

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL DE
APOIO AO PROCESSO DE SELEÇÃO DE GARRAS DE ROBÔS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO LUIZ DA COSTA GOUVÊA

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 1993

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL DE
APOIO AO PROCESSO DE SELEÇÃO DE GARRAS DE ROBÔS**

JOÃO LUIZ DA COSTA GOUVÊA

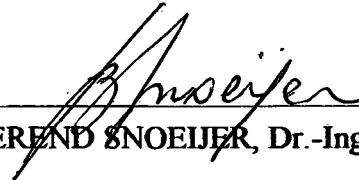
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO PROJETO, E APROVADA EM
SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. NELSON BACK, Ph.D. - ORIENTADOR

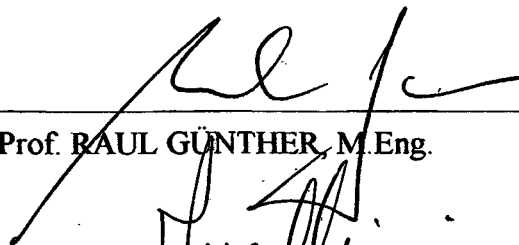


Prof. BEREND SNOELJER, Dr.-Ing. - COORDENADOR

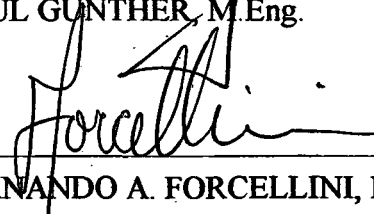
BANCA EXAMINADORA



Prof. NELSON BACK, Ph.D. - PRESIDENTE



Prof. RAUL GÜNTHER, M.Eng.



Prof. FERNANDO A. FORCELLINI, M.Eng.

**Dedico esta Dissertação
à minha família e aos meus amigos,
que são a coisa mais importante
que alguém pode ter.**

AGRADECIMENTOS

Ao fim deste trabalho, desejo agradecer a todos os que contribuíram para que este pudesse chegar a um bom termo, em especial:

Ao Prof. Nelson Back, pela orientação segura, e pela extrema compreensão e paciência, que testei ao limite.

Ao Prof. Raul Günther, pelas oportunas observações quanto ao conteúdo deste trabalho.

Ao colega Fernando Forcellini, pelo companheirismo e pelas longas conversas de fim-de-semana, dentro do Laboratório, sobre robótica e os mais diversos assuntos.

Aos futuros engenheiros Luciano André Mazzoca Dourado e Renato Miranda. Ao primeiro pela ajuda fundamental na elaboração do programa e pela boa disposição para o trabalho, mesmo que significasse varar algumas noites; ao segundo pela boa-vontade e presteza na confecção de muitos dos desenhos desta Dissertação.

À Verinha, a segunda mãe de todos nós, e à Clotilde, pela ajuda quando se tratava de contornar entraves burocráticos.

À CAPES, pelo apoio financeiro, e ao CPGEM, por ter possibilitado que este trabalho existisse.

Aos colegas do Laboratório de Projetos, pela agradável convivência diária.

Aos colegas da Pós-Graduação em especial, pela amizade e bons momentos que passamos juntos, dentro e fora da Universidade, sendo que algumas destas amizades tenho certeza que conservarei para sempre.

À minha família, pelo apoio, estímulo e carinho.

RESUMO

Os robôs vêm tendo uma importância cada vez maior na automação de processos industriais, e seu emprego tem resultado simultaneamente em uma grande melhoria na produtividade e na qualidade dos produtos.

As garras desempenham um papel fundamental em um sistema robótico, pois são os elementos responsáveis pelo manuseio da peça ou pelo trabalho executado sobre ela. Desta forma, seu projeto e utilização adequados são fundamentais para o bom desempenho do sistema.

A maioria dos robôs não vem equipada com garras. Considerando-se que a versatilidade e a programabilidade distinguem os robôs industriais modernos, a estratégia dos fabricantes, em muitos casos, é construir apenas o braço do manipulador, deixando para o usuário as tarefas de escolha, adaptação e desenvolvimento das garras. Desta forma, os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento de garras têm sido fragmentados, e de certa forma descoordenados, e têm resultado em um número muito grande de variantes de garras. Devido à multiplicidade de exigências, as garras têm sido quase que exclusivamente projetadas para aplicações específicas.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema computacional de apoio ao processo de seleção de garras de robôs, respeitando as exigências e restrições da tarefa a ser executada, do tipo de peça, seu material, peso, forma, as condições ambientais em que dar-se-á o processo etc., de modo a otimizar a aplicação da garra.

ABSTRACT

Industrial robots are having a continually greater importance in the automation of industrial processes, and their utilisation has resulted simultaneously in an improvement in productivity and product quality.

Grippers play a fundamental role in a robotic system, for they are the elements responsible for the handling of workpieces or the work realized over them. In this way, their adequate design and implementation are fundamental for the system's good performance.

Most robots are delivered without grippers. Considering that versatility and programmability characterize modern industrial robots, robot makers' strategy, in many cases, is to build only the manipulator arm, and let to the customer the tasks of choosing, adapting and developing grippers. In this way, research and development in the field of grippers have been fragmented, and somehow discoordinated, and have resulted in a large number of gripper variants. Thanks to the multiplicity of requirements, grippers have been designed almost exclusively for specific applications.

The goal of this work is the development of a computer system for supporting the gripper selection process, according to the requirements and constraints imposed by the task to be done, the type of workpiece, environmental conditions of the workplace etc., aiming to optimize the gripper application.

RESUMEN

Los robots tienen una importancia cada vez mayor en la automatización de procesos industriales, y su empleo ha conducido simultáneamente a una gran mejoría en la productividad y en la calidad de los productos.

Las garras poseen un papel fundamental en un sistema robótico, pues son los elementos responsables por el manuseo de la pieza o por el trabajo ejecutado sobre ella. De esta forma, su diseño y utilización son fundamentales para el buen desempeño del sistema.

La mayoría de los robots no viene equipada con garras. Considerándose que la versatilidad y la programabilidad distinguen los robots industriales modernos, la estrategia de los fabricantes, en muchos casos, es construir solamente el brazo del manipulador, dejando a los usuarios las tareas de selección, adaptación y desarrollo de las garras. Así, los trabajos de pesquisa y desarrollo de garras han sido fragmentados, y de cierta manera descoordinados, y han resultado en un número muy grande de variantes de garras. Debido a la multiplicidad de exigencias, las garras han sido casi exclusivamente diseñadas para aplicaciones específicas.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un sistema computacional de apoyo al proceso de selección de garras para robots. Son respetadas las exigencias y restricciones de la tarea a ser ejecutada, el tipo de pieza, su material, peso, forma, las condiciones ambientales en donde ocurrirá el proceso etc., a fin de optimizar su aplicación.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Industrieroboter werden immer wichtiger bei der Automatisierung von Industrieverfahren, und ihre Anwendung resultiert in einer großen Verbesserung der Produktivität und Produktqualität.

Die Greifer spielen eine grundsätzliche Rolle auf einem Robotersystem, da sie die für die Werkstücksmanipulation oder für die auf dem Werkstück realisierte Arbeit verantwortliche Elemente sind. Auf dieser Weise sind das geeignete Projekt und die geeignete Anwendung von Greifern für den guten Erfolg des Systems ausschlaggebend.

Die Mehrheit der Industrieroboter werden nicht mit Greifern ausgeliefert. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Versatilität und Programmierbarkeit die modernen Industrieroboter kennzeichnen, bauen die Hersteller in vielen Fällen nur den Roboterarm und überlassen dem Anwender die für die Greiferauswahl, -adaptation und -entwicklung notwendigen Arbeiten. Dann sind die Forschungs- und Entwicklungsprozesse im Bereich des Greifers fragmentiert und sowieso unkoordiniert. Es ist so eine Vielzahl von Greifervarianten entstanden. Wegen der Vielfältigkeit der Erfordernisse werden die Greifer fast ausschließlich für spezifische Handhabeaufgaben gebaut.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Computersystemes zur Unterstützung der Robotergreiferauswahl, hinsichtlich der Anforderungen und Beschränkungen der anzurichtenden Aufgabe, des Werkstückstyps, -werkstoffs, -gewichts, der Umweltbedingungen des Arbeitsplatzes usw., um die Greiferanwendung zu optimieren.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO

1.1. Resumo histórico da robótica	1
1.2. Utilização atual dos robôs industriais	2
1.3. Situação atual do desenvolvimento de garras	4
1.4. Objetivo e conteúdo deste trabalho	5

2. GARRAS

2.1. Introdução	7
2.2. Constituintes de uma garra	7
2.2.1. Flange de montagem	8
2.2.2. Acionamento	8
2.2.3. Mecanismos	11
2.2.4. Acessórios	13
2.2.5. Sistema de controle e sensores	13
2.3. Tipos de garras	14
2.3.1. Sistemas de ação unilateral	15
2.3.1.1. Garras de sucção	15
2.3.1.2. Garras magnéticas	20
2.3.1.3. Outros sistemas	23
2.3.2. Sistemas de ação bilateral	25
2.3.2.1. Movimentos dos dedos	26
2.3.2.2. Dispositivos de acionamento das garras	30
2.3.2.3. Pontas dos dedos	34
2.3.3. Sistemas de ação multilateral	36
2.3.3.1. Garras de dedos mecânicos	37

2.3.3.2. Garras de dedos pneumáticos	40
2.3.3.3. Outros sistemas	41
2.4. Ferramentas	45
3. PARÂMETROS E REQUISITOS PARA A SELEÇÃO DE GARRAS	
3.1. Introdução	47
3.2. Características da peça	48
3.2.1. Geometria	48
3.2.2. Dimensões e tolerâncias	59
3.2.3. Peso	61
3.2.4. Material	62
3.2.5. Estado superficial	62
3.2.6. Temperatura	63
3.3. Características da garra	64
3.3.1. Peso	64
3.3.2. Dimensões	64
3.3.3. Força de preensão	65
3.3.4. Área de contato na peça	65
3.3.5. Capacidade de abertura da garra	66
3.3.6. Movimento dos dedos	67
3.3.7. Acionamento	68
3.3.8. Conexão com o robô	69
3.3.9. Custos	71
3.4. Posicionamento das peças na garra	72
3.4.1. Peças cilíndricas	72
3.4.2. Peças de formas irregulares	73
3.5. Tarefa	74
3.5.1. Tipo de tarefa	75
3.5.2. Número de peças diferentes	75

3.5.3. Volume de produção	79
3.5.4. Ciclo de trabalho	79
3.5.5. Precisão posicional	81
3.6. Condições ambientais	83
3.6.1. Temperatura ambiental	83
3.6.2. Contaminação	84
3.6.3. Restrições físicas	84
3.7. Segurança	86
4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL	
4.1. Introdução	88
4.2. Sistemas especialistas	89
4.2.1. Definição	89
4.2.2. Princípio de funcionamento	90
4.3. Desenvolvimento do sistema computacional	94
4.3.1. Geometria da peça	94
4.3.2. Processo de aprendizado	110
4.3.3. Outros parâmetros da peça	112
4.3.4. Parâmetros relativos ao ambiente e à segurança	113
4.3.4.1. Condições ambientais	113
4.3.4.2. Segurança	114
5. RESULTADOS	
5.1. Introdução	115
5.2. Testes do programa	116
6. CONCLUSÕES	128
BIBLIOGRAFIA	131
APÊNDICE A - SENSORES	
A.1. Introdução	i
A.2. Sensores táteis	iii

A.2.1. Sensores de toque	iii
A.2.2. Sensores de força	iv
A.2.3. Sensores de escorregamento	vi
2.4.1.4. Sensores de torque	viii
A.3. Sensores de proximidade	ix
A.3.1. Sensores indutivos	ix
A.3.2. Sensores por efeito Hall	x
A.3.3. Sensores capacitivos	xi
A.3.4. Sensores ultrassônicos	xii
A.3.5. Sensores óticos	xii
A.3.6. Sensores pneumáticos	xiii
A.4. Sensores de distância	xiv
A.4.1. Técnicas de medição de distância	xiv
A.4.2. Sensores visuais	xv
APÊNDICE B - MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA	xviii

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. BREVE HISTÓRICO DA ROBÓTICA

O termo robô deriva-se da expressão tcheca *robota*, que significa servidão, escravidão ou trabalho forçado. Na sua atual acepção, foi criado pelo escritor tcheco Karel Capek na sua peça R.U.R. (Rossum's Universal Robots) que estreou em Praga a 25 de Janeiro de 1921. Seus robôs parecem-se com pessoas, mas são desprovidos de sentimentos e trabalham o dobro de um ser humano normal [1,2].

