarbas, pois devido elas serem formadas por vários mecanismos, é possível ter variações dos tipos de rebarbas em uma única peça.

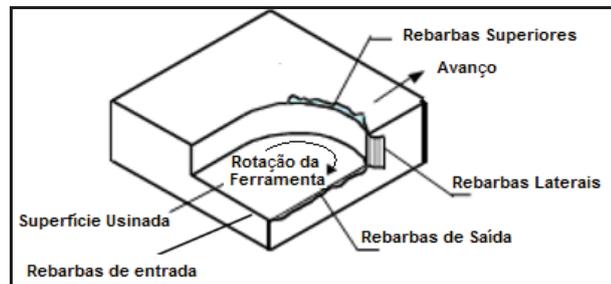
Este processo é de uso comum na indústria, ele pode ser executado de diversas formas com diversas ferramentas de abrasão. Para um processo de lixamento, rebarbamento ou acabamento bem sucedido é necessário a aplicação da força adequada na peça. A aplicação de força insuficiente pode acabar não removendo toda a rebarba e a aplicação de muita força pode acabar danificando a peça ou a ferramenta de trabalho.

Para a robotização do processo de rebarbamento deve ser tomado alguns cuidados, conforme sugere Song (2013), existem dois problemas na automatização deste processo. O primeiro problema é que o efetador deve estar sempre em contato com a extremidade da peça de trabalho e o segundo está na força de contato que deve ser mantida constante, independentemente do tamanho de rebarbas.

2.5.1 Características típicas da rebarba

Yunming *et al.* (2008) definem a rebarba como projeções indesejáveis de materiais além da borda de uma peça devido a deformação plástica durante a usinagem ou imperfeições surgidas durante a fundição. A Figura 17 apresenta rebarbas provenientes do processo de usinagem.

Figura 17 – Desenho que representa a formação de rebarbas em peças usinadas.



Fonte: Yunming et al (2008)

A rebarba é um pedaço de material restante ligado a peça de trabalho que pode ter sido gerada por um processo de usinagem, estampagem ou fundição. A formação de rebarba ao longo da peça compromete a qualidade da superfície e pode reduzir a funcionalidade do produto, pois contribuem para o aparecimento de trincas na peça. O formato da rebarba pode variar significativamente dependendo do processo de fabricação, ela pode estar presente sob a forma de um fio fino na extremidade de uma ferramenta afiada recentemente ou como uma porção levantada de uma superfície (KIM, 2007). A Figura 18 ilustra uma rebarba formada após o processo de corte mecânico, em uma serra convencional.

Figura 18 – Fotografia de uma peça com rebarbas geradas por um processo de corte mecânico.



Fonte: Autor

Existem algumas exceções às características citadas anteriormente, são as peças produzidas em processos de usinagem não tradicionais, tais como, corte laser e corte térmico. A rebarba produzida nestes processos é muito difícil de ser removida em operações manuais, pois acabam exigindo grandes esforços dos operadores. Quando acontece o corte da peça, ocorre a fusão do material no contorno da peça, este material acumula nas arestas e solidifica, formando uma rebarba difícil de ser removida, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Fotografia de uma peça com rebarbas geradas por um processo de corte térmico.



Fonte: Autor

2.5.2 Classificação do processo de rebarbamento

Conforme Alallak (2010), este processo pode ser dividido em dois grupos: método de ação pontual e método de ação superficial.

No método de ação pontual se enquadram os processos que removem as rebarbas sem muito impacto sobre outras partes do componente. Pode-se dizer que a maioria das operações inclusas neste grupo, as ferramentas que executam o processo são conduzidas por um operador:

- Rebarbamento manual, o qual é realizado utilizando ferramentas como escovas, limas e ferramentas de retificação.

- Limas ou lixas rotativas, com ou sem abrasivos. Por exemplo, diferentes tipos de escovas usadas para plainar ou limpar superfícies curvadas, arestas, furos e roscas. A Figura 20 ilustra um processo de rebarbamento executado manualmente por um operador manipulando uma esmerilhadora, que utiliza como ferramenta abrasiva um disco de lixa com aproximadamente 100 mm de diâmetro a uma rotação de cerca de 3000 RPM
- Corte de metal, que seriam métodos utilizando biseladoras e escareadores, que podem ser utilizados combinados a furadeiras.

Figura 20 – Fotografia o processo de rebarbamento com disco



Fonte: Autor

No método de ação superficial se enquadram os processos que removem as rebarbas mas também afetam outras partes da peça. Os exemplos deste tipo de método de rebarbamento são tamboreamento, lapidação, e rebarbamento termoquímico.

3. SISTEMA PARA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o sistema utilizado para o processo proposto de rebarbamento de peças. Ele é composto por um robô cartesiano com acionamento pneumático conforme ilustra a Figura 21, e um microcomputador responsável pelo processamento de dados e interface com o operador, o qual está interligado uma placa de aquisição de sinais de controle DSPACE 1104 responsável pela obtenção dos dados do robô na realização dos testes.

Figura 21 – Fotografia do protótipo do Robô Gantry (Patente requerida)

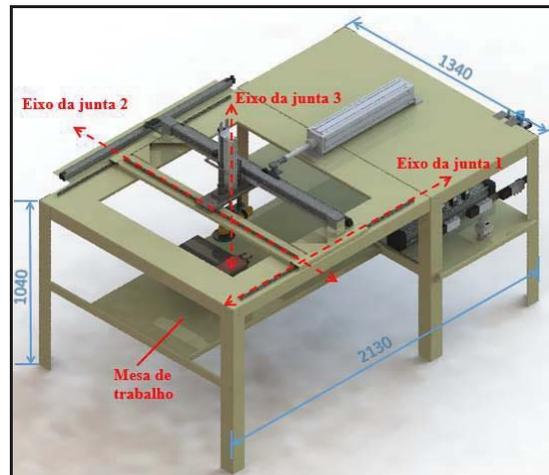


Fonte: Autor

3.1 Mecanismo e acionamento do manipulador

O robô é constituído de uma estrutura metálica rígida com 2130 mm de comprimento, 1340 mm de largura e 1040 mm de altura, uma mesa para fixação de componentes pneumáticos e uma mesa de trabalho. Nesta estrutura são fixadas as três juntas prismáticas formando um ângulo reto entre elas, conforme mostra a Figura 22.

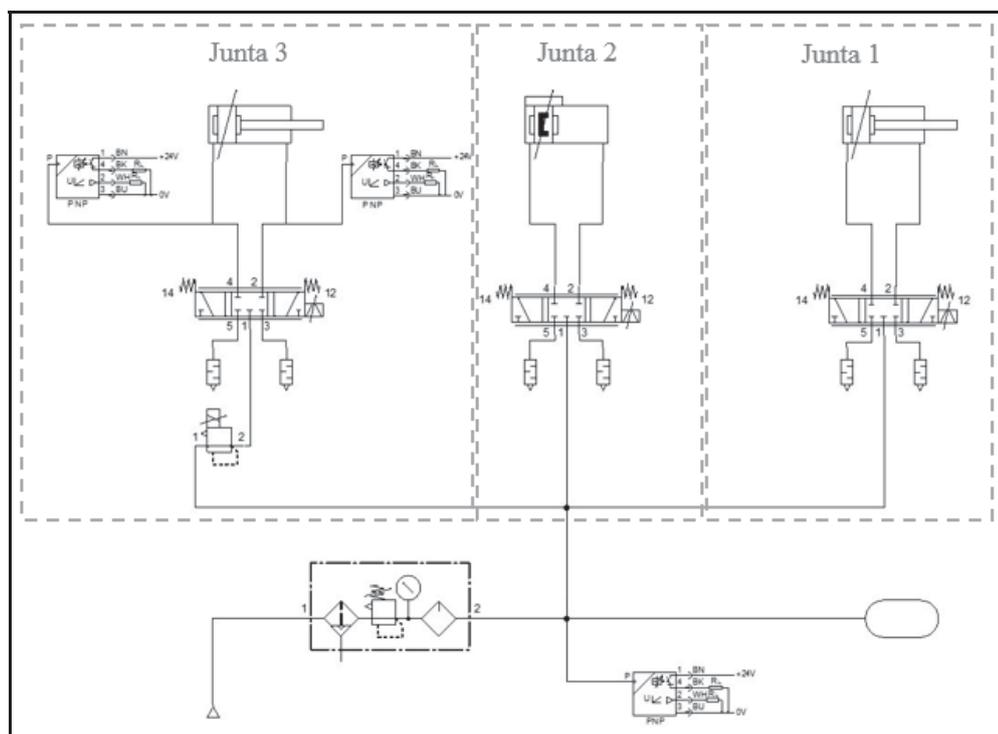
Figura 22 – Desenho esquemático do robô com a identificação dos eixos e das juntas.



Fonte: Autor

Além dos componentes das juntas se faz necessário uma unidade de conservação de ar comprimido, uma unidade de preparação do ar (*lubrifil*), um filtro e um compressor. Cada junta é constituída basicamente de um sensor, uma servoválvula e um cilindro, acionado pneumáticamente, cujo o esquema é mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Desenho do circuito pneumático do robô segundo a ISO 1219



Fonte: Autor

3.1.1 Especificação técnica da Junta 1

A junta 1 do robô é fixa na estrutura metálica através de guias lineares que facilitam a movimentação em altas velocidades, baixo atrito garantido pelo uso de rolamentos e alta rigidez. A Tabela 1 caracteriza os componentes da junta 1, um cilindro pneumático com haste, um sensor de posição e uma servoválvula. Mais informações técnicas referentes aos componentes podem ser observadas no ANEXO A, B e C, respectivamente.

Tabela 1 – Descrição técnica dos componentes do acionamento da Junta 1

Componente	Especificações	Código catálogo	Fabricante
Cilindro pneumático	Curso: 500 mm	DNC-100-500-PPV	FESTO
	Diâmetro: 100 mm		
	Diâmetro da haste: 25 mm		
Transdutor de posição	Curso: 1000 mm	MLO-POT-1000-TLF	FESTO
	Resolução: 0,01 mm		
Válvula direcional proporcional	5/3 vias, fechada	MPYE-5-1/8-HF-010-B	FESTO
	Vazão nominal: 0,7 m ³ /min		

3.1.2 Especificação técnica da Junta 2

A junta 2 do robô é montado sobre a junta 1, seu deslocamento é na horizontal e também utiliza guias de esferas para facilitar o deslocamento. A Tabela 2 mostra algumas características técnicas do cilindro pneumático sem haste (ANEXO D), um sensor de posição e uma servoválvula.

Tabela 2 – Descrição técnica dos componentes do acionamento da Junta 2

Componente	Especificações	Código catálogo	Fabricante
Cilindro pneumático sem haste	Curso: 1000 mm	502 602 020 0	REXROTH
	Diâmetro: 25 mm		
Transdutor de posição	Curso: 1000 mm	MLO-POT-1000-TLF	FESTO
	Resolução: 0,01 mm		
Válvula direcional proporcional	5/3 vias, fechada	MPYE-5-1/8-HF-010-B	FESTO
	Vazão nominal: 0,7 m ³ /min		

3.1.3 Especificação técnica da Junta 3

A junta 3 do robô é montado perpendicular à junta 2, porém é a única com deslocamento na vertical, utiliza rolamentos lineares para facilitar o deslocamento, diminuir as folgas e o atrito. É composta por um cilindro pneumático (ANEXO E), um sensor de posição sem contato (ANEXO F), uma servoválvula, um transdutor de pressão (ANEXO G) e dois sensores de pressão (ANEXO H). A Tabela 3 traz mais informações referente aos componentes do eixo 3.

Tabela 3 – Descrição técnica dos componentes do acionamento da Junta 3

Componente	Especificações	Código catálogo	Fabricante
Cilindro pneumático	Curso: 160 mm	DNC-40-160-PPV	FESTO
	Diâmetro: 40 mm		
	Diâmetro da haste: 16 mm		
Transdutor de posição sem contato	Curso: 200 mm	MLO-POT-1000-TLF	FESTO
	Resolução: 0,01 mm		
Transdutor proporcional de pressão	Margem de ajuste de pressão: 0,05 a 9 bar	ITV3050-33F4N3-X15	SMC
	Pressão de alimentação: 1 a 10 bar		
Sensor de pressão	Faixa de medição: 0 a 10 bar	SDE1-D10-G2-R18-C-PU-M8	FESTO
Válvula direcional proporcional	5/3 vias, fechada	MPYE-5-1/8-HF-010-B	FESTO
	Vazão nominal: 0,7 m ³ /min		

Os sensores de pressão foram instalados nas duas câmaras do cilindro e o transdutor de pressão, é regular a pressão de entrada, permitindo assim a determinação da força de rebarbamento. Segundo Bollmann (1997), a força produzida pelo cilindro pode ser dada pela equação (9).

$$F = (p_1.A_1 - p_2.A_2) \quad (9)$$

Onde:

F = força líquida produzida na haste do cilindro.

p_1, p_2 = Pressões efetivas nos lados do êmbolo e da haste respectivamente.

A_1 = área de ação da pressão p_1 .