Os robôs modernos surgiram a partir da combinação de duas tecnologias já existentes: o controle numérico para máquinas-ferramenta e a manipulação remota. Sua origem remonta a 1954, quando George C. Devol requereu a patente de um braço mecânico controlado para a movimentação de peças e reivindicou o conceito básico de "aprendizado/repetição" para controlar o equipamento, sistema que é agora amplamente usado nos robôs atuais. O primeiro robô foi instalado pela Unimation Inc. em 1961, mas só a partir da década de setenta os robôs passaram a desempenhar um papel de destaque na produção. Atualmente o termo robô é usado para designar equipamentos mecânicos de manipulação que utilizam computadores como parte integrante do seu controle e são capazes de operações autogovernadas [1,3].

A Divisão Internacional de Robótica da Society of Manufacturing Engineers define o robô industrial como "um manipulador multifuncional reprogramável projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especializados, por meio de movimentos programados variáveis, para a execução de uma variedade de tarefas" [1,14].

1.2. UTILIZAÇÃO ATUAL DOS ROBÔS INDUSTRIAIS

A contínua automatização dos processos produtivos tem abrangido áreas cada vez maiores e levado cada vez mais a soluções complexas para os problemas daí resultantes. À medida em que foram avançando os esforços para automatização das operações básicas e auxiliares que ocorrem diretamente nas máquinas, começaram também a ser consideradas as operações de carregamento e descarregamento destas máquinas, executadas manualmente, bem como os processos produtivos nos quais ferramentas e materiais são manuseados pelas pessoas.

Os robôs são a ferramenta mais poderosa para a automatização destes processos. Sendo máquinas programáveis, não se enfadam, e assim podem executar, sem problemas, trabalhos repetitivos ou considerados desagradáveis, tediosos ou maçantes pelas pessoas. Eles podem trabalhar três turnos por dia, sem necessidade de pausas e sem variações na produtividade no segundo e terceiro turnos. Foi constatado um tempo útil de até 98% e reportada uma melhoria na produtividade de até 67%. Os robôs permitem ainda eliminar a incidência de produtos defeituosos ou inferiores que ocorrem durante o início da produção, conseguindo um produto de qualidade mais consistente e uniforme, reduzindo o retrabalho e o volume de peças rejeitadas, e, conseqüentemente, simplificando o controle de qualidade [1,4,5,6,14].

Koren [1] diz, inclusive, que a melhor qualidade dos produtos obtida por intermédio dos robôs, mais que a maior produtividade, é às vezes considerada como sua mais importante contribuição. Cita, como exemplo, que um robô instruído para fazer 20 pontos de solda em um carro sempre fará 20 pontos, ao passo que um operário poderá eventualmente fazer menos pontos. Assim, neste caso, existe a vantagem adicional de ser possível especificar, no projeto, um número menor de pontos de solda, pois as soldas por margem de segurança, devido à incerteza sobre a sua execução, podem ser reduzidas ou eliminadas, o que permite também um aumento na produtividade.

Além do aumento de produtividade e qualidade conseguido com a instalação dos robôs, outra característica que os torna cada vez mais atraentes para utilizações industriais é a sua flexibilidade.

Os sistemas totalmente automatizados que foram desenvolvidos para produção em massa (p.ex. as linhas de montagem da indústria automobilística) são rígidos e não adequados para produção de lotes (séries maiores que 50 peças e com produção não maior que 100.000 peças anuais) [1].

Mais do que uma grande quantidade do mesmo produto por um longo período, os sistemas modernos de manufatura devem fabricar uma variedade maior de produtos em pequenos lotes, e freqüentes mudanças de modelos e planos de produção exigem flexibilidade do sistema de manufatura. Nos últimos anos, o ciclo de vida de produtos de alta tecnologia foi drasticamente reduzido, e hoje a maior parte destes produtos tem um ciclo de vida de cerca de quatro anos [15].

Quando se necessita de uma modificação de grande envergadura no produto, uma linha de produção específica (e que exige um grande aporte de capital) torna-se inaproveitável. Usando-se robôs, e tendo-se um arranjo simples e adequado das máquinas, apenas com a alteração do programa e dos dados armazenados na memória do computador, pode-se variar o produto final da fábrica. Ganha-se, assim, maior agilidade para satisfazer a diferentes especificações para uma dada linha de produtos e para introduzir novos modelos mais rapidamente [5,96].

Os robôs têm encontrado aplicações cada vez maiores. Eles são idealmente adequados para a execução de trabalhos perigosos ou em ambientes insalubres, tais como o manuseio de peças quentes ou materiais radioativos, liberando as pessoas dos riscos inerentes a tais tarefas e permitindo, ainda, uma economia com dispositivos para atender às normas de segurança industrial, como por exemplo sistemas de renovação de ar para os ambientes onde se faz pintura em spray.

Atualmente, entre as suas principais aplicações industriais estão o carregamento e descarregamento de máquinas-ferramenta, manuseio em processos de fabricação, soldagem, pintura em spray, montagem, usinagem, p.ex. rebarbamento e perfuração, e inspeção.

A tendência é robotizar outras tarefas no futuro, especialmente serviços perigosos tais como combate a incêndios, mineração, reparo de linhas de alta tensão, etc. [93].

Além destas, existe uma vasta gama de aplicações não industriais para robôs, por

exemplo robôs para desempenhar tarefas domésticas, para auxiliar paralíticos e convalescentes, realizar cirurgias, montagem de estruturas no espaço, etc.

Na evolução das aplicações dos robôs, o próximo passo previsto é a fábrica totalmente automatizada, na qual toda operação, do projeto do produto à fabricação, montagem e inspeção, será monitorada e controlada por computadores e executada por robôs e sistemas inteligentes. A principal característica destas fábricas será a flexibilidade, alcançada graças aos progressos em tecnologia de computadores e técnicas de programação [1,121].

Segundo Kafri [6], os avanços que estão ocorrendo na robótica, um maior volume de robôs produzidos e a entrada de grandes companhias de informática neste ramo poderão acarretar enormes reduções de preços de robôs de alta tecnologia.

Como foi visto, os robôs vêm tendo uma importância cada vez maior na automação de processos industriais, e seu emprego tem resultado simultaneamente em uma grande melhoria na produtividade e na qualidade dos produtos.

1.3. SITUAÇÃO ATUAL DO DESENVOLVIMENTO DE GARRAS

As garras ou efetuadores são os dispositivos do robô através dos quais o trabalho é realizado. São elas os elementos responsáveis pelo manuseio da peça ou pelo trabalho executado sobre ela, desempenhando, assim, um papel fundamental em um sistema robótico. Desta forma, seu projeto e utilização adequados são fundamentais para o bom desempenho do sistema. Não importa quão sofisticado seja o braço, se o efetuator não é adequado à tarefa, esta não pode ser executada satisfatoriamente [7, 17].

Ao longo dos últimos anos, extensas pesquisas têm sido conduzidas para se realizar o sonho de uma garra universal, com o desenvolvimento de sistemas complexos de agarramento que tentam emular os 32 graus de liberdade da mão humana, com seus milhares de sensores de posição, força e temperatura. Mas os modelos desenvolvidos até agora neste sentido são

complexos e caros.

A maioria dos robôs não vem equipada com garras. Considerando-se que a versatilidade e a programabilidade distinguem os robôs industriais modernos, a estratégia dos fabricantes, em muitos casos, é construir apenas o braço do manipulador, deixando para o usuário as tarefas de escolha, adaptação e desenvolvimento das garras. Desta forma, o trabalho de pesquisa e desenvolvimento de garras tem sido fragmentado, e de certa forma descoordenado. Assim, as pesquisas têm resultado em um número muito grande de variantes de garras. Devido à multiplicidade de exigências, as garras têm sido quase que exclusivamente projetadas para aplicações específicas.

As garras atualmente têm-se constituído em um dos principais fatores limitantes a uma utilização universal dos robôs. A literatura tem refletido a busca de um compromisso econômico entre a utilização de garras desenvolvidas para uma tarefa específica, e os custos necessários ao desenvolvimento e fabricação de uma nova garra, que atenda a uma modificação na tarefa [4,6-10].

1.4. CONTEÚDO DESTA TRABALHO

Pelo que foi discutido na seção anterior, pode-se ver que a solução encontrada para o problema de se selecionar e projetar uma garra para um robô terá importantes efeitos sobre a adequação e a eficiência com que este desempenhará suas tarefas.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema computacional que auxilie no processo de seleção de garras de robôs, respeitando os requisitos e restrições impostos por fatores tais como o tipo de peça, seu material, peso, forma, as condições ambientais em que dar-se-á o processo, etc., de modo a otimizar sua aplicação.

No Capítulo 2 é apresentado o estudo dos diversos tipos de garras existentes. No Capítulo 3 são discutidos os parâmetros e requisitos para a seleção e projeto de garras. No

Capítulo 4 é feita a descrição do programa, com base nos requisitos discutidos. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do programa. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais.

CAPÍTULO 2

GARRAS

2.1.INTRODUÇÃO

A garra é o dispositivo montado na extremidade de um manipulador e que lhe permite pegar peças e segurá-las, manipulá-las, transferi-las, posicioná-las e depositá-las corretamente em uma posição discreta.

As garras são uma das partes mais importantes de um robô, pois são os elementos do robô industrial que estão em contato direto com as peças a serem manuseadas, constituindo-se assim na interface entre o robô e o meio ambiente, ou seja, o elemento através do qual o robô realiza suas funções. Sem elas o robô não pode funcionar adequadamente, de acordo com o grau de sofisticação que deve possuir [7,28].

Neste capítulo é feita a descrição dos vários tipos de garras existentes, bem como o estudo de seus subsistemas de preensão e movimentação. A partir destes dados são levantados os requisitos e parâmetros a serem considerados no Capítulo 3.

2.2. ÓRGÃOS CONSTITUINTES DE UMA GARRA

As garras são constituídas por diferentes subsistemas, descritos a seguir, Figura 2.1. As garras não possuem necessariamente todos estes elementos, podendo constituir-se apenas da combinação de alguns deles.

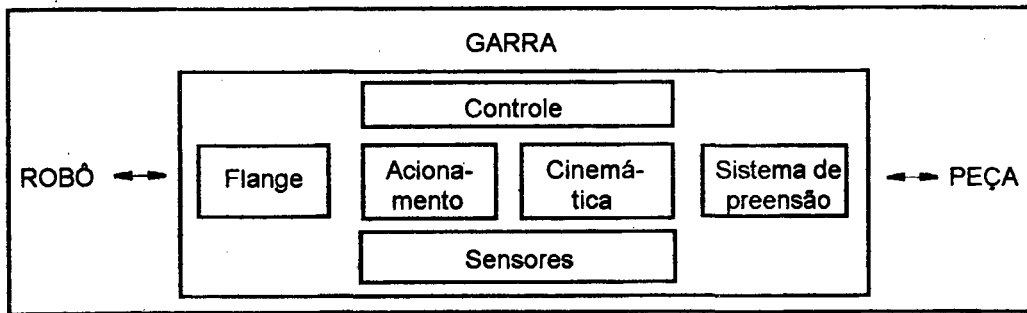


Fig. 2.1 - Constituintes de uma garra [8]

2.2.1. FLANGE DE MONTAGEM

O flange de montagem é a interface entre o braço do robô e o efetuator, sendo sua função primordial fazer uma conexão segura entre estes. Esta interface deve suportar o efetuator estruturalmente, fornecer-lhe energia e transportar informações de e para ele.