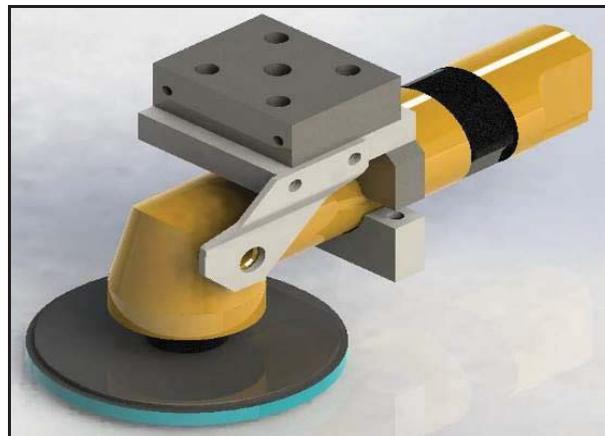
A_2 = área de ação da pressão p_2 .

Portanto, fazendo a medição da pressão nas duas câmaras do cilindro e conhecendo as duas áreas do cilindro, pode-se determinar a força durante a execução dos testes.

3.1.4 Efetuador Final

O efetuator final é composto por um porta-ferramentas, uma esmerilhadora pneumática que suporta discos de 5 polegadas, com rotação de trabalho de 10000 RPM, uma válvula *on-off* para acionar automaticamente a ferramenta durante o ciclo de trabalho e um disco flap, conforme ilustra a Figura 24.

Figura 24 – Vista isométrica do efetuator final



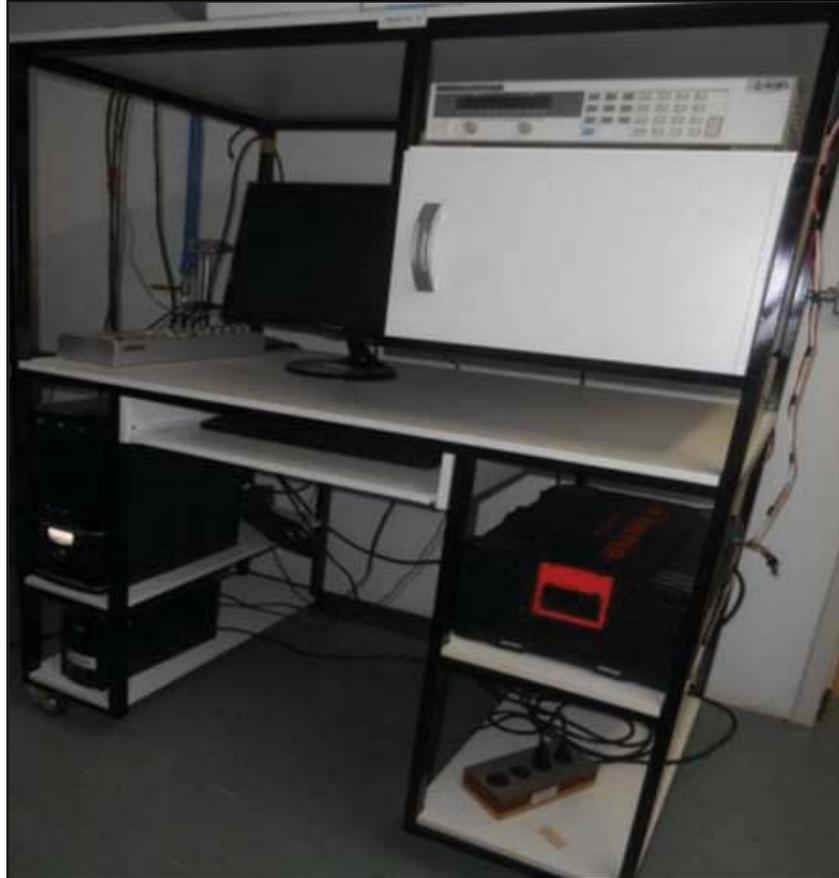
Fonte: Autor

3.2 Sistema de controle e aquisição de sinais

O tratamento de dados é realizado via software (*Matlab/Simulink*) com base nos dados computados pela placa DSPACE DS 1104. Essa placa recebe os sinais analógicos dos sensores de pressão e dos transdutores lineares, que fazem a medição dos deslocamentos horizontais e verticais do efetuator final, depois, envia sinais digitais para as válvulas direcionais proporcionais que liberam a passagem do ar comprimido, com isso controla-se o

avanço e recuo dos cilindros pneumáticos. A Figura 25 ilustra a estação de trabalho, composta de placa DSPACE DS 1104, um microcomputador e uma fonte.

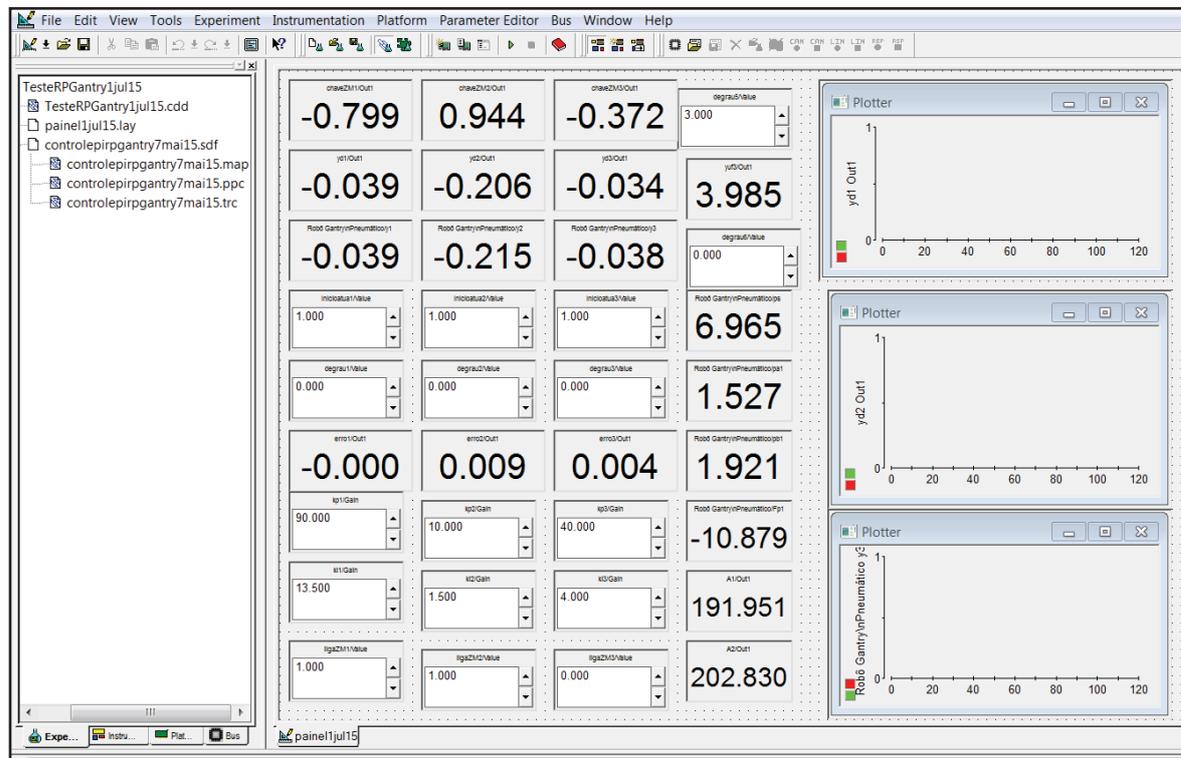
Figura 25 – Fotografia da estação de trabalho



Fonte: Autor

No computador está instalado e integrado os softwares *Matlab/Simulink* e *ControlDesk* que permitem a captura, controle e manipulação dos dados em tempo real através da construção de uma interface gráfica, o que possibilita a análise detalhada dos resultados obtidos. A Figura 26 apresenta o leiaute do software *ControlDesk* com os respectivos instrumentos virtuais de monitoramento e captura dos dados do manipulador robótico utilizado para os testes apresentados no Capítulo 4.

Figura 26 – Interface do software Control Desk



Fonte: Autor

Através da integração destes softwares é possível a programação do robô através de um diagrama de blocos, o que facilita a programação, o ajuste dos ganhos do controlador e possibilita a visualização em tempo real o seguimento da trajetória do robô e a sua respectiva precisão.

3.3 Desenvolvimento de melhorias construtivas no protótipo

Ao iniciar os estudos no protótipo existente, encontraram-se problemas que poderiam influenciar na precisão de posicionamento do robô, prejudicando a execução do processo de rebarbamento. Dentre os principais problemas encontrados pode-se destacar o excesso de folga existente entre a parte móvel e a fixa do mecanismo e a baixa rigidez do suporte que sustenta toda a junta. Cruz (2010) relata, em seu trabalho, um dos fatores que prejudicam a manutenção de um contato estável com o meio quando se emprega sensores de força é a falta de rigidez na estrutura mecânica do equipamento.

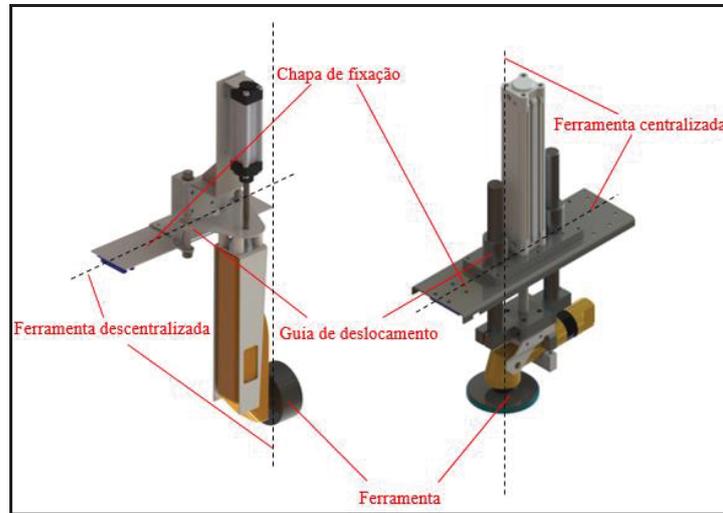
Com intuito de diminuir estes problemas, foi elaborado um novo projeto desta junta, utilizando componentes específicos para este tipo de aplicação e utilizando conceitos de

projeto para automação propostos por Bralla (2004). Para resolução destes inconvenientes, foram escolhidos quatro pontos principais que deveriam sofrer alterações. A seguir serão apresentados os problemas existentes e a solução encontrada:

- Fixação – a junta antiga possuía uma chapa de 1,5 mm plana sem reforços dobrados ou nervuras. No projeto novo foi utilizado uma chapa de 3 mm, com abas dobradas, o que proporcionou um aumento considerável na rigidez do equipamento;
- Guias de deslocamento – o mecanismo antigo era composto por buchas de nylon e parafusos como eixos de deslocamento. Para melhorar esta situação foi utilizado rolamentos lineares e eixos temperados e retificados para reduzir a folga e facilitar o deslocamento de acionamento da ferramenta;
- Volume de trabalho – o cilindro de acionamento possuía 100 mm de curso, este atuador foi substituído por um com 160mm de curso. Este aumento de 60 mm no curso da junta 3, possibilitou um aumento de 60% no volume de trabalho do protótipo;
- Centralização da ferramenta – o projeto novo possibilitou a centralização da ferramenta, região de aplicação da força, em relação a chapa de fixação da junta, diminuindo desta forma a tendência de deformação da chapa de fixação da junta.

A Figura 27 mostra uma vista isométrica do eixo antigo e do atual, tornando possível a visualização das melhorias implementadas, descritas acima.

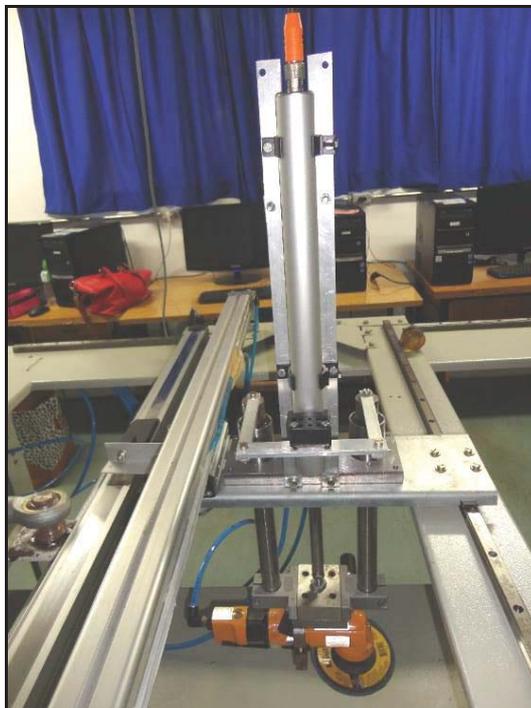
Figura 27 - Vista isométrica ilustrando as melhorias construtivas na junta 3 do robô: projeto antigo (esquerda) e projeto novo (direita).



Fonte: Autor

A Figura 28 mostra uma imagem após a instalação da junta 3 no protótipo do robô, já com o sensor de posição.

Figura 28 – Fotografia destacando a nova Junta 3 do robô pneumático.



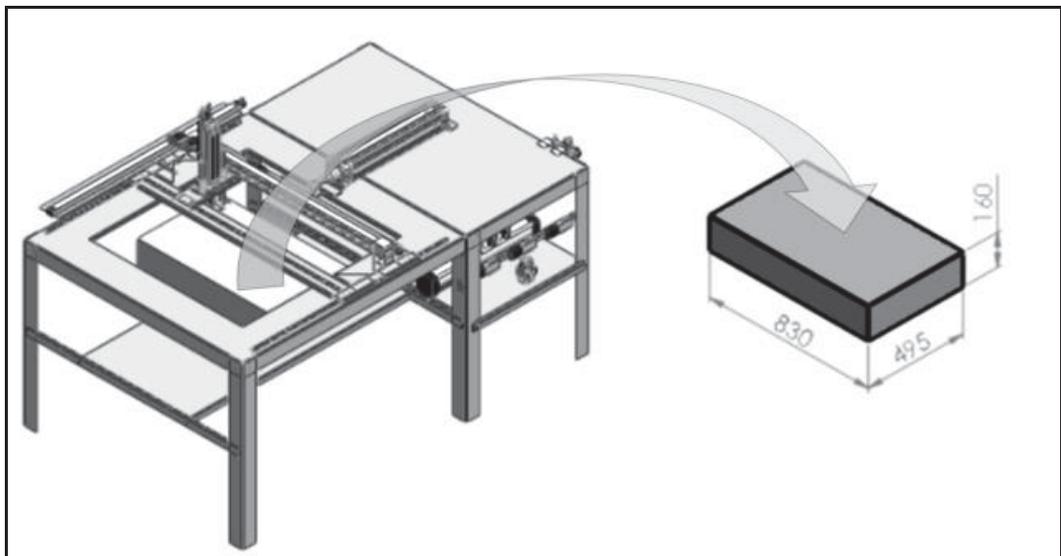
Fonte: Autor

3.4 Volume de trabalho do robô

O volume de trabalho é o termo que se refere ao espaço dentro do qual o robô pode manipular a extremidade de seu punho. É utilizada a extremidade do punho para definir o espaço de trabalho para evitar complicações devido aos diferentes tipos de efetuadores finais disponíveis no mercado.

O volume de trabalho é determinado pela configuração física do robô, pelo tamanho dos componentes e os limites dos movimentos das juntas do robô. O volume de trabalho do protótipo pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Imagem representativa do volume de trabalho do robô



Fonte: Autor

3.5 Modelagem cinemática do robô Gantry

O robô em estudo consiste em elos, conectados por juntas prismáticas, cada par junta-elos forma um grau de liberdade. Onde que o primeiro elo é a base fixa, de sustentação do robô e o último é o responsável pela fixação da ferramenta de rebarbamento. A modelagem cinemática do manipulador robótico permite relacionar o sistema de coordenadas da ferramenta de rebarbamento com o sistema de coordenadas da base, ou seja, do elo 0 (zero).

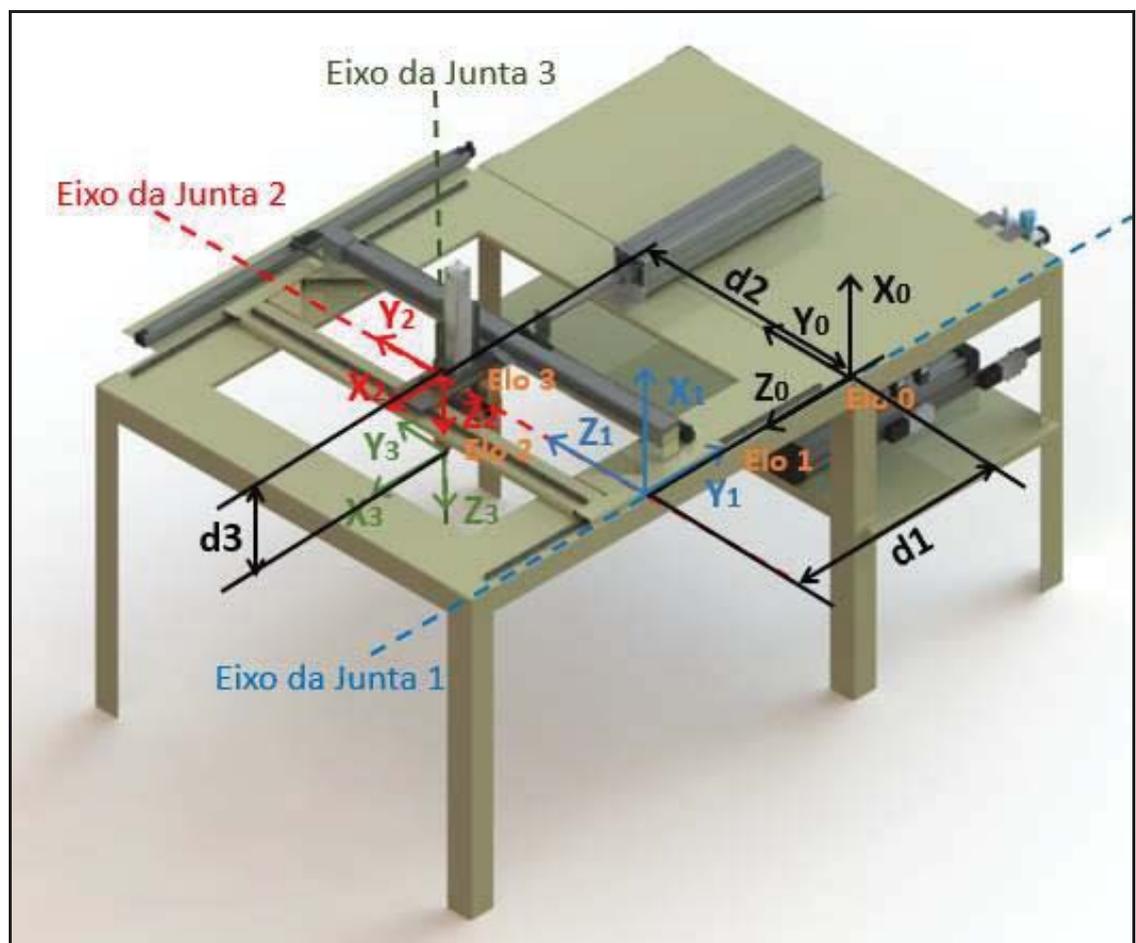
Para a realização da modelagem cinemática seguiu-se a metodologia de Denavit-Hartenberg (D-H). Esta modelagem consiste na definição dos elos e das juntas, e conseqüentemente dos os parâmetros de D-H. Com os parâmetros definidos são realizados os

cálculos das matrizes de transformação homogênea e os cálculos das cinemáticas direta, inversa e diferencial.

3.5.1 Parâmetros de Denavit-Hartenberg

A Figura 30 mostra a definição dos elos, das juntas e do sistema de coordenadas do manipulador robótico, segundo a metodologia de D-H.

Figura 30 – Vista isométrica do robô com o sistema de referências



A partir da definição do sistema de coordenadas tem-se a determinação dos parâmetros de Denavit-Hartenberg que é apresentado na Tabela 4 e a Tabela 5 mostra a variação de d_1, d_2 e d_3 , que representam o volume de trabalho do robô.

Tabela 4 - Parâmetros de Denavit-Hartenberg

elo_i	a_i (m)	θ_i (rad)	α_i (rad)	d_i (m)
elo_1	0	0	$-\pi/2$	d_1
elo_2	0	$-\pi/2$	$\pi/2$	d_2
elo_3	0	0	0	d_3

Tabela 5 – Faixa de variação das juntas do robô

	d_1	d_2	d_3
Faixa de variação (m)	0 a 0,495	0 a 0,83	0 a 0,16

3.5.2 Matriz de transformação homogênea

Com o sistema de coordenadas de D-H é estabelecido, uma matriz de transformação homogênea é desenvolvida relacionando dois elos adjacentes, ou seja, representando a transformação do sistema do elo i para o sistema do elo $i-1$. A matriz de transformação homogênea que representa um elo em relação ao anterior pode ser feita através da equação (2).

Para relacionar o último elo com o elo 0, ou seja, para relacionar o sistema de coordenadas da ferramenta de rebarbamento com a base do robô, deve-se fazer a multiplicação das matrizes conforme a equação (3)

Substituindo os parâmetros apresentados na Tabela 2 na equação (2), tem-se as equações (10), (11) e (12) que apresentam as matrizes de transformação homogênea que representam o sistema de referência do elo 1 para o elo 0 (base fixa), do elo 2 para o elo 1 e do elo 3 para o elo2 respectivamente.

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Multiplicando-se as matrizes (10), (11) e (12) conforme a equação (3), tem-se a matriz de transformação homogênea que referencia o a ferramenta de trabalho com a base fixa do robô, o elo 0, conforme mostra a equação (13).

$$T_3^0 = T_2^0 \cdot A_3^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.5.3 Cinemática direta

A cinemática direta é utilizada no planejamento de trajetórias no espaço das juntas, a partir dela é possível obter a posição e velocidade do efetuador, para uma dada posição das articulações. As equações (14), (15) e (16) representam a orientação do efetuador final no espaço de trabalho do robô e a equação (17) representa a posição do mesmo.

$$X_3^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Y_3^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$Z_3^0 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$P_3^0 = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_3 \\ d_2 \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3.5.4 Cinemática Inversa

A cinemática inversa, como o próprio nome diz, é o processo inverso da cinemática direta, ou seja, é possível obter os ângulos/distâncias de junta a partir das coordenadas de posição e orientação do efetuador final. As equações da cinemática inversa para o robô em estudo são apresentadas nas equações (18), (19) e (20).

$$d_3 = -P_x \quad (18)$$

$$d_2 = P_y \quad (19)$$

$$d_1 = P_z \quad (20)$$

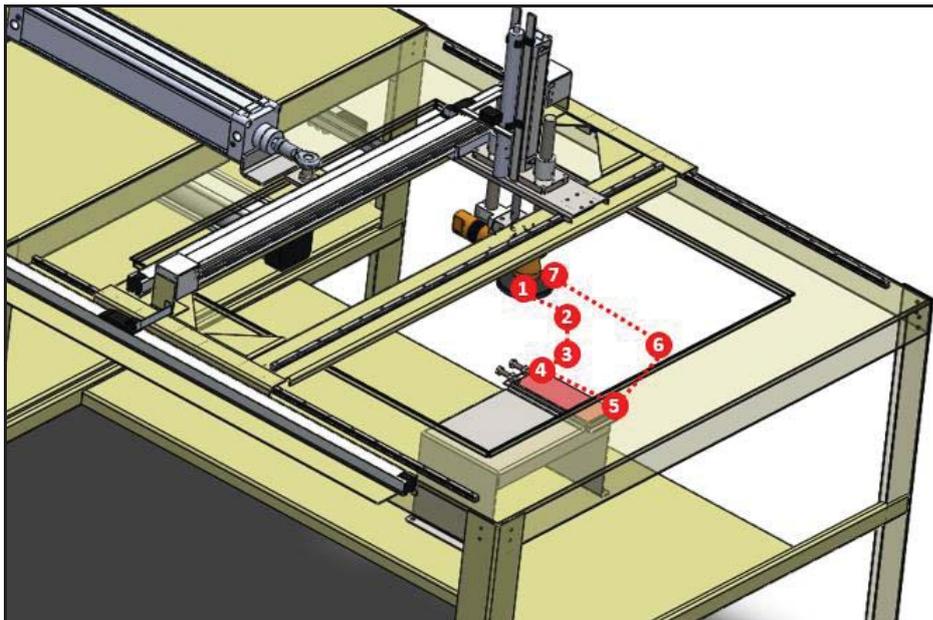
4. TESTES EXPERIMENTAIS

4.1 Planejamento de trajetória para os testes

O planejamento de trajetórias consiste em gerar o histórico temporal das variáveis de junta para que o robô execute o movimento desejado. Geralmente o movimento desejado é especificado no espaço cartesiano, respeitando os limites do volume de trabalho do robô. Com estes pontos definidos é possível determinar, através da cinemática inversa, as variáveis de junta para cada ponto. Assim pode-se concluir que a geração de trajetória representa a variação no tempo, da posição, da velocidade e da aceleração das juntas do robô, ou seja, a geração de pequenas variações angulares de juntas necessárias para realizar um deslocamento e conseqüentemente uma tarefa.

Para o planejamento da trajetória do processo de rebarbamento das peças de teste foi utilizado a metodologia de deslocamento ponto a ponto, segundo Costa (2003), este método se caracteriza pelo fato de que no controle da trajetória apenas se levam em consideração os pontos inicial e final da trajetória. Então, foram traçados alguns pontos conforme pode ser observado na Figura 31, com variáveis em x, y e z que representam o deslocamento do robô para executar a atividade de rebarbamento de uma aresta do corpo de prova.

Figura 31 – Desenho representativo dos pontos da trajetória programada



Fonte: Autor

A Tabela 6 apresenta as coordenadas identificadas no manipulador robótico simulando o rebarbamento das peças teste, junto com o seu respectivo tempo, onde y_1 , y_2 e y_3 representam a posição desejada de cada junta. É escolhido um tempo de cinco segundos para o manipulador robótico ficar em cada novo sistema de coordenadas.