Esta interface deve ser confiável e, no caso de muitas garras serem utilizadas para o manuseio de diferentes peças com um robô, deve ser projetada para permitir uma rápida conexão e desconexão. O manipulador não deveria precisar ser posicionado com extrema acurácia para se efetuarem as conexões.

O equipamento de interface deve ser impermeável a quaisquer danos ambientais que possam ocorrer, tais como umidade, óleo, cavacos metálicos e colisões ocasionais [5,8].

2.2.2. ACIONAMENTO

Os acionamentos têm a função de converter a energia fornecida às garras em movimento das suas ligações. (O vácuo fornecido aos bocais das garras de sucção não é denominado acionamento da garra, já que a pressão negativa não é convertida em movimento, mas usada para aplicar as forças de retenção). Os tipos de acionamento de garras que atualmente encontram uma utilização generalizada estão descritos na Figura 2.2.

Os acionamentos mais comuns são cilindros pneumáticos, que são baratos e leves. Como um suprimento pneumático de energia encontra-se disponível em quase todas as fábricas, garras e

atuadores pneumáticos são largamente utilizados em robôs industriais para uma grande variedade de diferentes tarefas. Além disso, o suprimento de energia para estes cilindros é feito por tubos flexíveis que, na maioria dos casos, causam menores transtornos do que as tubulações hidráulicas ou cabos para motores elétricos [8].

Tipo de Acionamento	Movimento de Acionamento
1 Acionamento elétrico	
1.1 Motor de passo	rotacional
1.2 Motor CC	rotacional
2 Acionamento pneumático	
2.1 Cilindro pneumático	linear
2.2 Motor a ar comprimido (alta velocidade)	rotacional
2.3 Cilindro giratório (baixa velocidade, ângulo de rotação limitado)	rotacional
3 Acionamento hidráulico	
3.1 Cilindro hidráulico	linear
3.2 Motor hidráulico (ângulo de rotação ilimitado)	rotacional
3.3 Cilindro giratório (ângulo de rotação limitado)	rotacional

Fig. 2.2 - Tipos de acionamento de garras [8]

Por causa do pequeno volume total, os cilindros hidráulicos são geralmente escolhidos para grandes forças de agarramento, pois apresentam uma melhor relação força/volume. O tipo de acionamento das garras deve, se possível, ser o mesmo do usado para o acionamento do robô, de forma a simplificar o sistema de suprimento de energia.

As principais vantagens e desvantagens dos atuadores elétricos, hidráulicos e pneumáticos estão listadas a seguir [6]:

Acionamentos elétricos

Vantagens

1. São rápidos e precisos
2. É possível a aplicação de técnicas de controle sofisticadas

3. Facilmente disponíveis e relativamente baratos
4. Simples de usar

Desvantagens

1. Exigem engrenagens ou outros mecanismos para a transmissão de potência
2. Folga nas engrenagens limita a precisão
3. Pode haver ocorrência de arco elétrico
4. Limite de potência

Acionamentos hidráulicos

Vantagens

1. Grande capacidade de carga
2. Velocidade moderada
3. O óleo é incompressível. Assim, uma vez posicionadas, as articulações podem ser mantidas firmes
4. Oferecem controle preciso

Desvantagens

1. Sistemas hidráulicos são caros
2. Poluem o ambiente com fluidos e ruídos
3. Não são adequados para ciclos a velocidades realmente altas

Acionamentos pneumáticos

Vantagens

1. Relativamente baratos
2. Altas velocidades
3. Não poluem o ambiente com fluidos
4. Podem ser usados em trabalho de laboratório

Desvantagens

1. A compressibilidade do ar limita sua acurácia
2. Poluição acústica ainda existe

3. Vazamento de ar é um grande problema
4. São necessários sistemas de filtragem e drenagem adicionais
5. Exigências adicionais de construção e manutenção.

2.2.3. MECANISMOS

Existe um grande número de mecanismos disponíveis para a conversão do movimento do dispositivo de acionamento em movimento dos dedos. O movimento rotativo ou linear do acionamento pode ser transformado em movimento linear, rotativo ou curvilíneo dos dedos.

Segundo Warnecke [8], esta conversão pode ser considerada sob dois aspectos:

- a. **Razão de velocidades:** o movimento das garras pode apresentar uma das seguintes razões entre a velocidade de acionamento e a velocidade dos dedos, ao longo do curso do dedo:
 - a.1. **Razão de velocidades constante:** neste caso, os dedos apresentarão uma velocidade constante de fechamento sobre a peça, se o acionamento possuir uma velocidade constante, ou uma velocidade que varia linearmente com a velocidade de acionamento.
 - a.2. **Razão de velocidades aumentando:** neste caso, mantendo-se constante a velocidade de acionamento, os dedos fechar-se-ão sobre a peça com uma velocidade cada vez maior.
 - a.3. **Razão de velocidades diminuindo:** neste caso, os dedos se fecham sobre a peça com velocidade cada vez menor, mantida constante a do acionamento.

A razão de velocidades também poderá apresentar eventualmente um máximo ou um mínimo ao longo do curso do dedo.

Em geral é aconselhável, para as garras, o uso de mecanismos que operam com uma razão de velocidades constante, ou uma razão de forças que varia ao longo do curso do dedo de tal forma que, à medida em que aumenta o diâmetro da peça, também aumente a força de preensão aplicada, já que o peso da peça tende a aumentar diretamente com o diâmetro.

b. *Movimento dos dedos*: conforme mostrado na Figura 2.3, os dedos, ao se fecharem sobre a peça, podem apresentar os seguintes movimentos:

- 1 - linear
- 2 - aproximadamente reto
- 3 - rotacional
- 4 - curvilíneo geral.

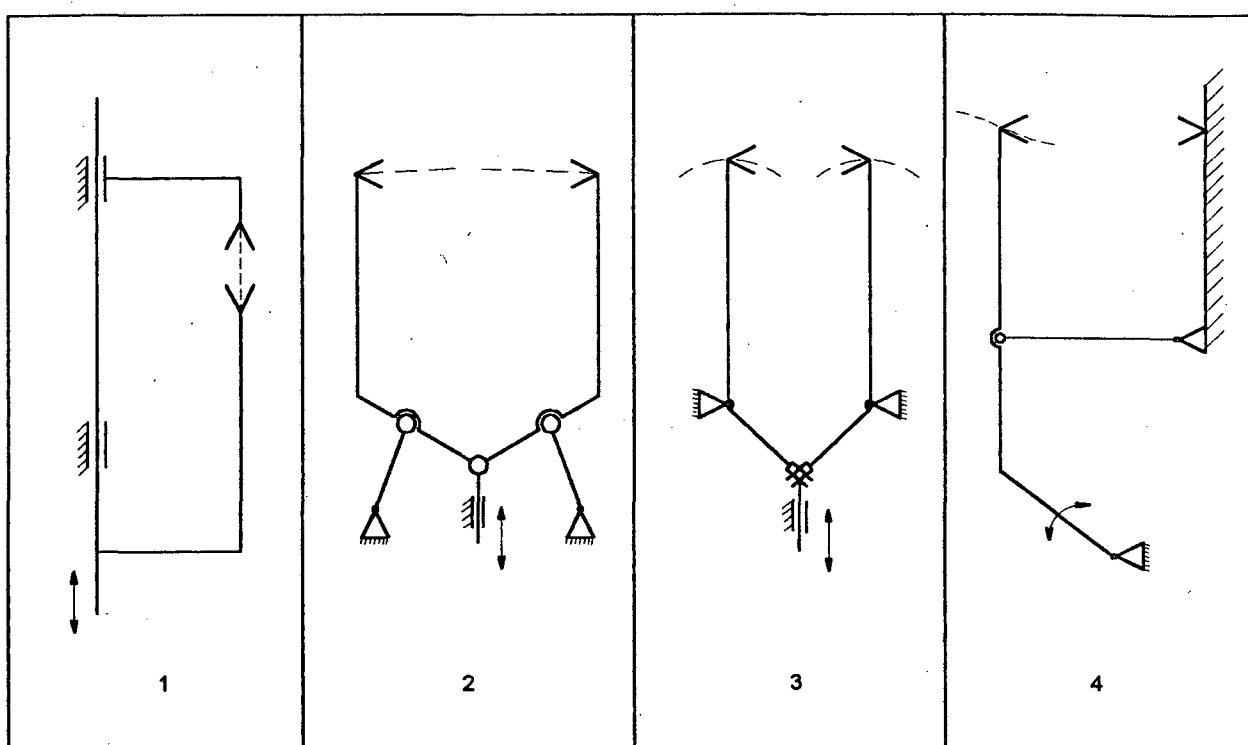


Fig. 2.3 - Movimentos dos dedos [8]

Mecanismos com movimento rotacional são geralmente usados porque são mais baratos, têm um projeto mais simples e são confiáveis, particularmente quando cilindros pneumáticos são usados como acionamento. Entretanto, têm a desvantagem de exigir maior esforço de programação que os mecanismos que fornecem movimento linear dos dedos, pois a localização do centro de gravidade da peça em relação às superfícies de contato depende do ângulo de abertura dos dedos [4,18].

Além disso, o movimento linear dos dedos é fácil de ser avaliado pelo programador, e assim é menos propenso a causar colisões. Estas desvantagens do movimento rotacional podem ser superadas com simulações usando CAD.

2.2.4. ACESSÓRIOS DAS GARRAS

Os acessórios são adicionados às garras com a função de fixar a posição da peça em relação a elas e, em última análise, em relação ao robô. Este ferramental deve ter elementos geometricamente adequados para esta finalidade, que correspondam às características das peças, como, por exemplo, sapatas pivotadas para compensar desvios no paralelismo de duas superfícies opostas.

A peça pode ser segura por aperto, forma ou contato, dependendo das propriedades do material dos acessórios, isto é, por forças normais, de atrito ou magnéticas.

Na prensão por contato, a peça é segura por forças que agem, principalmente, no plano normal às superfícies de contato entre a garra e a peça, como no caso das garras magnéticas, de sucção e das que utilizam materiais adesivos.

Na prensão por aperto, a força é exercida no plano paralelo às superfícies de contato, devido ao atrito que surge entre a garra e a peça, como no caso das garras de dedos rígidos.

Na prensão por forma, a peça é segura pelo fato de ser envolvida pela garra, em sua totalidade ou em uma porção significativa de sua superfície. Aqui, também, as forças atuantes entre a garra e a peça são principalmente normais às superfícies de contato.

2.2.5. SISTEMA DE CONTROLE E SENSORES

Os sensores externos permitem que o robô interaja com o meio-ambiente de uma forma flexível e independente. Através deles os robôs podem corrigir seu posicionamento em relação à peça ou desviar-se de obstáculos no espaço de trabalho.

Os sensores têm a função de coletar informações sobre a peça a ser manipulada e o

meio-ambiente, e monitorar a operação da garra.

Desta forma, a garra pode ser equipada com sensores de força, que medem o esforço sendo aplicado sobre a peça, ou sensores de escorregamento, que indicam se houve variação na posição da peça após ser segura pela garra. Os sensores de distância, por exemplo os sensores visuais, podem ser utilizados para se localizar uma peça sobre uma mesa.

A informação obtida pelos sensores é repassada à CPU do robô. Assim, o sistema de controle comanda as ações a serem tomadas pelo robô para o manuseio apropriado da peça. Desta forma, a informação visual pode ser utilizada para se obter o posicionamento e orientação adequados da garra para se executar a preensão, e a informação dos sensores de força pode ser usada para que não se exerça uma força excessiva sobre peças frágeis.

Os sensores estão discutidos com mais detalhes no Apêndice A. O sistema de controle do robô não será estudado, pois encontra-se fora do escopo deste trabalho.

2.3. TIPOS DE GARRAS

As garras podem ser classificadas de várias maneiras diferentes, como, por exemplo, o tipo de energia que utilizam, o tipo de seus órgãos de agarramento, o número de dedos, se a preensão é interna ou externa, etc.

Um aspecto essencial para sua classificação é a sistemática de agarramento, que resulta dos princípios físicos de agarramento, fixação e soltura. Assim será adotada a seguinte classificação dos sistemas de preensão [7]:

- Sistemas usando ação unilateral
- Sistemas usando ação bilateral
- Sistemas usando ação multilateral

2.3.1. GARRAS COM SISTEMAS DE AÇÃO UNILATERAL

Esta categoria inclui todos os dispositivos que entram em contato com apenas uma face do objeto a ser manipulado, e exercem sua força de atração sobre eles através de vácuo, magnetismo ou adesão.

2.3.1.1. Garras de sucção

Nas garras de sucção a fixação entre a garra e a peça é obtida por um vácuo parcial produzido no espaço existente entre o bocal da garra e a superfície da peça, Figura 2.4.

Os bocais são geralmente feitos de borracha (sintética ou natural) ou poliuretano. A força obtenível é dada por:

$$F = n A_s \Delta_p$$

onde n é o número de bocais atuantes, A_s é a área do bocal e Δ_p o diferencial de pressão entre o interior do bocal e a atmosfera externa.

Há um compromisso entre o tamanho do bocal e a pressão diferencial usada. Para uma obtenção mais rápida da força de preensão, é recomendável escolher a superfície de aspiração A_s grande e a diferença de pressão Δ_p pequena. A velocidade de soltura pode ser aumentada pela aplicação de uma pressão positiva dentro do bocal, imediatamente após o vácuo ser desligado.

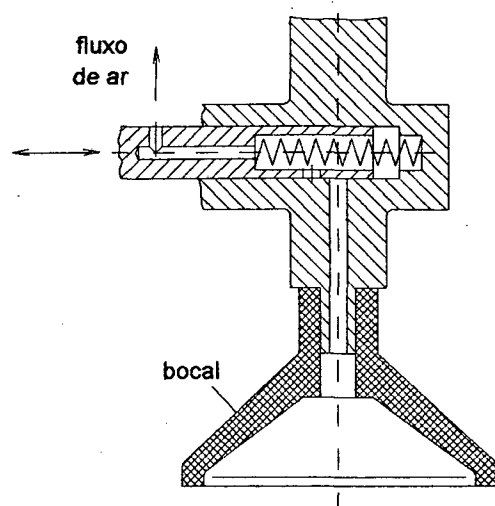


Fig. 2.4 - Garra de sucção [4]

A pressão negativa no bocal pode ser gerada por bombas de vácuo, por uma corrente de ar - através de um fluxo de ar comprimido passando por um venturi -, ou por retenção, através do vácuo natural obtido pressionando-se uma ventosa contra a superfície da peça, Figuras 2.5 e 2.6. A bomba de vácuo fornece um vácuo maior que o venturi e tem operação mais silenciosa, mas o venturi é em geral mais barato [11].

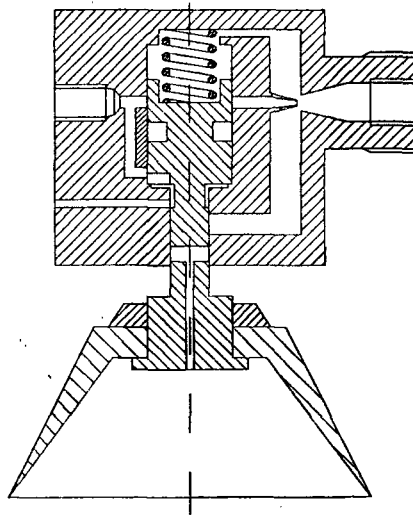


Fig. 2.5 - Garra de sucção usando venturi [7]

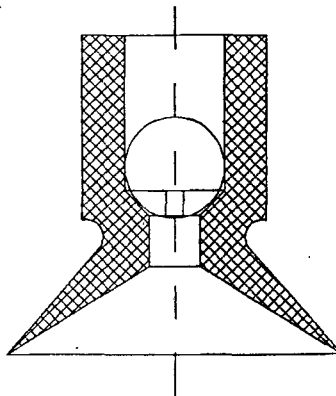


Fig. 2.6 - Garra de sucção por ventosa [19]

Os processos de sucção por vácuo e por corrente de ar adequam-se, especialmente, para peças com poucas superfícies de contato, lisas (mas podendo ser ásperas ou até mesmo porosas),

enquanto as ventosas só podem ser empregadas para peças com superfícies polidas contínuas e impermeáveis ao ar [4,19].

As garras de sucção podem ser adaptadas para acomodar muitas formas diferentes. Elas produzem uma força de levantamento facilmente controlável, e não deformam ou arranham os objetos que manipulam.

As garras de sucção só podem operar adequadamente sobre superfícies limpas e secas. A presença de óleo, agentes químicos ou cavacos pode inviabilizar sua aplicação. Estas garras não possuem a acurácia das garras de dedos mecânicos e estão limitadas a cargas relativamente pequenas e temperaturas abaixo de 95°C, no caso de bocais de borracha [12].

Outra condição para um funcionamento livre de perturbações das garras de sucção é o bom ajuste dos bocais sobre as superfícies das peças. Devido às propriedades elásticas dos bocais, ocorre na região de sucção um ajuste de forma com relação à superfície da peça. O ajuste adequado do bocal sobre a peça também pode ser conseguido, por exemplo, fixando-se os bocais sobre elementos esféricos ou elásticos, Figura 2.7.

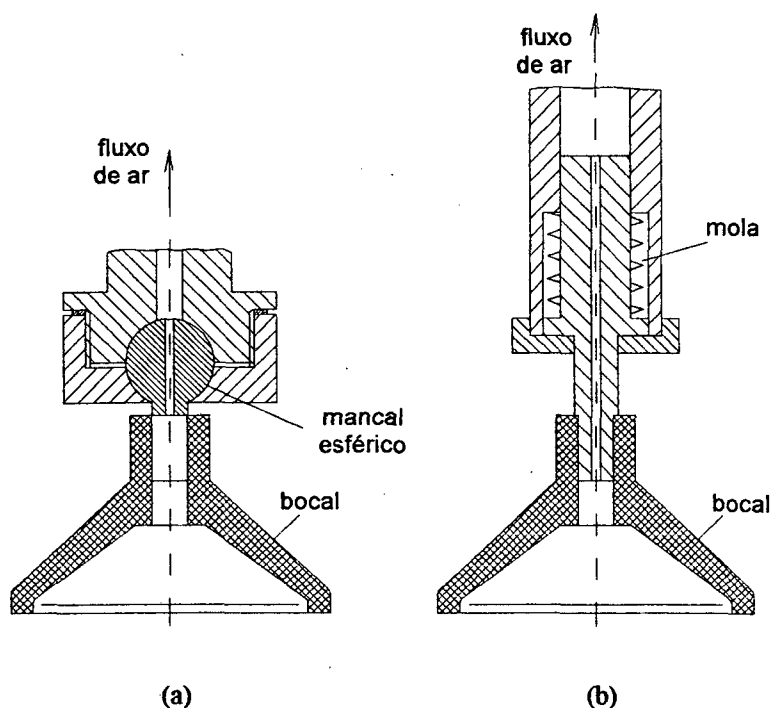


Fig. 2.7 - Dispositivos para o ajuste do bocal sobre a peça [4]

Na Figura 2.7-(a), a montagem do bocal de sucção em um mancal esférico permite uma movimentação angular do bocal, de forma que ele possa ajustar-se sobre superfícies possuindo um pequeno desvio angular. A montagem dos bocais sobre molas, Figura 2.7-(b), permite que o contato com a peça seja feito antes que o robô atinja a posição final de preensão. Isto possibilita que as garras se fixem à peça e já comecem a produzir o vácuo enquanto o robô ainda está desacelerando, reduzindo o tempo necessário à formação do vácuo dentro do bocal, e, conseqüentemente, o tempo do ciclo de trabalho.

As ventosas são pressionadas sobre a peça e produzem o vácuo devido à sua elasticidade. No caso de falta de energia, as ventosas são as mais adequadas do ponto de vista da segurança, embora seu controle operacional não seja tão simples como nos bocais operados por bombas de vácuo. Sua força de preensão máxima é de cerca de 140N, para um bocal de 63mm de diâmetro [4,12,19].

Em alguns casos, vazamentos podem ser aceitos se a abertura é pequena o bastante para garantir vácuo suficiente em conexão com a bomba de vácuo. Para peças pequenas, por exemplo rodas de engrenagem, que são em geral difíceis de serem pegas, garras de sucção deste tipo são geralmente usadas [8].

A força de retenção depende da qualidade superficial da peça e da eficiência da bomba de vácuo ou do venturi. Quando necessário, a força de preensão pode ser distribuída por vários bocais de sucção, para assegurar uma preensão sólida e estável, como é o caso da maioria das operações de manuseio de chapas metálicas, plásticos, vidros e papel.

Irregularidades na superfície da peça também podem tornar necessária a utilização de vários bocais de sucção. Idealmente, um grande número de pequenos bocais de sucção utilizariam a superfície da peça da melhor maneira. À medida em que os bocais têm seus diâmetros reduzidos e se tornam mais estreitamente espaçados, a preensão é menos afetada por irregularidades superficiais, Figura 2.8.

Tella *et al.* [20] desenvolveram uma garra a vácuo possuindo vinte bocais num arranjo de 4x5, Figura 2.9-(a). Esta garra parte do princípio de que um grande número de pequenos bocais utilizariam a superfície da peça de forma mais otimizada. À medida em que se reduzem os

diâmetros dos bocais e estes se tornam mais estreitamente espaçados, a fixação a vácuo é menos afetada pelas irregularidades das superfícies a serem manipuladas. Para adaptação às variações locais no ângulo da superfície, cada bocal foi equipado com uma articulação de rótula, Figura 2.9-(b).

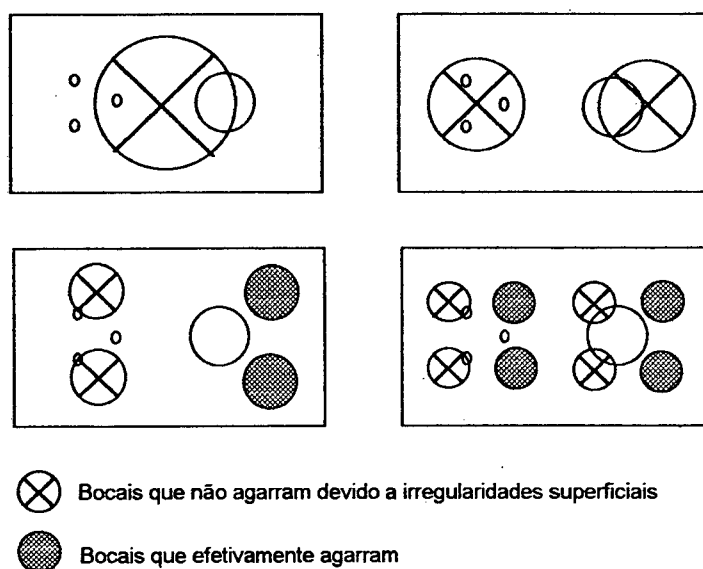


Fig. 2.8 - Preensão usando bocais de diversos diâmetros e espaçamentos[20]

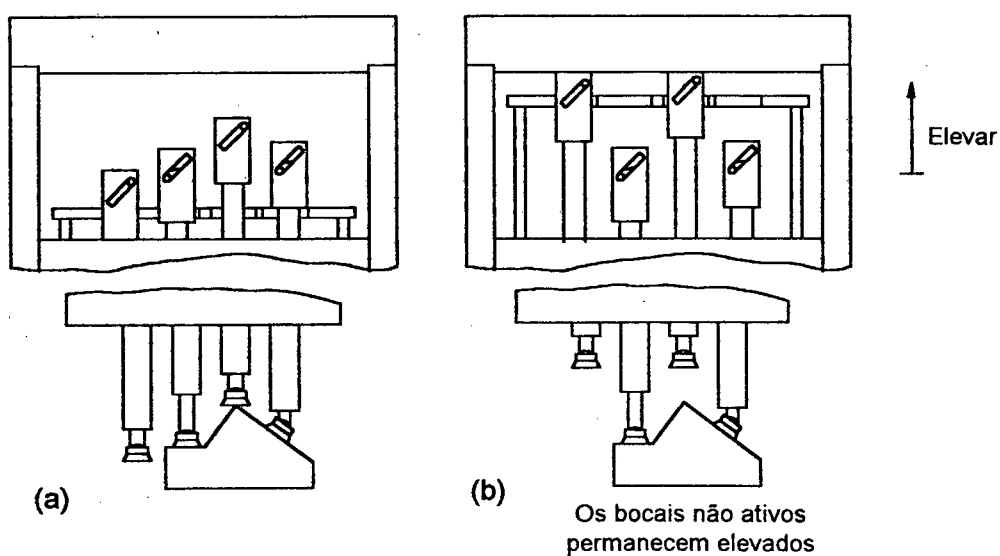


Fig. 2.9 - Garra de sucção com múltiplos bocais [20]

Volmer [4] apresenta uma relação de vantagens e desvantagens de garras de sucção:

Vantagens das garras de sucção

- é necessária apenas uma superfície de contato na peça,
- em geral não deformam ou arranham a peça,
- não são necessários acionamentos.