Tabela 6 - Coordenadas do seguimento de trajetória do manipulador robótico

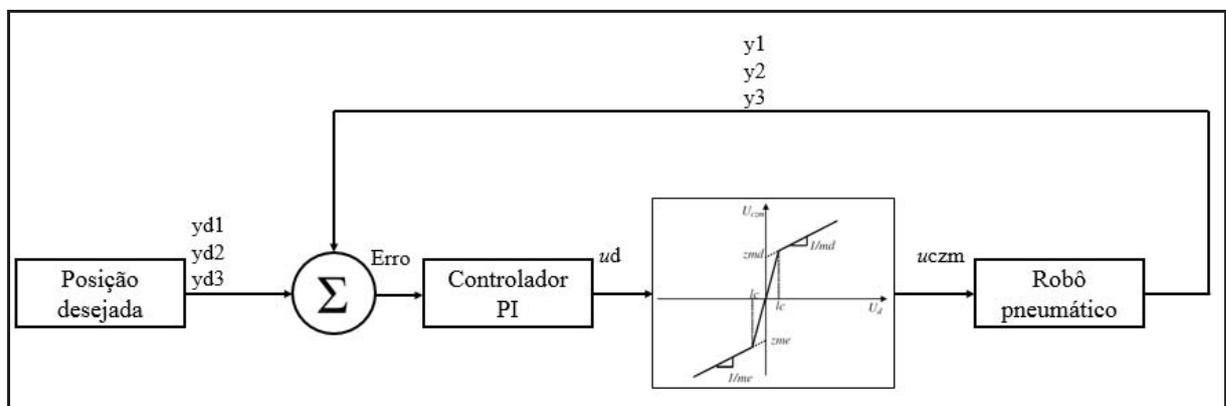
Posição	1	2	3	4	5	6	7
Tempo (s)	0	5	10	15	20	25	30
y_1	-0,224	-0,039	-0,039	-0,039	0,13	0,13	-0,224
y_2	-0,311	-0,232	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,311
y_3	0	-0,034	-0,034	-0,012	-0,012	-0,07	0

Os valores de x, y e z da Tabela 6, foram obtidos movimentando o robô seguindo a trajetória definida para o rebarbamento de uma aresta do corpo de prova. Em cada ponto de mudança de direção ou sentido, foi realizada a leitura das variáveis das juntas mostrados nos sensores de posição, semelhante ao sistema de programação utilizado nos robôs utilizados na indústria.

4.2 Descrição do esquema de controle e o ajuste de ganhos do controlador

O controlador utilizado neste estudo foi o clássico Proporcional-Integral (PI) com a compensação da não linearidades da zona morta da servoválvula, conforme o esquema de controle mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Esquema de controle do robô com compensação de zona morta



Fonte: Autor

Segundo Ritter (2010), a zona morta é uma relação estática de entrada-saída na qual para uma faixa de valores de entrada a resposta de saída é nula. Sua inclusão na modelagem matemática possibilita minimizar os erros de seguimento de trajetória e também contribui para que não ocorra degradação no desempenho do controlador.

Sabendo que os parâmetros da zona morta não são possíveis de conhecê-los exatamente, assim como a inversa exata, que resultaria no cancelamento perfeito dessa não linearidade é necessário utilizar a inversa da zona morta suavizada a fim de evitar a descontinuidade na origem da entrada e as oscilações em torno da origem do sinal. A equação (24) representa matematicamente a compensação da zona morta.

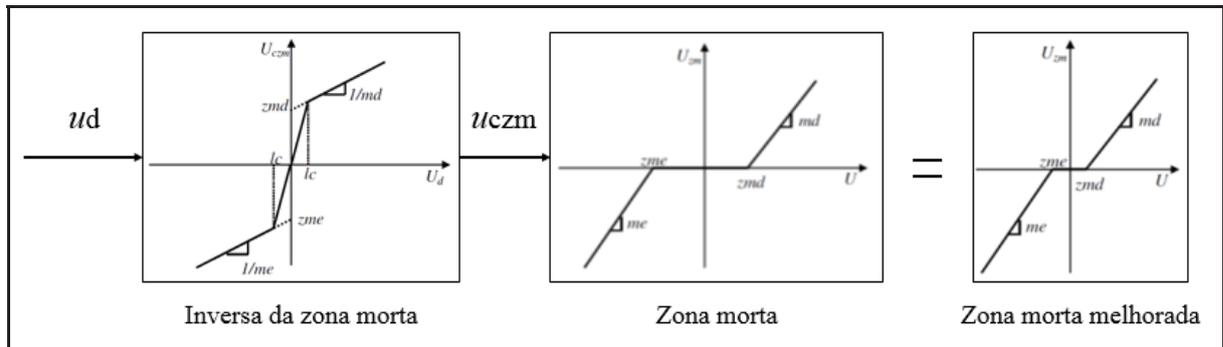
$$u_{czm}(t) = \begin{cases} \frac{u_d(t)}{md} + zmd & \text{se } u_d(t) \geq lc \\ \frac{u_d(t)}{me} - |zme| & \text{se } u_d(t) \leq -|lc| \\ \left(\frac{zmd + lc/md}{lc} \right) u_d(t) & \text{se } 0 \leq u_d(t) < lc \\ \left(\frac{|zme| + |lc|/me}{|lc|} \right) u_d(t) & \text{se } -|lc| \leq u_d(t) < 0 \end{cases} \quad (24)$$

Onde:

- u_{czm} é a saída do sinal de controle compensado
- u_d é a entrada do sinal de controle desejável sem a zona morta,
- lc é a largura da suavização linear usada na compensação e definido através de experimentos.

A identificação dos parâmetros de zona morta utilizados neste trabalho, foram obtidos utilizando a metodologia de Valdiero *et al* (2008) e a deste trabalho está descrita em Maraschin (2015). A Figura 33 mostra o benefício da compensação da zona morta, que é a redução do tempo de resposta da servoválvula.

Figura 33 - Esquema da metodologia para compensação de zona morta



Fonte: Autor

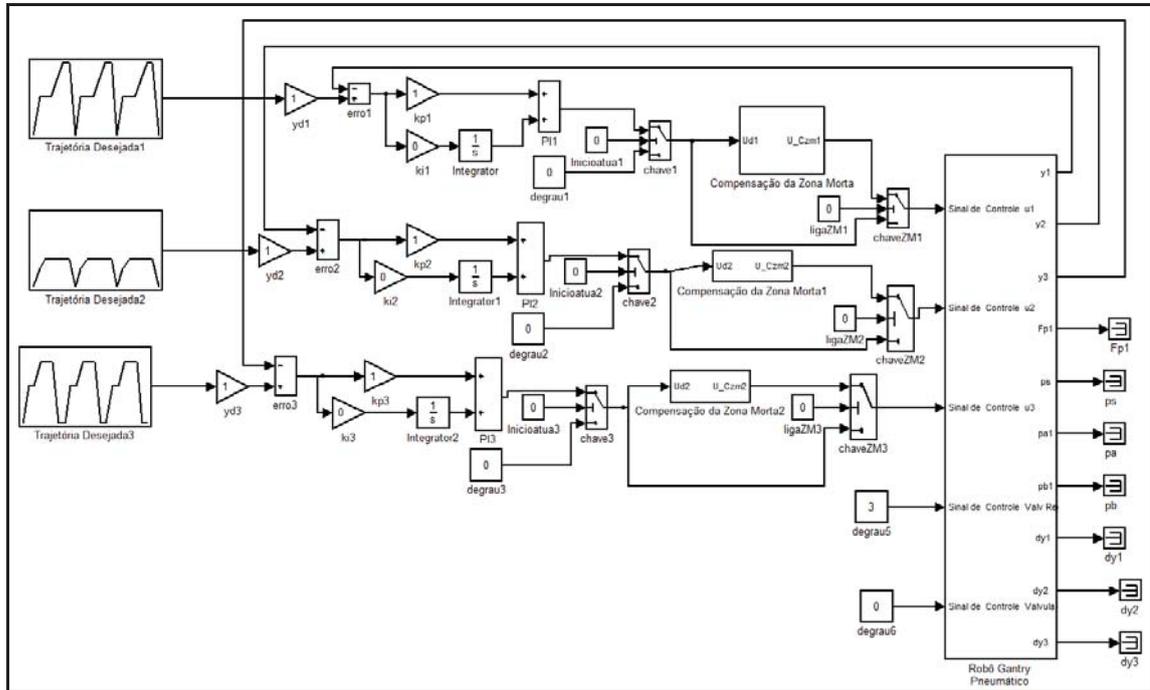
Para identificar o melhor ganho proporcional para cada junta foram realizados testes a fim de obter os menores erros de posicionamento sem haver oscilações no deslocamento da haste do cilindro e conseqüentemente no sinal de controle gerado. Os valores de k_p , k_i , Z_{me} e Z_{md} utilizados neste trabalho podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros do controlador do manipulador robótico

	Junta 1	Junta 2	Junta 3
k_p	90	10	40
K_i	13,5	1,5	10
Z_{me}	-0,88	-0,84	N/A
Z_{md}	0,88	0,84	N/A

O controle do robô foi realizado através do diagrama de blocos e pode ser observado na Figura 34.

Figura 34 - Diagrama de blocos do controle do robô implementado no Matlab/Simulink



Fonte: Autor

4.3 Descrição do Corpo de prova

Os corpos de prova selecionados para a aplicação do robô para rebarbamento de chapas são de material aço carbono SAE 1020, obtidas pelo corte a plasma, que é um processo usado no corte de metais eletricamente condutores, usualmente utilizado para corte de espessuras até 38 mm. Foi especificado as seguintes dimensões para os corpos de prova: 200 mm de comprimento, 80 mm de largura e 12,7 mm de espessura. A Figura 35 ilustra um corpo de prova após o corte térmico, ainda com as rebarbas.

Figura 35 – Fotografia de um corpo de prova com rebarba



Fonte: Autor

Para a fixação dos corpos de prova foi desenvolvido um dispositivo simples, composto por dois encostos e dois parafusos. Este dispositivo garante o posicionamento dos corpos de prova no espaço cartesiano em relação ao sistema de referência do robô, o elo 0. A fixação das peças no dispositivo é realizada através do aperto dos parafusos, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 – Fotografia de um corpo de prova fixo no dispositivo do robô.



Fonte: Autor

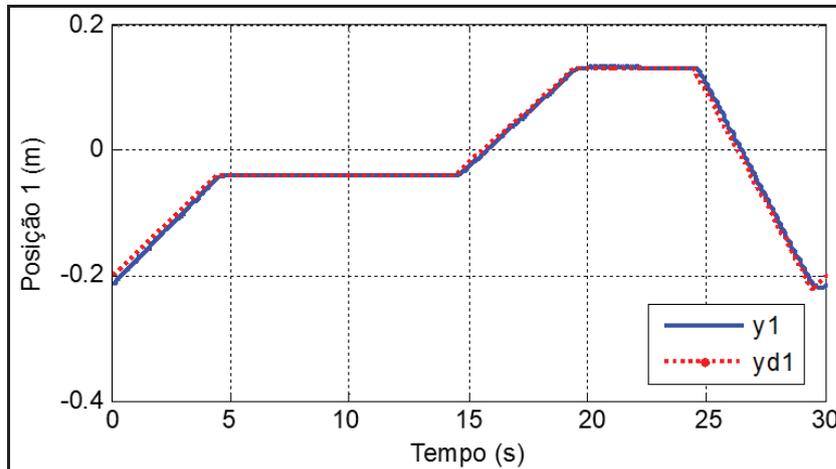
4.4 Resultados do ensaio sem contato da ferramenta com a peça

Foram realizados ensaios sem contato da ferramenta com a peça de trabalho com o objetivo de analisar o comportamento do manipulador, funcionamento dos cilindros, sensores, válvulas e evitar danos no manipulador caso houvesse alguma colisão.

Após realizar este ciclo de teste, com os dados gerados foi possível analisar o seguimento da trajetória executada pelo manipulador e comparar com os dados que tinham sido estipulados, ou seja, comparar o deslocamento desejado com o realizado. A Figura 37 apresenta o gráfico comparando o deslocamento desejado (y_{d1}) com o deslocamento

realizado (y_1) pela junta 1 do robô em função do tempo, conforme dados apresentados na Tabela 6.

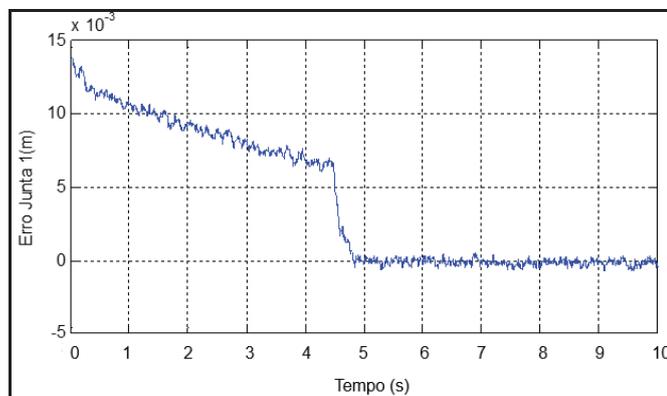
Figura 37 – Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 1



Fonte: Autor

A partir das medições de deslocamento desejado e deslocamento realizado é possível plotar um gráfico com o erro de posicionamento da junta robótica. Para esta primeira junta foi escolhido os trechos de 0 a 10 segundos para plotar o gráfico que pode ser observado na Figura 38, onde os instantes de 0 a 5 é uma trajetória de seguimento e de 5 a 10 é de posicionamento, ou seja, na primeira parte a junta esta aproximando do ponto desejado e a segunda ela se mantém no ponto.