Desvantagens das garras de sucção

- é necessário um certo tempo para a formação do vácuo nas garras,
- se a peça for de material muito macio, pode haver perigo de deformação local na região de vedação da garra,
- ventosas necessitam de um pulso de ar comprimido para o desprendimento da peça,
- garras a vácuo e corrente de ar não produzem mais a força de fixação em caso de interrupção da aspiração ou da pressão de ar,
- garras por corrente de ar apresentam grande consumo; por isto são freqüentemente instaladas garras mecânicas adicionais para a prensão do objeto.

2.3.1.2. Garras magnéticas

As garras magnéticas são menos utilizadas [1]. Nelas é usada a força magnética de ímãs permanentes ou eletroímãs para se obter a fixação da garra sobre a peça. Obviamente, estas garras são úteis apenas para o manuseio de peças constituídas de material ferromagnético.

Estas garras requerem uma construção simples, apenas uma superfície de contato na peça, e apresentam nenhuma ou muito poucas peças sujeitas ao desgaste.

A força de prensão disponível resulta da área de contato A e de uma força específica f_A , relacionada à superfície:

$$F_G = A f_A$$

$$f_A = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

onde B é a indução magnética e μ_0 é a permeabilidade do material.

Os eletroímãs são usados mais frequentemente, pois sua utilização é mais fácil, isto é, podem ser controlados através da corrente na bobina, Figura 2.10. Eletroímãs exigem apenas um conduto simplificado de alimentação de energia, mas não há mais qualquer força de agarramento no caso de falta de energia.

Os ímãs permanentes são confiáveis e não consomem energia, mas exigem um mecanismo de soltura para separar a peça da garra, Figura 2.11-(a).

No caso de peças finas superpostas, por exemplo chapas, várias peças poderão ser pegas simultaneamente. Alguns mecanismos podem ser usados para evitar esta situação, como mostrado na Figura 2.11-(b).

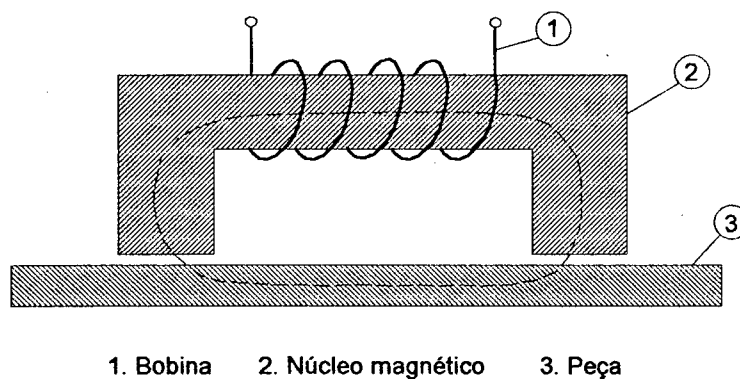


Fig. 2.10 - Princípio de prensão usando eletroímã em uma superfície plana

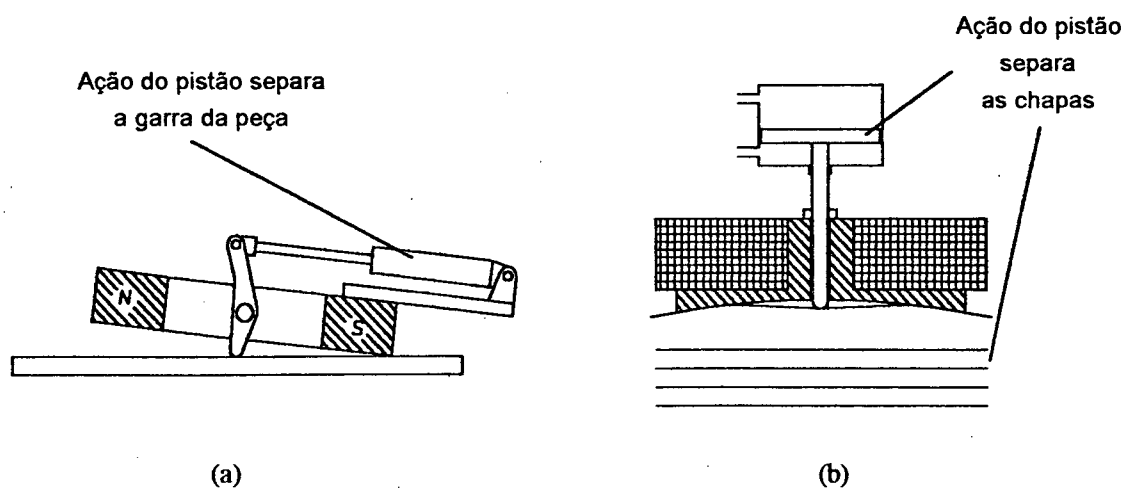
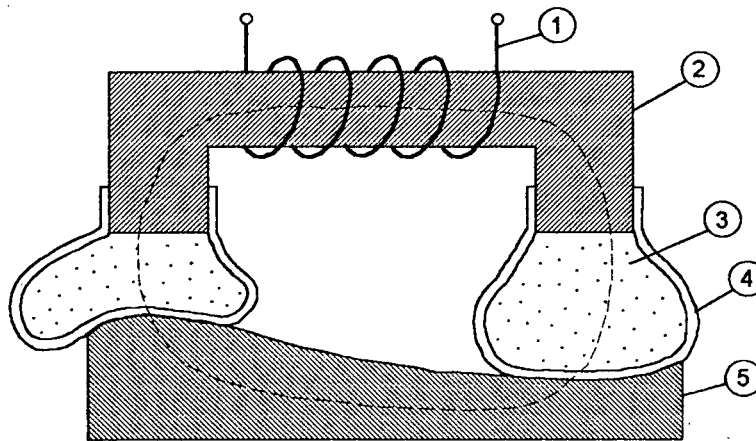


Fig. 2.11 - Garras magnéticas. (a) Mecanismo de separação para ímãs permanentes. (b) Mecanismo para evitar a prensão de mais de uma chapa [7]

Para peças cuja superfície seja irregular, podem ser usadas garras com fluido magnético encapsulado dentro de um invólucro elástico, Figura 2.12.

Pode haver um magnetismo residual na peça após o manuseio, e isto deve ser levado em conta particularmente para máquinas-ferramenta. A inversão da corrente nos eletroímãs permite a desmagnetização das peças transportadas.



- | | | |
|-----------|-----------------------|---------------------|
| 1. Bobina | 2. Núcleo magnético | 3. Fluido magnético |
| | 4. Invólucro elástico | 5. Peça |

Fig. 2.12 - Prensão com eletroímã de peças com superfície irregular

As garras magnéticas atraem cavacos e limalhas metálicas. Deve-se avaliar se o espaço entre as superfícies do ímã e da peça permanece dentro de tolerâncias suficientemente estreitas, pois as forças magnéticas são drasticamente reduzidas se algum material penetra entre as superfícies.

As garras magnéticas são sensíveis à temperatura. A temperaturas mais elevadas, o ímã perde seu magnetismo. Por segurança, a temperatura máxima recomendada para a peça é de cerca de 200°C, para eletroímãs, mas alguns ímãs permanentes podem ser empregados para temperaturas de até 500°C [4,7,8,11].

2.3.1.3. Outros sistemas

Outras formas de ação unilateral de preensão são a utilização de adesivos e agulhas, embora sua aplicação industrial seja bem restrita.

a. Adesivos

Por este processo, as peças são seguras por adesão temporária, como a produzida por uma fita adesiva. Uma vantagem deste processo é que apenas uma peça é pega por vez, ao contrário do que pode ocorrer com as garras magnéticas em chapas finas, ou com garras a vácuo em materiais porosos, como por exemplo tecidos. Outra vantagem deste processo é a independência em relação ao material da peça.

Para projetos utilizando este conceito, a resistência da união adesivo/peça é um parâmetro importante. Uma forte união adesivo/peça é desejável para se pegar e manter a peça, mas uma união fraca é desejável para se poder soltá-la facilmente. Para que esta união seja mantida adequadamente, é necessário que a superfície da peça esteja limpa.

Uma outra importante propriedade a ser considerada para os adesivos é a manutenção da capacidade de adesão após várias reutilizações. A vida dos adesivos é importante para sua seleção e também indica a taxa de substituição da camada adesiva. Um adesivo com uma vida mais longa seria econômico, e assim mais desejável.

Usando-se adesivos, pode-se pegar e manter uma peça facilmente, mas é necessário algum dispositivo para se poder soltá-la. A força da união adesivo/peça é uma função linear da largura do adesivo, devido ao aumento da área de contato. A força de união também varia na proporção direta da força com que é feita a pré-carga.

Os adesivos podem ser usados na forma de líquidos, sólidos e fitas. Os líquidos têm a desvantagem da formação de resíduos, ao passo que adesivos sólidos usados na forma de blocos exigem trocas freqüentes.

Estas limitações podem ser contornadas com a utilização de fita adesiva em forma de rolo, que tem a vantagem de permitir a renovação da camada aderente à medida em que vai sendo gasta.

b. Agulhas

Este método é bem adequado para a manipulação de têxteis, e envolve a introdução de agulhas apenas na camada superior de uma pilha de tecidos.

As variáveis a serem consideradas neste caso são: o ângulo da agulha, a espessura do tecido, a sua resistência, o seu peso e o coeficiente de atrito entre o tecido e a agulha. Como os tecidos são compressíveis, a espessura de uma camada dependerá da forma como o tecido é comprimido.

Duas vantagens do conceito de agulhas são o costume de se usar agulhas na indústria têxtil e a relativa simplicidade da construção da garra. Outra vantagem importante é a natureza da preensão, já que uma força controlada pode ser aplicada sobre o tecido.

Para se evitar que as agulhas peguem mais que uma camada, a sua altura pode ser ajustada para um pouco menos que a espessura do tecido. Um problema a ser levado em conta é a possibilidade de que um afastamento excessivo das agulhas possa desfiar o tecido.

Um método de separar uma camada de tecido de uma pilha foi analisado por Parker *et al.* [21]. Foi proposto o uso de pequenas agulhas inclinadas, ajustadas para penetrarem apenas na camada superior. Elas são introduzidas no pano e afastadas uma da outra, resultando desta forma

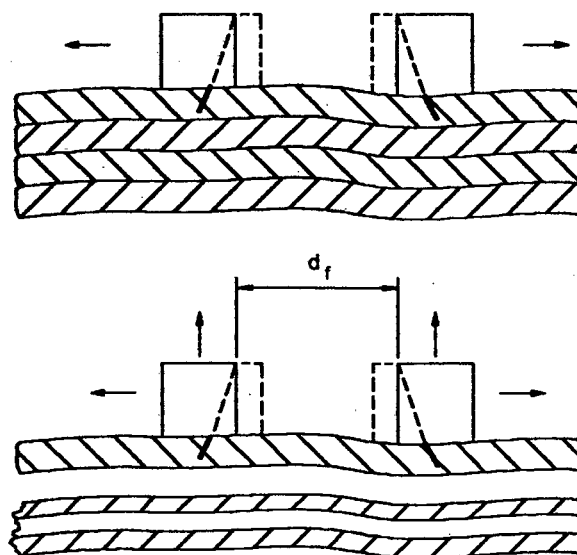


Fig. 2.13 - Garra para têxteis [21]

num enganchamento, Figura 2.13. Este processo exige um grande controle da força aplicada sobre o tecido: uma força vertical elevada pode levar a uma grande penetração das agulhas, pegando mais de uma peça; um afastamento excessivo das agulhas pode danificar o pano.

2.3.2. GARRAS COM SISTEMAS DE AÇÃO BILATERAL

Pelo menos dois dedos rígidos são necessários para se pegar um objeto. Dependendo das características dos dedos e do objeto, e também do estado das superfícies, onde o atrito e a deformabilidade local são um fator importante durante a operação, o contato entre a garra e o objeto ocorre em dois pontos, ao longo de duas linhas ou sobre duas superfícies. Em cerca de metade dos casos, este contato é suficiente para manter o objeto na posição, a despeito da ação de forças de gravidade e inércia [7,81]. Estudos matemáticos mais detalhados sobre preensão e formas de contato foram apresentados por Salisbury & Roth [22], Cutkosky [23], Mishra & Silver [24], Jameson & Leifer [25], Red [26] e Ahmad & Feddema [27].

Devido à simplicidade de forma da maioria das peças industriais, as garras de dois dedos podem ser consideradas como uma solução ótima para a preensão, já que a maioria das tarefas poderia ser executada pela mesma garra sem necessidade de troca dos elementos intermediários, como dedos ou sapatas [103].

Em alguns casos, a utilização de três dedos permite a construção de um sistema mais universal. Eles podem ser usados para se pegar peças de formas não-usuais, que uma garra de dedos paralelos não pode. Também podem ser usados para proporcionar movimentos finos de uma peça com maior precisão. Além disso, os dedos podem ser usados para acrescentar graus de liberdade ao robô, permitindo movimentação precisa das peças ou ferramentas eventualmente sendo manipuladas. Sua desvantagem é possuírem uma estrutura mais complexa, e de controle muito mais complicado [23,27].

As garras de dedos rígidos são as mais comumente usadas. Nelas, os órgãos de preensão, que entram em contato com o objeto, são movimentados por um sistema de vários membros ligados entre si por articulações.

Nestas garras, os dedos são movimentados uns contra os outros em movimento de pinça. Na grande maioria dos casos, as garras são constituídas de dois ou três dedos, cada um destes possuindo uma articulação, que podem ser equipados com órgãos de contato adequados [4,5,7,8,18,78].

Serão discutidos a seguir as formas de movimentação dos dedos, seus dispositivos de acionamento e os tipos de contato entre estes e as peças.

2.3.2.1. Movimentos dos dedos

A classificação destas garras é primordialmente feita com base na sistemática do movimento dos seus órgãos de preensão. Como na maioria dos casos os órgãos de preensão realizam uma rotação ou translação, podem ser escolhidas transmissões planas como base para a sistematização de seus mecanismos [28]. Nas Figuras 2.14 a 2.16 estão mostradas algumas variantes das possibilidades de movimentação dos órgãos de preensão no plano.

a. Movimento paralelo dos dedos: os dedos se fecham paralelamente sobre a peça. O movimento paralelo dos dedos tem significativa importância para a preensão de peças prismáticas, com garras de dois dedos, e para o manuseio de peças de revolução, com garras de três dedos [4].

Este movimento pode ser:

- Translação linear: os dedos se movem um contra o outro seguindo uma linha reta, Figura 2.14-(a).
- Translação circular: os dedos se fecham seguindo uma trajetória circular, mantendo o paralelismo dos órgãos de contato, Figura 2.14-(b).

b. Rotação dos dedos em torno de um ponto fixo: os dedos se fecham sobre a peça girando em torno de um ponto fixo no espaço, Figura 2.15.

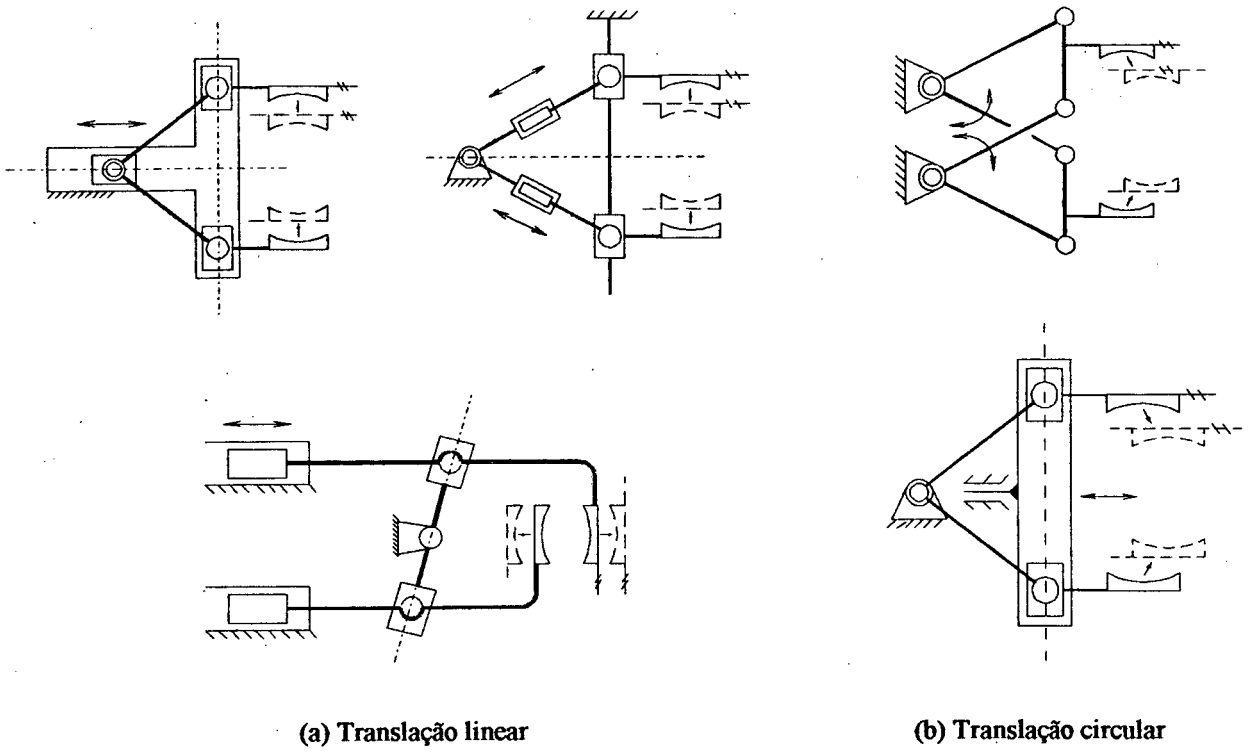


Fig 2.14 - Movimento paralelo dos dedos [4]

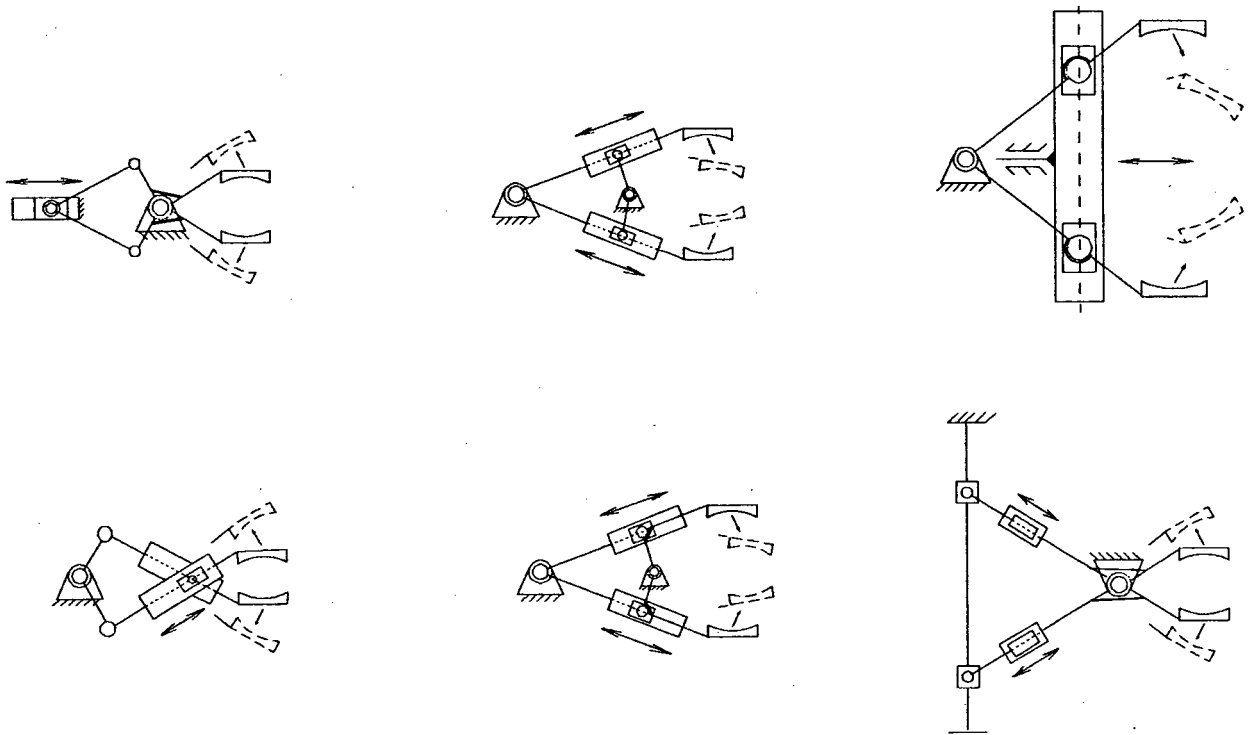


Fig 2.15 - Rotação dos dedos em torno de um ponto fixo [4]

c. Movimentos curvilíneos gerais dos dedos: neste caso, os dedos se fecham sobre a peça girando em torno de um ponto móvel no espaço, Figura 2.16.