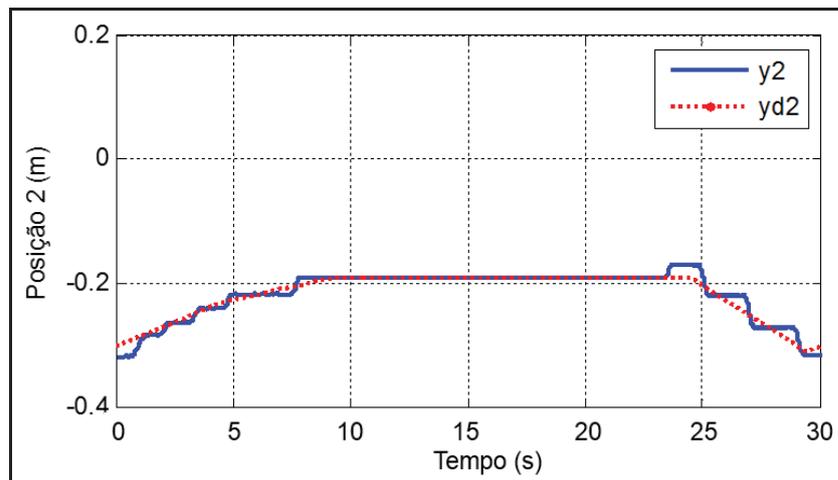
Figura 38 – Gráfico do erro da junta 1



Fonte: Autor

A Figura 39 apresenta o gráfico comparando o deslocamento desejado (y_{d2}) com o deslocamento realizado (y_2) pela junta 2 do robô em função do tempo, conforme dados apresentados na Tabela 6.

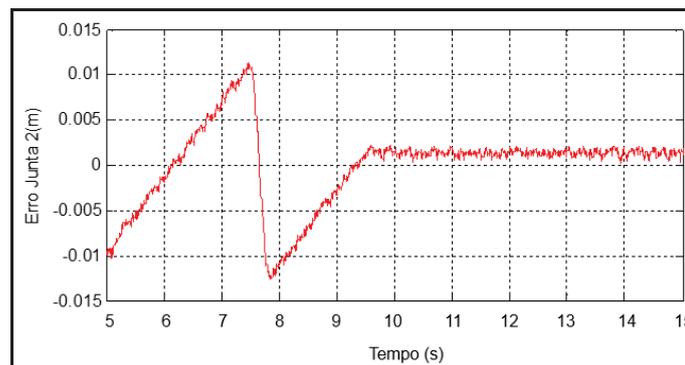
Figura 39 Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 2



Fonte: Autor

Para esta segunda junta foi escolhido os trechos de 5 a 15 segundos para plotar o gráfico de erro de posicionamento, que pode ser observado na Figura 40, onde o trecho de 5 a 10 é uma trajetória de seguimento e de 10 a 15 é de posicionamento.

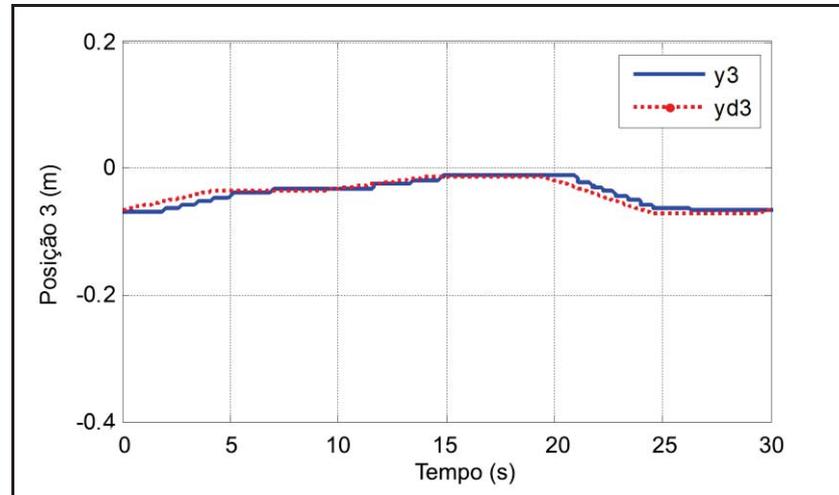
Figura 40 – Gráfico do erro da junta 12



Fonte: Autor

A Figura 41 apresenta o gráfico comparando o deslocamento desejado (y_{d3}) com o deslocamento realizado (y_3) pela junta 3 do robô em função do tempo, conforme dados apresentados na Tabela 6.

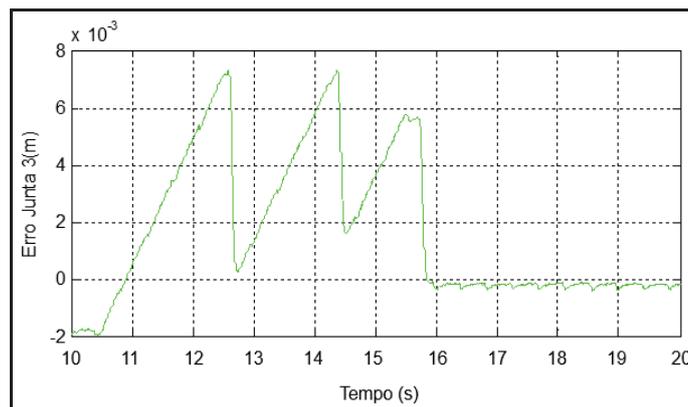
Figura 41 - Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 3



Fonte: Autor

Para esta segunda junta foi escolhido os trechos de 10 a 20 segundos para plotar o gráfico de erros, que pode ser observado na Figura 42, onde o trecho de 10 a 15 é uma trajetória de seguimento e de 15 a 20 é de posicionamento.

Figura 42 – Gráfico do erro junta 3



Fonte: Autor

Analisando os gráficos é possível observar que os maiores erros apresentados nas três juntas é na trajetória de seguimento, quando o manipulador robótico está em busca da posição desejada. A junta 1 apresenta um erro que vai diminuindo proporcionalmente ao

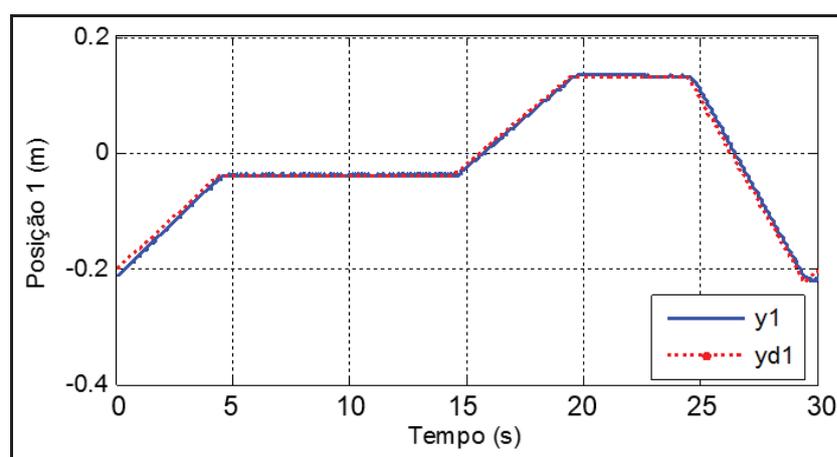
tempo que resta para alcançar o ponto desejado. A junta 2 apresenta uma oscilação próxima ao ponto desejado ocasionado provavelmente pelo fato do diâmetro do atuador da junta 2 ser menor do que os outros, o que prejudica seu controle. A junta 3 também apresenta uma oscilação nos pontos na trajetória de seguimento, isso é ocorre por não haver compensação de zona morta nesta junta.

4.5 Resultados do ensaio com contato da ferramenta com a peça

Para a realização do ensaio com contato entre a ferramenta, foi fixado o corpo de prova no dispositivo conforme descrito anteriormente, regulado a pressão da válvula controladora de pressão em 3 bar, e dado início a execução do ciclo. Esta regulagem de pressão foi ajustada para evitar excesso de força aplicada sobre o corpo de prova para não danificá-lo e evitar a quebra da ferramenta, a força resultante aplicada no corpo de prova é de 35 N. A velocidade de rebarbamento utilizada no teste é de 0.05 m/s.

A Figura 43 apresenta o gráfico comparando o deslocamento desejado (y_{d1}) com o deslocamento realizado (y_1) pela junta 1 do robô em função do tempo, conforme dados apresentados na Tabela 6.

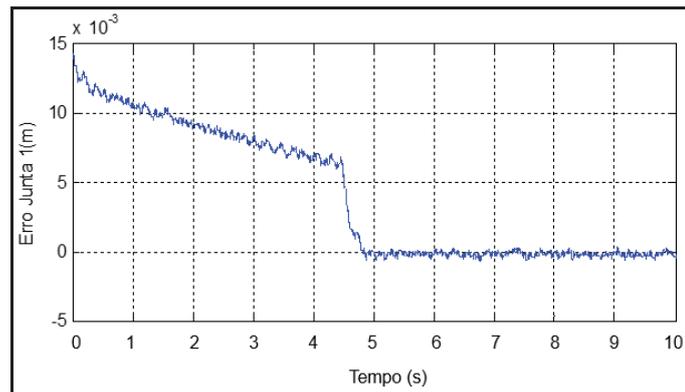
Figura 43 - Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 1



Fonte: Autor

Para plotar o gráfico de erros para este segundo teste foi utilizado o mesmo critério do primeiro teste. Para a primeira junta foi escolhido os trechos de 0 a 10 segundos para plotar o gráfico que pode ser observado na Figura 44, onde o trecho de 0 a 5 é uma trajetória de seguimento e de 5 a 10 é de posicionamento.

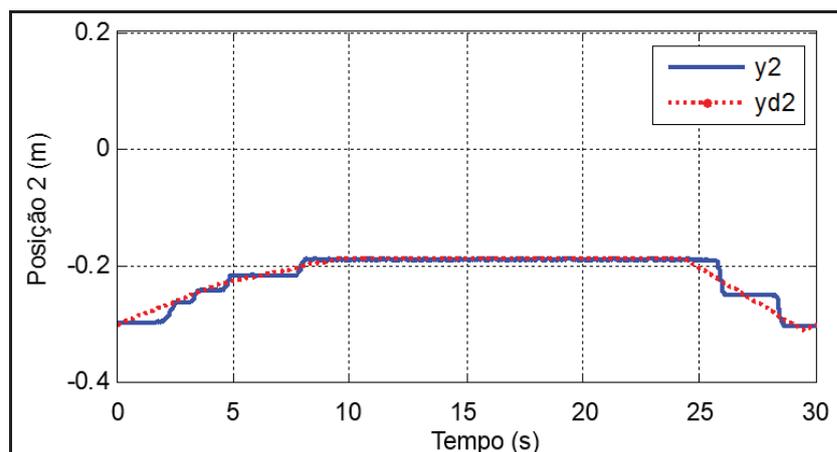
Figura 44 – Gráfico do erro junta 1



Fonte: Autor

A Figura 45 apresenta o gráfico comparando o deslocamento desejado (y_{d2}) com o deslocamento realizado (y_2) pela junta 2 do robô em função do tempo, conforme dados apresentados na Tabela 6.

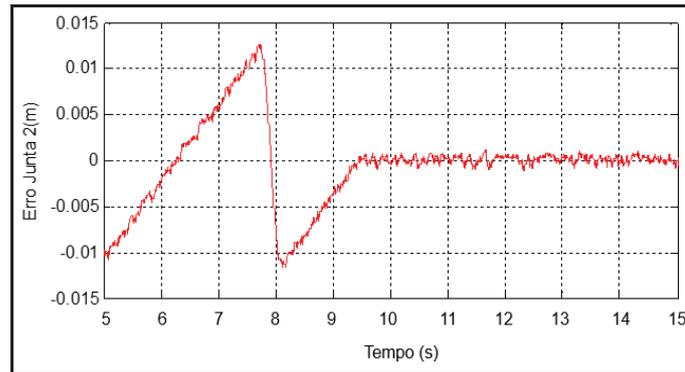
Figura 45 - Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 2



Fonte: Autor

Para plotar o gráfico de erro da segunda junta foi escolhido os trechos de 5 a 15 segundos para plotar o gráfico que pode ser observado na Figura 46, onde o trecho de 5 a 10 é uma trajetória de seguimento e de 10 a 15 é de posicionamento.

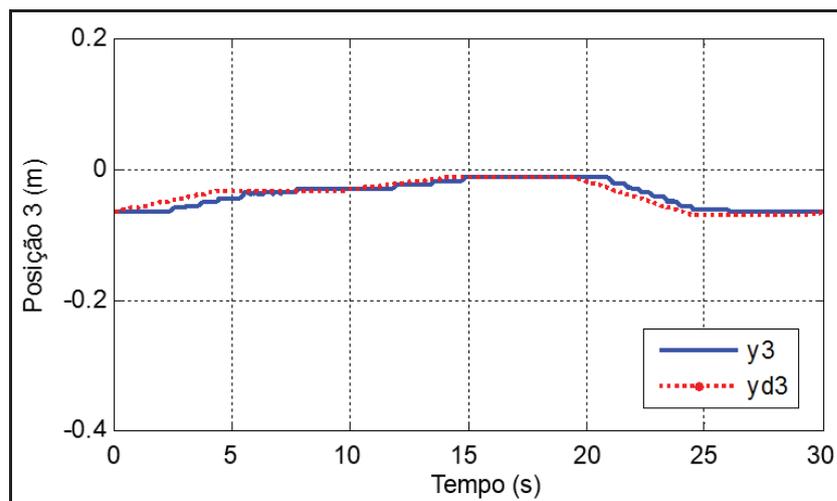
Figura 46 – Gráfico do erro junta 2



Fonte: Autor

A Figura 47 apresenta o gráfico comparando o deslocamento desejado (y_{d3}) com o deslocamento realizado (y_3) pela junta 3 do robô em função do tempo, conforme dados apresentados na Tabela 6.