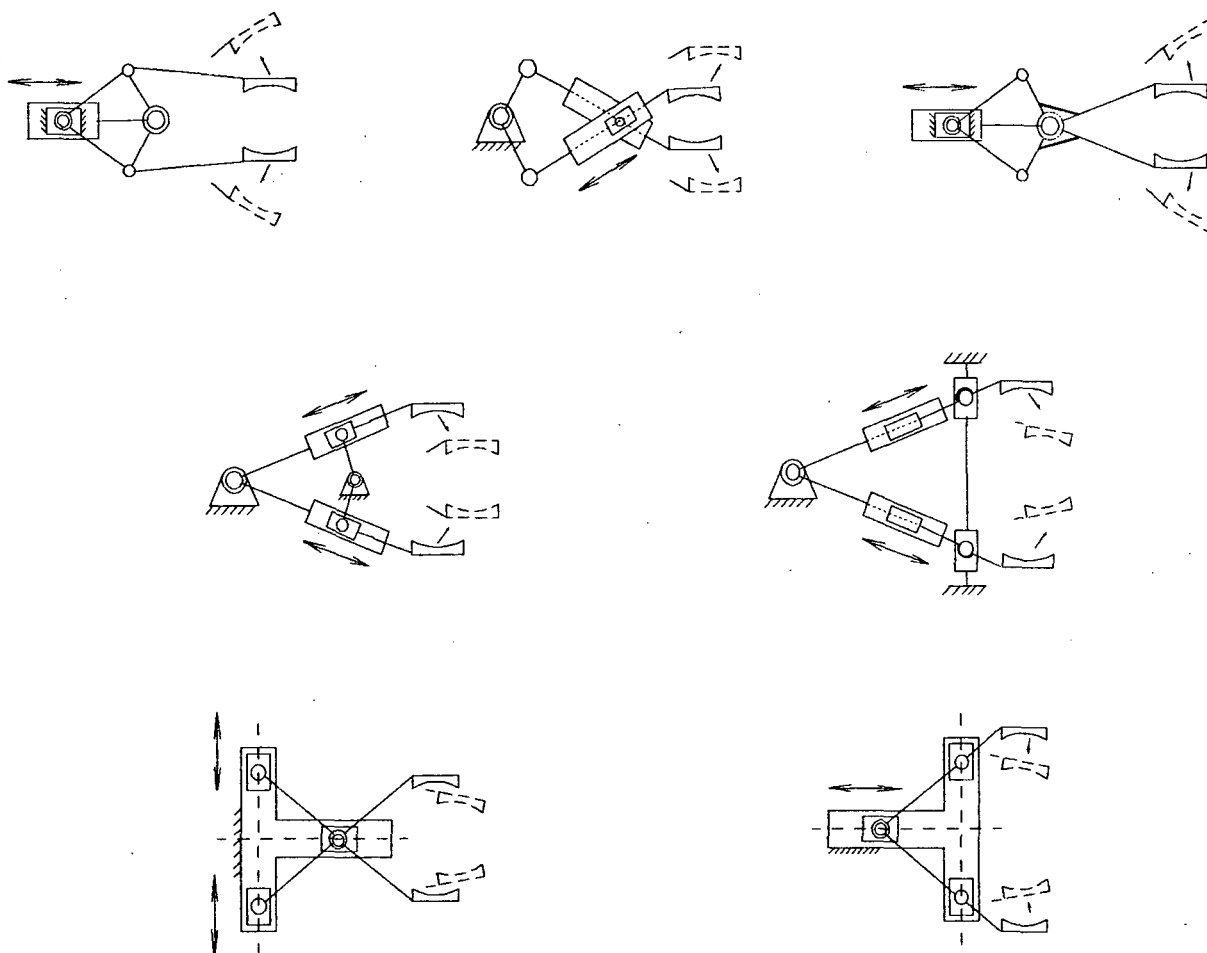


Fig 2.16 - Movimentos curvilíneos gerais [4]

Para o caso de uma garra de três dedos, a sua movimentação no espaço pode ser conseguida, por exemplo, através de cames ou engrenamento, Figura 2.17 (onde o terceiro dedo não aparece apenas para simplificar o desenho). As garras de três dedos imitam os movimentos do polegar, indicador e um terceiro dedo, sendo usadas principalmente na preensão de corpos de revolução e peças de forma esférica ou cilíndrica [6].

A formação de um par entre a peça e os órgãos de agarramento cria uma articulação

espacial que deve ser estaticamente definida, com vistas a se conseguir uma posição inequívoca da peça em relação à garra. Assim, devem ser envidados esforços no sentido de eliminar as sobredeterminações.

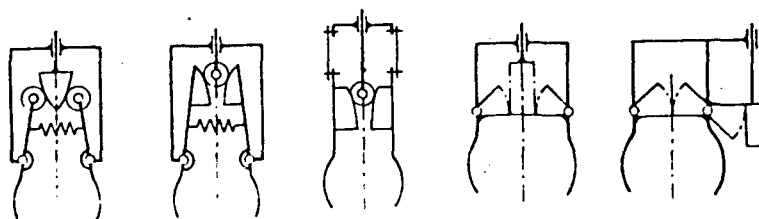


Fig 2.17 - Garra de três dedos rígidos [4]

Uma característica das garras de dedos rígidos é a dependência funcional entre o curso de acionamento, s_A , e o movimento dos dedos, s_G . Da função de transferência $s_A = s_A(s_G)$ ou $s_G = s_G(s_A)$ obtém-se a relação entre a força de aperto F_G e a força de acionamento F_A como a relação de transmissão ds_G/ds_A (desprezando-se as perdas). As relações das forças de aperto em relação às forças de acionamento dependem do conhecimento dos mecanismos da garra. Para alguns exemplos específicos de garras, estão apresentados estudos destas relações em [28] e [29]. A Figura 2.18 mostra, para dois exemplos de garras, a relação entre os cursos de acionamento e prensão. Estes gráficos permitem uma boa apreciação sobre as características das garras. Assim, enquanto na garra da Figura 2.18-(a) a força de prensão permanece aproximadamente constante (supondo-se F_A constante), no caso (b) pode-se obter altas forças de prensão, mas apenas dentro de limites estreitos do curso de acionamento [4,28].

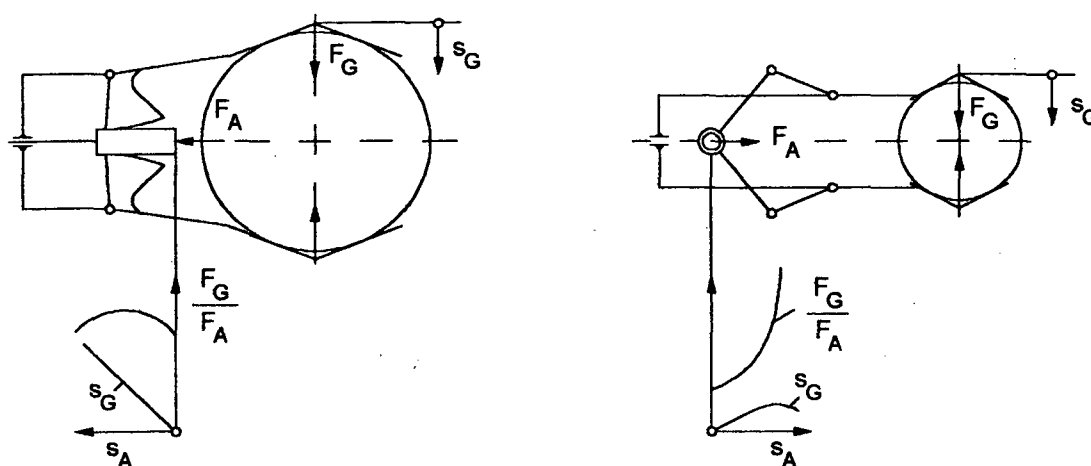


Fig. 2.18 - Relação entre os cursos e forças das garras [4]

2.3.2.2. Dispositivos de acionamento das garras

Sendo as garras de dedos rígidos, basicamente, dispositivos que transformam o movimento de um atuador, à entrada, na ação de prensão, à saída, pode-se também diferenciar estas garras pela forma como o movimento é transmitido. Desta maneira, pode-se diferenciá-las, conforme os seguintes tipos de acionamento:

- articulado
- por pinhão-cremalheira
- por cames
- por parafuso
- por cabo e polia.

a. Tipo articulado

Neste caso, o movimento do atuador (um motor ou equipamento hidráulico ou pneumático) é transmitido aos dedos através de hastes articuladas. Chen [30] ilustra uma série de exemplos deste tipo, Figura 2.19.

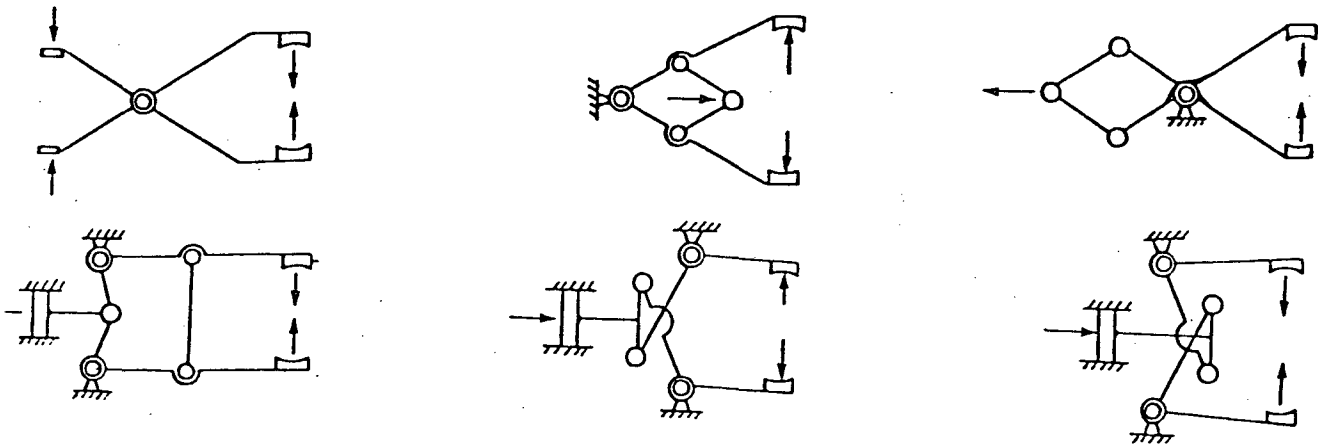


Fig. 2.19 - Garras articuladas [30]

Pode-se usar uma mola para garantir um desprendimento automático, Figura 2.20-(a); neste caso, a força de aperto dos dedos é fornecida externamente e, ao cessar esta força, a peça é solta. Outra possibilidade é a utilização de uma mola para garantir a apreensão da peça, Figura 2.20-(b); aqui a força de acionamento produz a abertura da garra. Esta variante age a favor da segurança, pois a peça fica firme na eventualidade de uma falta de energia. Em ambos os casos, a utilização da mola simplifica o projeto do acionamento e o sistema de controle a ele associado.

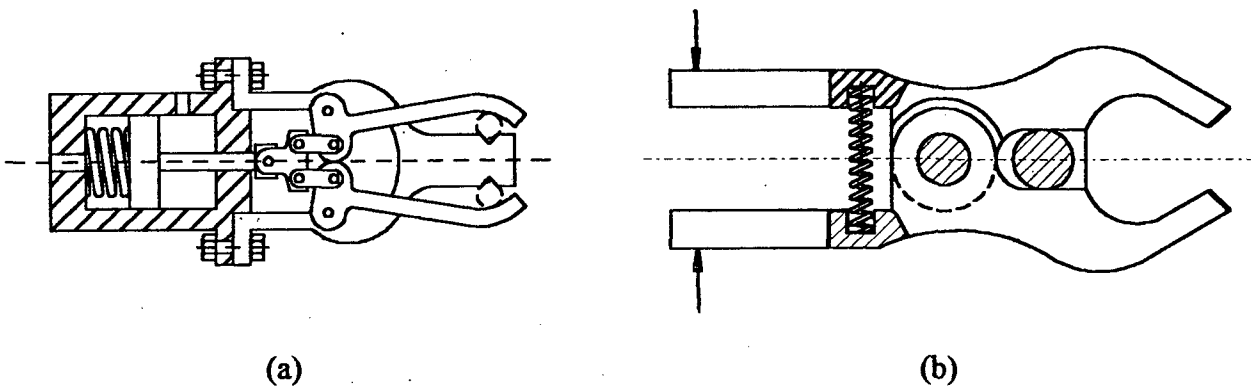


Fig. 2.20 - Garras articuladas com molas [30]

b. Acionamento por pinhão-cremalheira

Uma cremalheira dupla, fixa à haste do pistão, aciona dois setores circulares de pinhão, e seu movimento linear é transformado em movimento circular de abertura e fechamento da garra, Figura 2.21. Esta forma construtiva tem a vantagem de produzir forças de aperto maiores.