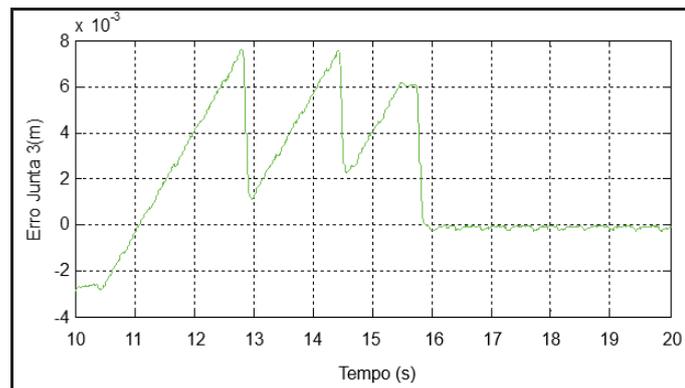
Figura 47 - Gráfico comparativo do seguimento de trajetória de posição da junta 3



Fonte: Autor

Para esta segunda junta foi escolhido os trechos de 10 a 20 segundos para plotar o gráfico de erros, que pode ser observado na Figura 42, onde o trecho de 10 a 15 é uma trajetória de seguimento e de 15 a 20 é de posicionamento.

Figura 48 - Gráfico do erro junta 3



Fonte: Autor

Observando os erros apresentados nos gráficos é possível verificar que os maiores erros apresentados nas três juntas é na trajetória de seguimento, semelhante ao que aconteceu com os gráficos apresentados no primeiro teste, porém este com algumas melhorias no posicionamento, quando a ferramenta estava em contato com a peça.

4.6 Análise dos resultados

Analisando os resultados apresentados nas seções anteriores fica evidenciado praticamente o mesmo comportamento das três juntas robóticas nos dois testes realizados, um maior erro no seguimento de trajetória do que no posicionamento.

É importante ressaltar que para o processo de rebarbamento de peças, a trajetória que exige maior precisão do manipulador robótico são as trajetórias de posicionamento, as quais o robô pneumático em estudo apresentou resultados muito bons, conforme pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Tabela comparativa dos erros máximos de posicionamento

	Erro máximo junta 1 (mm)	Erro máximo junta 2 (mm)	Erro máximo junta 3 (mm)
Teste 1	0,75	2,2	0,3
Teste 2	0,4	1,3	0,3

Como pode ser observado na Tabela 8 os resultados apresentados no segundo teste foram melhores, para a junta 1 e junta 2, quando o manipulador estava em contato com a peça, que é um resultado muito bom para aplicação do robô pneumático na tarefa de rebarbamento. As atividades que exigem contato geralmente é um problema para outros tipos de robos industriais. Também é possível perceber que os erros apresentados na junta 2 são maiores que nas outras juntas, fato esse devido ao cilindro de acionamento dessa junta não possuir haste e ser de diâmetro menor, o que dificulta seu controle e causa maior instabilidade no sistema o que pode ser observado nos gráficos.

Uma foto da peça que passou pelo processo de rebarbamento automatizado é mostrado na Figura 45, pode se observar que a remoção das rebarbas foi feito com êxito, validando assim a proposição desse trabalho.

Figura 49 - Corpo de prova. Esquerda: após o teste. Direita antes do teste



Fonte: Autor

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma proposta de automação do processo de rebarbamento de chapas metálicas utilizando um robô prismático com o acionamento pneumático. Foi desenvolvido a modelagem cinemática, inversa e diferencial do robô, possibilitando realizar o planejamento da trajetória.

As melhorias e adequações implantadas no protótipo para a tarefa de rebarbamento, apresentaram resultados satisfatórios durante a execução dos testes, pois ficou uma junta com menos folgas, maior rigidez na estrutura e menor atrito quando comparado com a junta antiga que fazia parte do protótipo.

A trajetória e o controlador aplicado apresentaram uma resposta adequada ao objetivo deste trabalho que é remover rebarbas de peças, como mostram as simulações ilustradas nos gráficos. A ferramenta utilizada também demonstrou-se eficaz para esta aplicação removendo a rebarba sem necessidade de posicionamentos extremamente precisos.

O uso da ferramenta *Simulink* do *Matlab* integrado com o software de interface gráfica da DSPACE, denominado *ControlDesk* facilitou a implementação e a obtenção de respostas da trajetória desenvolvida para a aplicação de rebarbamento. Ela possibilita a alteração de parâmetros do controlador instantaneamente durante a execução do processo e a visualização de erros de posicionamento permitindo chegar nos melhores valores para a aplicação de rebarbamento.

De acordo com os dados obtidos nos testes realizados foi possível observar que ao entrar em contato com a peça de trabalho houve uma melhora na precisão do robô confirmando assim uma das características do robô Grantry sobre outros robôs industriais comumente usados em aplicações similares.

Com a aplicação de um robô para esta tarefa será possível: reduzir os tempos e custos de produção; melhorar a segurança do processo produtivo; retirar trabalhadores de atividades em condições extremas, como por exemplo, altas temperaturas, níveis elevados de ruídos e trabalhos repetitivos.

Outras atividades propostas de pesquisa decorrentes da realização desse trabalho estão elencadas a seguir:

- Fazer a compensação de zona morta na junta 3;
- Colocar um cilindro com diâmetro maior para fazer o acionamento da junta 2;
- Fazer um estudo de compensação de atrito aplicado a todas as juntas do manipulador;
- Estudo de aplicação de um controle de força adequado na junta três;
- Implementar um controle de velocidade, ao menos nos pontos que definem uma trajetória de rebarbamento;
- Elaborar ferramentas computacionais para a obtenção dos pontos de trajetória no espaço de trabalho do robô;
- Desenvolver um método de detecção do posicionamento/orientação da peça no espaço de trabalho;
- Um estudo aprofundado com relação a velocidade de rebarbamento para chegar a uma velocidade ideal para o processo, sem que interfira de forma negativa no tempo de ciclo de operação;
- Estudo de adequações de segurança conforme a NR12, para uma aplicação do manipulador na indústria;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELE, Eberhard; KULOK, Michael; WEIGOLD, Matthias. **Machining with industrial Robots: analysis of the system behavior**. Ciência e Tecnologia, p. 72. 2006.

ALALLAK, A. **Deburing of componentes**. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:372180/FULLTEXT01.pdf>> Acesso em 26 de maio de 2015.

ALLGAYER, Renan Schmidt. **Desenvolvimento de um manipulador robótico cilíndrico acionado pneumáticamente**. Porto Alegre: UFRGS, 2011. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

BAVARESCO, Delair. **Modelagem matemática e controle de um atuador pneumático**. Ijuí: UNIJUI, 2007. Dissertação. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2007.

BRALLA, James. **Design for Manufacturability Handbook**. 2.ed. [S.I.]: Mc Graw-Hill, 2004.

BOBROW, J; MCDONELL, B. **Modeling, Identification, and Control of a Pneumatically Actuated, Force Controllable Robot**, IEEE Transactions on Robotics and Automation. pp. 732-742. 1998.

BOGUE, Robert. **Finishing robots: a review of technologies and applications**. Industrial Robot: An International Journal, p.6-12. 2009.

BOGUE, Robert. **The development of medical microrobots: a review of progress**. Industrial Robot: An International Journal, p. 294-299. 2008.

BLOSS, Richard. **Robots that are faster or perform in-mold labeling highlight plastics show**. Industrial Robot: An International Journal, p. 13-16. 2010.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. 2.ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1986.

COSTA, E. **Simulação de movimento e planejamento de trajetória para robôs manipuladores.** Recife: UFPE, 2003. Dissertação. Universidade Federal de Pernambuco. 2003.

CRAIG, JOHN J. **Robótica.** 3. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

CRUZ, Felipe Barreto Campelo. **Modelagem, controle e emprego de robôs em processos de usinagem.** Florianópolis: UFSC, 2010. Tese. Universidade Federal de Santa Catarina. 2010.

DANDAN, K.; ANANIEV, A.; KALAYKOV, I. **SIRO: the silos surface cleaning robot concept.** IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. pp. 657-661. 2013.

GERVINI, Vitor Irigon. **Modelagem e controle de um servoposicionador pneumático via redes neurais.** Porto Alegre: UFRGS, 2014. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

GRONINGER, Rolf; KUS, Elzbieta; HUPPI, Richard. **Market Study on Adaptive Robots for Flexible Manufacturing Systems.** IEEE - International Conference On Automation Science And Engineering, Málaga, p. 978-984. abr. 2009.

HSU, Feng-yih; FU, Li-chen. **A New Adaptive Fuzzy Hybrid Force/Position Control for Intelligent Robot Deburring.** IEEE - International Conference On Automation Science And Engineering, Detroit, p. 2476-2481. maio 1999.

ISO 10218-1: Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 1: Robots, 2011.

KIM, Changhoon; CHUNG, Jae H. **Application of an active pneumatic actuator to robotic deburring.** Industrial Robot: An International Journal, New Jersey, p. 487-494. 2007.

LAGHROUCHE, S.; AHMED, F. S.; MEHMOOD, A. **Pressure and Friction Observer-Based Backstepping Control for a VGT Pneumatic Actuator.** IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2013.

LAUS, Luís Paulo. **Identificação da Cinemática de Robôs Industriais.** Curitiba: CEFET, 1998. Dissertação. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. 1998.

LEE, Young Dae; KANG, Byung Hun; PARK, Jong Oh. **Robotic Deburring Strategy Using Burr Shape Recognition**. IEEE - International Conference On Automation Science And Engineering, Seoul, p. 1513-1518. 1999.

LOCATELI, Cristiano Cardoso. **Modelagem e desenvolvimento de um sistema de controle de posição pneumático com acionamento por válvulas on/off**. Florianópolis: UFSC, 2011. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.

LU, Bo; HUI, Wei-an; ZHENG, Zhijian; TAO, Guoliang. **Design and Characteristics Analysis of a High Precision Pneumatic Pressure Control System**. . ICFP. pp. 507-511. 2013.

MARASCHIN, LEONARDO. **Modelagem matemática de um robô Gantry com acionamento pneumático**. Panambi: UNIJUI, 2015. Dissertação. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2015.

MASEY, Rene F. Moreno et al. **Guidelines for the design of low-cost robots for the food industry**. Industrial Robot: An International Journal, p. 509-517. 2010.

MENUZZI, Odair et al. **Modelagem e simulação computacional da não linearidade de folga em um robô Gantry**. DINCON'10, Brazilian Conference on Dynamics, control and their applications. 2010.

MISSIAGGIA, Leonardo. **Planejamento de trajetória para um robô cilíndrico acionado pneumáticamente**. Porto Alegre: UFRGS, 2014. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

NÚÑEZ, A. F.; VEIGA, F.F.; GONÇALVES, M.M. **A Pneumatic Robotic System for Inspection of Underground Electrical Conduit**. Symposium on Computing and Automation for Offshore Shipbuilding. pp. 57-62. 2013.

OLIVEIRA, Marcelo Frasson de. **Projeto de um robô cartesiano com acionamento pneumático**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007.

PALLI, G.; MELCHIORRI, C. **Modelling and Control of Robotic Joints Based on Sliding Pairs**. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). pp. 1743-1748. 2013.

PEREIRA, F. S.; PINHEIRO, G. M.; VIRIATO, D. A.; SILVA, E. C. da F. Melhoria ergonômica em postos de trabalho do setor de acabamento de uma fundição através do método OWAS de análise de posturas, **Revista Eletrônica Produção & Engenharia**, v. 4, n. 2, p. 395-403, Jul./Dez. 2011.

PIRES, N.; RAMMING, J; RAUCH, S.; ARAÚJO, R. **Force/Torque Sensing Applied to Industrial Robotic Deburring**. Sensor Review Journal, MCB University Press. 2002.

RAOUFI, Asghar; SURGENOR, Brian. **Control of a Pneumatic Gantry Robot for Grinding: Performance with Convencional Techniques**, IEEE Conference on Control Applications. pp. 1176-1181. 2005.

RIA, Robotics Industries Association: **The North American Robotics Market: First Quarter 2014 Update**. Disponíveis em: <<http://www.robotics.org>>. Acesso em: 09/08/2015.

RICHTER, Rozimerli Raquel Milbeier. **Modelagem matemática e controle de posição de um atuador linear acionado pneumáticamente**. Ijuí: UNIJUI, 2013. Dissertação. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2013.

RIJO, M. G. Q.; PERONDI, E. A.; SARMANHO JR, C. A. C. **Development of a linear control technique with parameterization of the moment of inertia applied to the actuation system of the 1° degree of freedom of a pneumatic robot**, Scandinavian International Conference on Fluid Power. 2013.

RIJO, Marcos Giovane de Quevedo. **Desenvolvimento da base e controle do grau de liberdade rotacional de um robô cilíndrico com acionamento pneumático**. Porto Alegre: UFRGS, 2013. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013.

RITTER, CARLA SILVANE. **Modelagem matemática das características não lineares de atuadores pneumáticos**. Ijuí: UNIJUI, 2010. Dissertação. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2010.

Robotic market. Robotic Industries Association. 2014. Disponível em: <<http://www.roboticonline.com>>.

ROMANO, Vitor Ferreira. **Robótica Industrial: aplicação na indústria de manufatura e de processos**. 1.ed.São Paulo:Edgard Blücher,2002.

ROSÁRIO, João Maurício. **Princípios de mecatrônica**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

SAMHOURI, Murad; RAOUFI, Asghar; SURGENOR, Brian. **Control of a pneumatic Gantry Robot for Grinding: A Neuro-fuzzy Approach to PID Tuning**, IEEE Conference on Control Applications. pp. 452-458. 2005.

SANTOS, Claudio das Silva. **Modelagem matemática de um robô pneumático com dois graus de liberdade**. Ijuí: UNIJUI, 2014. Dissertação. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2014.

SCIAVICCO, L SICILIANO, B., **Modeling and control of robot manipulators**, McGraw-Hill, Naples, Italy, 1996.

SONG, H.; SONG J. **Precision Robotic Deburring Based on Force Control for Arbitrarily Shaped Workpiece Using CAD Model Matching**. International Journal of precision engineering and manufacturing. Vol. 14. N0.1 pp. 85-91. 2013.

TAHERI, B.; CASE, D.; RICHER E. **Force and Stiffness Backstepping-Sliding Mode Controller for Pneumatic Cylinders**. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2013.

TAO, G., KOKOTOVIC. **Adaptive Control of Systems with Actuators and Sensors Nonlinearities**. New York: John Wiley& Sons, 1996.

TIAN, Yanbing; WANG, Tao; WANG, Meiling. **Modeling of ultra-precision pneumatic servo control platform**. ICFP .pp. 309-312. 2013.

VALDIERO, Antonio Carlos. **Modelagem Matemática de Robôs Hidráulicos**. Ijuí: UNIJUI, 2012. João Pessoa: UFPB, 2011. Dissertação. Universidade Federal da Paraíba. 2011

VALDIERO, Antonio Carlos. **Controle de robôs hidráulicos com compensação de atrito.** Florianópolis: UFSC, 2005. Tese. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

VALDIERO, Antonio Carlos. **Projeto mecânico de robôs industriais.** Ijuí: Unijuí, 2005. Programa de incentivo à produção docente: Coleção Cadernos Unijuí.

VALDIERO, A. C; BAVARESCO D.; ANDRIGHETTO, P. L. Experimental identification of the dead zone in proportional directional pneumatic valves. *International Journal of Fluid Power*, v.9, p.27 - 34, 2008.

VALE, Valentina Alessandra Carvalho do. **Controle de posição de um robô cartesiano por meio de técnicas adaptativas.** João Pessoa: UFPB, 2011. Dissertação. Universidade Federal da Paraíba. 2011.

WEICKEGANNT, M.; ZIMMERT, N.; KLUMMP, S.; SAWODNY, O. **Application of SDRE control to servopneumatic drives.** IEEE International Conference on Control Applications (CCA), 2010, p. 1725 – 1730.

YEO, S. H. et al. Ultrasonic Deburring. **Advanced Manufacturing Technology, London**, p. 333-341. 1997.

YUNMING, Zhu et al. **A Study on Milling Burr Expert System in Micro-Machining.** IEEE, Zhenjiang, p. 965-969. 2008.

YOU, Lan; ZHEN, Yaqing. **Trajectory Tracking Control of a 2-degree-of-freedom Gantry Crane Robot with Dynamic Friction Compensation,** IEEE Conference on Control Applications. pp. 1503-1508. 2011.

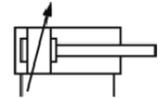
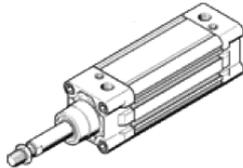
ANEXO A – CATÁLOGO CILINDRO DO EIXO 1

Atuador normalizado DNC-100-500-PPV

Código da peça: 163490

FESTO

Conforme ISO 15552, com camisa perfilada e amortecimento regulável nas posições finais.



Ficha técnica

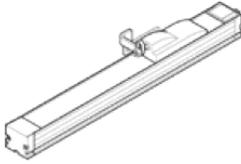
Característica	Valores
Curso	500 mm
Diâmetro do êmbolo	100 mm
Rosca da haste	M20x1,5
Amortecimento	PPV: Amortecimento pneumático regulável nas posições finais de curso
Posição de instalação	Nos dois lados
Conforme norma	ISO 15552
Extremidade da haste	Rosca externa
Princípio construtivo	Êmbolo Haste Tubo perfilado
Deteção de posição	Sem
Variantes	Haste do êmbolo unilateral
Pressão de trabalho	0,6 ... 12 bar
Modo de operação	de dupla ação
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Observação sobre meio operacional e do piloto	Permite operação com lubrificação (necessária para operações subsequentes)
Classe de resistência à corrosão KBK	2
Temperatura ambiente	-20 ... 80 °C
Autorização	Germanischer Lloyd
Energia de impacto nas posições finais	1,2 J
Curso de amortecimento	32 mm
Força teórica a 6 bar, retorno	4.418 N
Força teórica a 6 bar, avanço	4.712 N
Massa móvel com curso de 0 mm	1.544 g
Peso adicional por 10 mm de curso	115 g
Peso básico para curso de 0 mm	4.653 g
Fator de massa adicional por 10 mm de curso	38 g
Tipo de fixação	com rosca interna com acessórios
Conexão pneumática	G1/2
Observações sobre material	Conforme RoHS
Informação sobre material, tampão	Injetados de alumínio revestido
Informação sobre material, vedações	TPE-U(PU)
Informação sobre material, haste	Aço alta liga
Informação sobre material, camisa do cilindro	Liga de alumínio anodizado liso

ANEXO B – CATÁLOGO TRANSDUTOR DE POSIÇÃO DO EIXO 1 E 2

Sistema transdutor linear MLO-POT-1000-TLF

Código da peça: 152632

FESTO



Ficha técnica

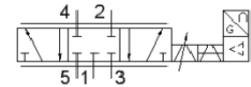
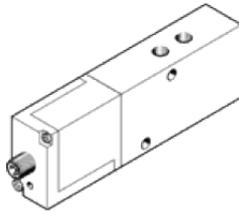
Característica	Valores
Certificação CE (veja Declaração de Conformidade)	conforme Diretriz EU-EMV
Princípio de medição: régua potenciométrica	analógico
Temperatura ambiente	-30 ... 100 °C
Corrente de retificação recomendada	< 1 µA
Máx. corrente de retificação de curta duração	10 mA
Velocidade máx. do deslocamento	10 m/s
Aceleração máx. do deslocamento	200 m/s ²
Resolução do trajeto	0,01 mm
Linearidade independente	0,04 %
Coefficiente de temperatura	5 ppm/K
Curso	1.000 mm
Sinal de saída	analógico
Resistência da conexão	10 kOhm
Tolerância resistência da conexão	20 %
Tensão operacional nominal c.c.	10 V
Tensão operacional máx. c.c.	42 V
Flutuações de tensão admissíveis	< 1 %
Consumo máx. de corrente	4 mA
Conexão elétrica	Conector design quadrangular conforme norma DIN 43650 Forma A de 4 pinos
Princípio construtivo	com cinta de proteção com cursor perfil aberto
Deslocamento paralelo, acoplamento	± 1,5 mm
Deslocamento do ângulo, cursor	± 1 °
Posição de instalação	Nos dois lados
Peso do produto	2.200 g
Informação sobre material, corpo	Liga de alumínio anodizado
Informação sobre material, proteção	Aço
Informação sobre material, corpo dos trilhos de deslizamento	Injetados de alumínio Plástico
Informação sobre material, interface de deslizamento	Aço
Informação sobre material, tampão	Plástico
Informação sobre material, grampos de montagem	PEI
Tipo de proteção em cima	conforme norma IEC 60529
Tipo de proteção embaixo	conforme norma IEC 60529
Resistência a vibrações conforme DIN/IEC 68, partes 2-6	testado conforme o grau de severidade 2
Resistência a choques contínuos conforme DIN/IEC 68, partes 2-82	testado conforme o grau de severidade 2

ANEXO C – CATÁLOGO VÁLVULA DIRECIONAL DO EIXO 1, 2 E 3

Válvula direcional proporcional MPYE-5-1/8-HF-010-B

Código da peça: 151693

FESTO



Ficha técnica

Característica	Valores
Diâmetro nominal	6 mm
Tipo de acionamento	elétrico
Princípio de vedação	duro
Posição de instalação	Nos dois lados
Princípio construtivo	Válvula de carretel
Tipo de retorno	Mola magnética
Instruções de segurança	Posição de segurança MPYE: em caso de ruptura do cabo de alimentação, a posição intermediária de bloqueio é acionada.
Tipo de pilotagem	direto
Sentido do fluxo	não reversível
Função de válvula	5/3 vias, fechada
Proteção contra inversão de polaridade	para todas as conexões elétricas
Pressão de trabalho	0 ... 10 bar
Valor b	0,26
Valor C	3,1 l/sbar
Vazão nominal padrão	700 l/min
Histerese máxima	0,4 %
Faixa de tensão operacional c.c.	17 ... 30 V
Ondulação residual	5 %
Valores TEÓRICO/REAL	Tipo de tensão 0- 10 V
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO 8573-1:2010 [6:4:4]
Observação sobre meio operacional e do piloto	Não permite operação com lubrificação
Certificação CE (veja Declaração de Conformidade)	conforme Diretriz EU-EMV
Classe de resistência à corrosão KBK	2
Temperatura do meio	5 ... 40 °C
Classe de proteção	IP65
Temperatura ambiente	0 ... 50 °C
Autorização	C-Tick
Peso do produto	330 g
Conexão elétrica	Conector design redondo M12x1 de 4 pinos
Tipo de fixação	com furo passante
Conexão pneumática 1	G1/8
Conexão pneumática 2	G1/8
Conexão pneumática 3	G1/8
Conexão pneumática 4	G1/8
Conexão pneumática 5	G1/8
Informação sobre material, tampão	ABS revestido
Informação sobre material, vedações	NBR
Informação sobre material, corpo	Alumínio anodizado

Cilindro sin vástago Kostalo

Con guía de patines deslizantes y amortiguación regulable, diá. 25–63 mm.

Rexroth
Bosch Group

Datos técnicos

Tipo	Cilindro de banda	
Intervalo de presión de servicio	2 a 10 bar	
Intervalo de temperatura ambiental	-15 °C a +70 °C	
Fluido	Aire comprimido	ISO 8573-1:2001, clase 6-4-3 o inferior*
Materiales	Tubo del cilindro Juntas Carro, tapa	Al anodizado NBR, PU AL

Campo de aplicación

Cilindro sin vástago con guía exterior de patines deslizantes. Elevada resistencia a esfuerzos de flexión y torsión así como de presión debido al perfil cerrado. Elevado rendimiento y ruido reducido debido a la construcción sin fugas de aire.

* Dimensión del partículo ≤ 5µm, punto de condensación bajo presión ≤ 3 °C, contenido de aceite ≤ 1 mg/m³



Información técnica

Diá. émbolo	[mm]	25	32	40	50	63	
Fuerzas del émbolo, teóricasa 6 bar	[N]	300	470	720	1180	1870	
Fuerzas del émbolo, teóricasa 10 bar	[N]	500	790	1200	1970	3130	
Longitud de amortiguación	[mm]	28	35	46	51	73	
Energía de amortiguación Ea 6 bar ¹⁾	[Nm]	3,8	7,3	15,8	26,2	54,3	
Carrera mínima	[mm]	0	0	0	0	0	
Peso	a carr. de 1 m	[kg]	4,8	6,3	10,8	15	30,4
	carr. de 100 mm +	[kg]	0,34	0,4	0,66	0,87	1,99

¹⁾ Para presiones diferentes ver registro 15, 1.4.1: datos de cálculo "Cilindros sin vástago con guía de patines deslizantes"
Carga admisible, ver registro 15, 1.4.1: datos de cálculo para "Cilindros sin vástago con guía de patines deslizantes"

Peso
[kg] ****

Número de material

Diá. émbolo Orificio roscado ²⁾	25	32	40	50	63
	G 1/8	G 1/4	G 1/4	G 3/8	G 1/2
Carrera estándar ²⁾					
100	5206020040	5206120040	5206220040	5206320040	5206420040
200	5206020080	5206120080	5206220080	5206320080	5206420080
250	5206020100	5206120100	5206220100	5206320100	5206420100
300	5206020120	5206120120	5206220120	5206320120	5206420120
350	5206020140	5206120140	5206220140	5206320140	5206420140
400	5206020160	5206120160	5206220160	5206320160	5206420160
450	5206020180	5206120180	5206220180	5206320180	5206420180
500	5206020200	5206120200	5206220200	5206320200	5206420200
600	5206020240	5206120240	5206220240	5206320240	5206420240
700	5206020280	5206120280	5206220280	5206320280	5206420280
800	5206020320	5206120320	5206220320	5206320320	5206420320
900	5206020360	5206120360	5206220360	5206320360	5206420360
1000	5206020400	5206120400	5206220400	5206320400	5206420400
1250	5206020500	5206120500	5206220500	5206320500	5206420500
1500	5206020600	5206120600	5206220600	5206320600	5206420600
1750	5206020700	5206120700	5206220700	5206320700	5206420700
2000	5206020800	5206120800	5206220800	5206320800	5206420800
Carrera máx.	6250	6250	6200	6200	6150

²⁾ Carreras intermedias bajo pedido (en intervalos de 25 mm).

³⁾ según ISO 228/1.

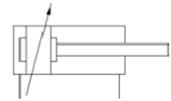
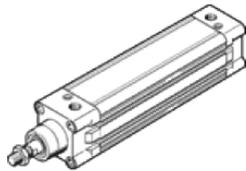
ANEXO E – CATÁLOGO CILINDRO DO EIXO 3

Atuador normalizado DNC-40-160-PPV

Código da peça: 163357

FESTO

Conforme ISO 15552, com camisa perfilada e amortecimento regulável nas posições finais.



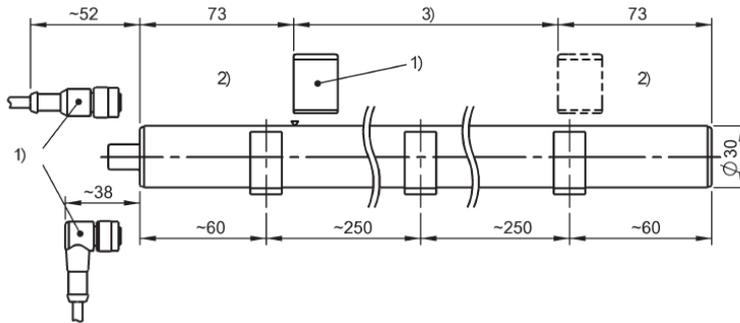
Ficha técnica

Característica	Valores
Curso	160 mm
Diâmetro do êmbolo	40 mm
Rosca da haste	M12x1,25
Amortecimento	PPV: Amortecimento pneumático regulável nas posições finais de curso
Posição de instalação	Nos dois lados
Conforme norma	ISO 15552
Extremidade da haste	Rosca externa
Princípio construtivo	Tubo perfilado Haste Êmbolo
Deteção de posição	Sem
Variantes	Haste do êmbolo unilateral
Pressão de trabalho	0,6 ... 12 bar
Modo de operação	de dupla ação
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Observação sobre meio operacional e do piloto	Permite operação com lubrificação (necessária para operações subsequentes)
Classe de resistência à corrosão KBK	2
Temperatura ambiente	-20 ... 80 °C
Autorização	Germanischer Lloyd
Energia de impacto nas posições finais	0,2 J
Curso de amortecimento	20 mm
Força teórica a 6 bar, retorno	633 N
Força teórica a 6 bar, avanço	754 N
Massa móvel com curso de 0 mm	307 g
Peso adicional por 10 mm de curso	45 g
Peso básico para curso de 0 mm	800 g
Fator de massa adicional por 10 mm de curso	16 g
Tipo de fixação	com acessórios com rosca interna
Conexão pneumática	G1/4
Observações sobre material	Conforme RoHS
Informação sobre material, tampão	Injetados de alumínio revestido
Informação sobre material, vedações	TPE-U(PU)
Informação sobre material, haste	Aço alta liga
Informação sobre material, camisa do cilindro	Liga de alumínio anodizado liso

Micropulse transducer

BTL6-A110-M0200-A1-S115
BTL0029

BALLUFF
sensors worldwide



1) Not incl. in scope of del. 2) Unusable area 3) Nom. stroke = Meas. length

- Series Profile
- Analog interface, voltage



General attributes

Approvals / Conformity

CE
cURus
IP67 (with connector)
Generation 6
Up to 36 V

Enclosure Type per IEC 60529

Generation

Polarity reversal protected

Electrical attributes

Connection type

Current draw (at 24 V DC)

Error signal Ua falling

Error signal Ua rising

For dynamic loop applications

Inrush current

Interface

Interface group

Non-linearity max.

Operating voltage UB max. DC [V]

Operating voltage UB min. DC [V]

Output signal

Overvoltage protected

Potential isolation

Ripple

Ripple Ua max.

Voltage resist (GND – housing)

Connector
≤ 70 mA
≥ 10.2 V
≥ 10.2 V
No
≤ 3 A / 0.5 ms
Analog interface, voltage
Analog
±200 µm
28.0 V
20.0 V
0...10 V and 10...0 V
Yes
No
0.5 Vpp
5 mV
500 V DC

Mechanical attributes

Nominal stroke

200 mm

Ambient temperature Ta max.

Ambient temperature Ta min.

Cable/connector out

Connector type

EN55016-2-3 (emission)

EN60068-2-27 (shock)

EN60068-2-29 (contin. shock)

EN60068-2-6 (vibration)

EN60068-2-64 (noise)

EN61000-4-2 (ESD)

EN61000-4-3 (RFI)

EN61000-4-4 (Burst)

EN61000-4-5 (Surge)

EN61000-4-6 (HF fields)

EN61000-4-8 (magnetic fields)

Housing material

Mounting type

Null point

Number of poles

Relative humidity

Repeat accuracy

Resolution

Sampling rate (length-depend.)

Storage temperature max.

Storage temperature min.

Style

TK, typ. (at 50 % of 500 mm)

Version

70 °C

0 °C

Axial

M12

Class A+B

50 g / 6 ms

12 g / 2 ms

12 g, 10...2000 Hz

5 g, 10...2000 Hz

Severity Level 3

Severity Level 3

Severity Level 3

Severity Level 2

Severity Level 3

Severity Level 4

Anodized aluminum

Mounting clamps

73.0 mm

8

< 90 %, non-condensing

≤ 10 µm

≤ 10 µm

1 kHz, standard

100 °C

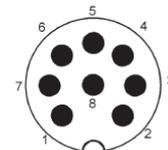
-40 °C

Series Profile

≤ 35 ppm/K

Type A1

Pin	
1	GND output
2	GND output
3	10...0 V
4	NC
5	0...10 V
6	GND
7	+24 V DC
8	NC



ANEXO G – CATÁLOGO TRANSDUTOR PROPORCIONAL DE PRESSÃO

Transdutor proporcional de pressão Série ITV1000/2000/3000

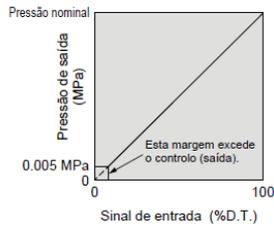
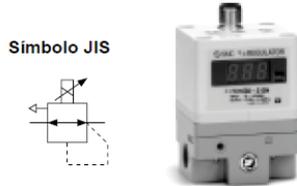


Tabela de características de entrada/saída

Características standard

Modelo	ITV101□	ITV103□	ITV105□
	ITV201□	ITV203□	ITV205□
	ITV301□	ITV303□	ITV305□
Pressão mín. de alimentação	Pressão definida +0.1 MPa		
Pressão máx. de alimentação	0.2 MPa	1.0 MPa	
Margem da pressão de ajuste ^(Nota 1)	0.005 a 0.1 MPa	0.005 a 0.5 MPa	0.005 a 0.9 MPa
Fonte de alimentação	Tensão	24 VCC ± 10%, 12 a 15 VCC	
	Consumo de corrente	Tensão da fonte de alimentação 24 VCC: 0.12 A ou menos Tensão da fonte de alimentação 12 a 15 VCC: 0.18 A ou menos	
Sinal de entrada	Tipo de corrente ^(Nota 2)	4 a 20 mA, 0 a 20 mA (PLC com COM+)	
	Tipo de tensão	0 a 5 VCC, 0 a 10 VCC	
	Entrada pré-ajustada	4 pontos	
Impedância de entrada	Tipo de corrente	250 Ω ou menos	
	Tipo de tensão	Aprox. 6.5 kΩ	
	Entrada pré-ajustada	Aprox. 2.7 kΩ	
Sinal de saída ^(Nota 3) (saída do monitor)	Saída analógica	1 a 5 VCC (Impedância da carga: 1 kΩ ou mais)	
	Saída digital	Saída colectador aberto NPN: Máx. 30 V, 30 mA Saída colectador aberto PNP: Máx. 30 mA	
Linearidade	Cerca de ±1% (distância total)		
Histerese	Cerca de 0.5% (distância total)		
Repetitividade	Cerca de ±0.5% (distância total)		
Sensibilidade	Cerca de 0.2% (distância total)		
Características da temperatura	Cerca de ±0.12% (distância total)/°C		
Visor da pressão de saída	Precisão	±3% (distância total)	
	Unidade mínima	MPa: 0.01, kgf/cm ² : 0.01, bar: 0.01, PSI: 0.1 ^(Nota 4) , kPa: 1	
Temperatura ambiente e do fluido	0 a 50°C sem condensação		
Protecção	IP65		
Peso	ITV10□□	Aprox. 250 g sem opções	
	ITV20□□	Aprox. 350 g sem opções	
	ITV30□□	Aprox. 645 g sem opções	

Nota 1) Consulte, no gráfico 1, a relação das diferenças entre a pressão ajustada e a entrada. Além disso, consulte a página 18 para a margem da pressão definida por unidades da pressão medida standard. Além disso, consulte a página 18 para saber as diferenças da pressão máxima definida na unidade de medida standard.
 Nota 2) Não está disponível o modelo de 2 fios com 4 a 20 mA. É necessária uma tensão da fonte de alimentação (24 VCC ou 12 a 15 VCC).
 Nota 3) Selecciona entre saída analógica ou saída digital. Para além disso, quando a saída digital é seleccionada, seccionada, secciona saída NPN ou PNP.
 Nota 4) A unidade mínima para ITV205□ é 1 PSI.
 Nota 5) As características referidas acima estão limitadas ao estado estático. Quando o ar é consumido no lado de saída, a pressão pode flutuar.

Como encomendar

ITV 3 0 1 0 - 0 1 2 S - Q

Modelo

1	1000
2	2000
3	3000

Margem de pressão

1	0.1 MPa
3	0.5 MPa
5	0.9 MPa

Tensão da fonte de alimentação

0	Corrente 4 a 20 mA (PLC com COM+)
1	Corrente 0 a 20 mA (PLC com COM+)
2	Tensão 0 a 5 VCC
3	Tensão 0 a 10 VCC
4*	Entrada pré-ajustada

* Opções

Saída do monitor

0*	Nenhum (para entrada pré-ajustada)
1	Saída analógica 1 a 5V CC
2*	Saída do detector/saída NPN
3*	Saída do detector/saída PNP

* Opções

Tipo de rosca

-	Rc
N*	NPT
T*	NPTF
F*	G

* Opções

Rosca lig.

1	1/8 (tipo 1000)
2	1/4 (tipo 1000, 2000, 3000)
3	3/8 (tipo 2000, 3000)
4	1/2 (tipo 3000)

Unidade do visor da pressão

-	MPa
2	kgf/cm ²
3	bar
4	PSI
5	kPa

Cumprimento das normas CE

Q	Cumprimento das normas CE
---	---------------------------

Tipo de cabo de ligação

S	Linha recta 3 m
L*	Ângulo recto 3 m
N*	Sem ligação do cabo

* Opções

Suporte

-	Sem suporte
B*	Suporte plano
C*	Suporte em L

* Opções

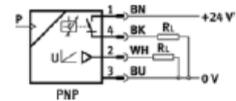
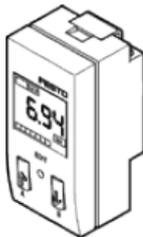


Sensor de pressão SDE1-D10-G2-R18-C-PU-M8

Código da peça: 529958

FESTO

Com conector versão M8.



Ficha técnica

Característica	Valores
Autorização	C-Tick c UL us - Recognized (OL)
Certificação CE (veja Declaração de Conformidade)	conforme Diretriz EU-EMV
Observações sobre material	Isento de cobre e PTFE Conforme RoHS
Variável	Pressão relativa
Método de medição	Transmissor eletrônico de pressão piezoresistivo com indicador
Faixa de medição de pressão do valor inicial	0 bar
Faixa de medição de pressão do valor final	10 bar
Meio operacional	Ar comprimido conforme ISO 8573-1:2010 [7:4:4]
Observação sobre meio operacional e do piloto	Permite operação com lubrificação
Temperatura do meio	0 ... 50 °C
Temperatura ambiente	0 ... 50 °C
Precisão FS	2 %FS
Saída de comutação	PNP
Função de comutação	livremente programável
Função do elemento de comutação	Comutável
Capacidade de reprodução valor de comutação	0,3 %
Corrente máxima de saída	150 mA
Saída analógica	0 - 10 V
Resistência a curto-circuito	por pulso
Faixa de tensão operacional c.c.	15 ... 30 V
Proteção contra inversão de polaridade	para todas as conexões elétricas
Conexão elétrica	Conector design redondo conforme norma EN 60947-5-2 M8x1 de 4 pinos
Tipo de fixação	na unidade de conservação
Posição de instalação	Nos dois lados
Conexão pneumática	R1/8
Peso do produto	95 g
Informação sobre material, corpo	PA reforçado com POM
Tipo de indicador	LCD com fundo iluminado
Indicador do estado de comutação	LCD
Opções de ajuste	Teach-In
Proteção contra manipulação	PIN-Code
Faixa de ajuste dos valores limiares	2 ... 99,8 %
Faixa de ajuste da histerese	0 ... 90 %
Classe de proteção	IP65
Classe de resistência à corrosão KBK	2