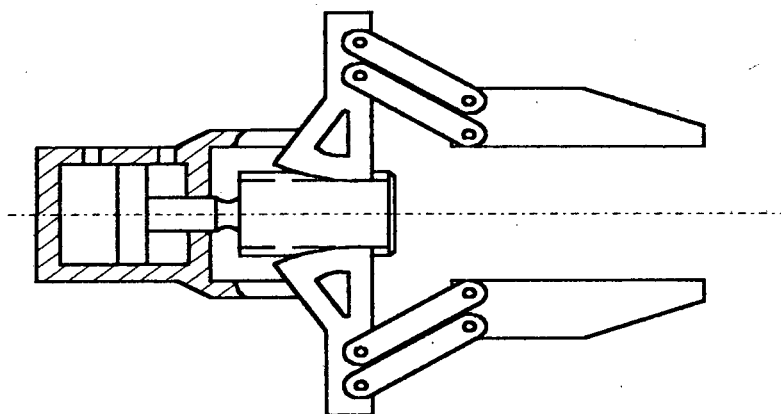


Fig. 2.21 - Acionamento por pinhão-cremalheira [30]

c. Acionamento por cames

Neste caso, são utilizados sistemas de came e seguidor, Figura 2.22. Pode ser usada uma variedade de perfis para os cames: velocidade constante, arcos circulares, curvas harmônicas, etc.

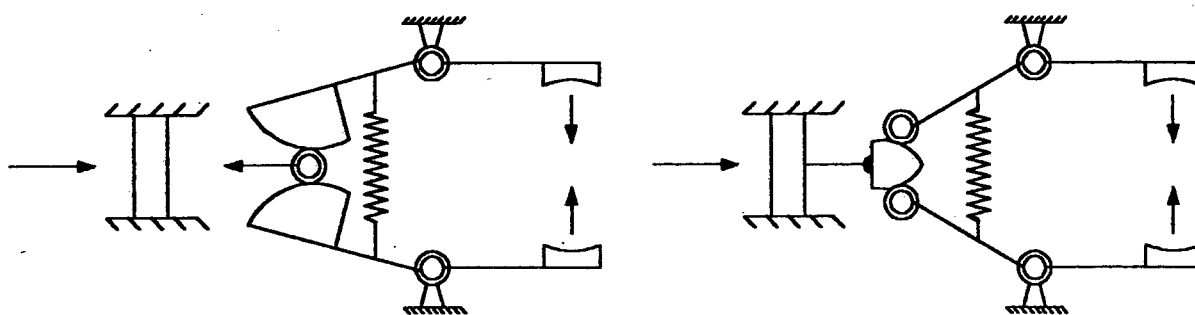


Figura 2.22 - Acionamento por cames [30]

d. Acionamento por parafuso

Aqui, as garras são operadas pela rotação uniforme do parafuso, feita por um conjunto motor redutor de velocidades. Os parafusos podem ter apenas uma rosca ou duas roscas com direções opostas, Figura 2.23. A desvantagem deste acionamento é que exige um motor adicional na garra, ou sistema de transmissão entre a garra e o pulso, que pode interferir com outros sistemas sensores ou impedir trocas automáticas da garra.

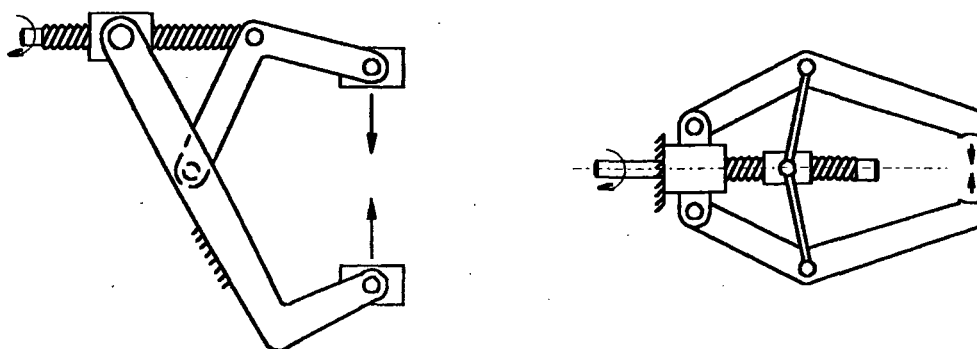


Figura 2.23 - Acionamento por parafuso [30]

e. Acionamento por cabo e polia

O fechamento da garra é feito pela tração no cabo, conforme mostrado na Figura 2.24. Como os cabos apenas transmitem forças de tração, é necessário um mecanismo adicional, uma mola, por exemplo, para a abertura da garra.

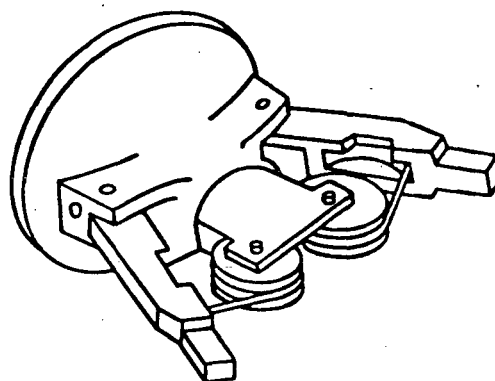


Fig. 2.24 - Acionamento por cabo e polia [30]

2.3.2.3. Pontas dos dedos

A interação entre a garra e a peça origina condições variáveis de contato. Estas condições de contato dependem de atrito, adesão, geometria superficial e deformação superficial sob carga, e têm profundo efeito sobre a resistência e estabilidade da preensão, determinando a extensão do acoplamento cinemático entre as pontas dos dedos e a peça [23,31].

Análises prévias [31,32] usaram a suposição de superfícies rígidas e pequenas áreas de contato, para tratar o contato como pontual. Esta suposição é a forma mais fácil de ser tratada analiticamente, mas torna-se imprecisa quando o raio de curvatura das pontas dos dedos não é pequeno, comparado às dimensões do objeto, ou quando a ponta do dedo deforma-se. Os efeitos das diferentes suposições quanto à geometria da ponta do dedo são mostrados a seguir.

Os modelos que podem ser usados para a geometria da ponta do dedo incluem: contatos pontuais, contatos curvos rígidos, contatos planos, contatos curvos elásticos, e contatos muito macios, mostrados esquematicamente na Figura 2.25.

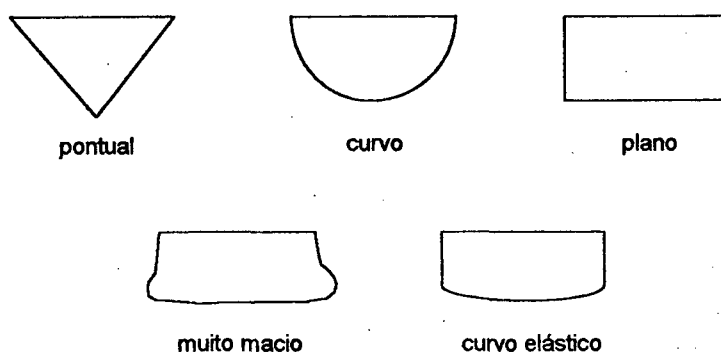


Figura 2.25 - Formas dos contatos [23]

Em um contato pontual, as forças são transmitidas entre a ponta do dedo e a peça, mas não são transmitidos torques. Da mesma forma, a translação da ponta do dedo está acoplada à da peça, mas não a rotação. Quando a garra se desloca no espaço, leva consigo a peça, que descreve o mesmo movimento, mas como o contato é pontual, a rotação das pontas dos dedos em torno do ponto de contato não provocam qualquer movimento da peça, ou se a peça girar, os dedos não

apresentam resistência a este movimento.

Assim, com o contato pontual, não ocorre movimento de rolamento e, conseqüentemente, qualquer movimento do ponto de contato sobre a peça ou a ponta dos dedos. Quando a peça é deslocada, os dedos podem apenas girar em torno dos pontos de contato.

Um dedo rígido e curvo tem um contato similar ao pontual, pois a área de contato é pequena, de forma que forças podem ser transmitidas, mas não torques. A principal diferença surge da possibilidade da ponta do dedo rolar sobre a superfície da peça. À medida em que o dedo rola, a localização do ponto de contato vai variar. A análise geral do rolamento é complexa, e um tratamento matemático do problema, reduzido ao caso bidimensional, está mostrado em [23].

Pontas muito macias representam o caso extremo de uma ponta moldável do dedo pressionando a superfície do objeto. Neste modelo assume-se que a ponta do dedo se adapta à superfície do objeto, e adere levemente. Tais características são encontradas em muitas superfícies naturais, incluindo os dedos da mão humana. O coeficiente de atrito para tal ponta será alto (maior que 1). Entretanto, como a deformação e a adesão são os principais mecanismos que surgem no contato, não é aconselhável usar-se a lei de atrito de Coulomb.

A ponta curva rígida e a ponta muito macia representam extremos, entre os quais se situam as pontas reais deformáveis dos dedos.

Para uma esfera elástica rígida rolando sobre uma superfície elástica, a distribuição de pressão é descrita pelo modelo de contato hertziano da mecânica dos sólidos, que prevê uma distribuição de pressão hemisférica. Para as deformações bem maiores que ocorrem quando um dedo curvo e macio é pressionado contra um objeto, espera-se que a distribuição seja apenas qualitativamente similar.

A pressão será máxima no centro do contato, diminuindo progressivamente para zero na periferia. Para pontas progressivamente mais macias, a distribuição de pressão torna-se mais uniforme, especialmente em direção ao centro da área de contato. No caso limite, a pressão é essencialmente uniforme em todos os pontos, como assumido no modelo de dedos muito macios. Na Figura 2.26 são comparadas as distribuições de pressão em pontas elásticas, macias e muito

macias.

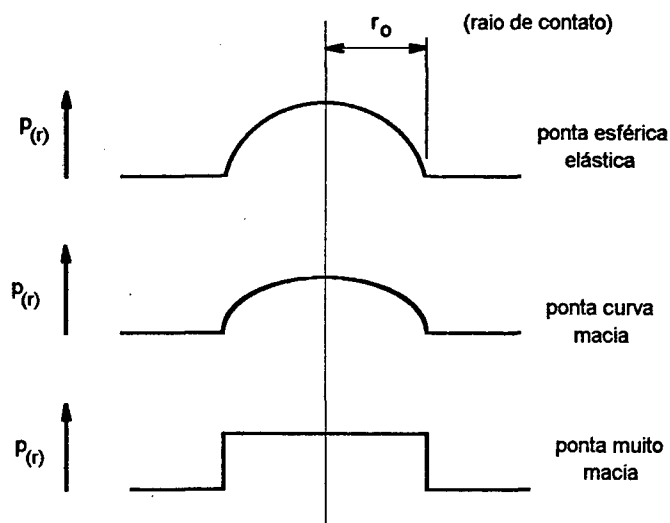


Fig. 2.26 - Distribuição de pressão no contato dos dedos [23]

2.3.3. GARRAS COM SISTEMAS DE AÇÃO MULTILATERAL

Este tipo de dispositivo de preensão é menos utilizado industrialmente, embora possua algumas vantagens sobre os outros tipos. Eles têm uma grande flexibilidade, isto é, podem adaptar-se à forma da peça e manter a posição e orientação desta em relação ao braço do robô [7], mas no estágio atual de seu desenvolvimento ainda carecem de precisão.

O princípio comum a todos estes dispositivos é a deformação da garra de acordo com a forma da peça, aumentando as áreas de contato entre ambas.

O objetivo da pesquisa e desenvolvimento destes sistemas é criar garras flexíveis, de utilização o mais geral possível. Contudo, este desenvolvimento ainda se encontra num estágio bastante inicial, e tem sido, por enquanto, voltado para aplicações bem específicas.

A seguir é feita a descrição de alguns dos principais tipos de garras de dedos flexíveis, bem como mostrados exemplos de outros tipos de garras.

2.3.3.1. Garras de dedos mecânicos

Nestas garras, os dedos são, em muitos casos, imitações dos dedos humanos, com suas falanges. As garras de dedos mecânicos são em geral construídas com três, quatro ou cinco dedos. O acionamento dos membros é feito pela tração de um fio ou uma fita [33,36,98], ou por motores de passo nas juntas [97].

Estas garras encontram obstáculos para sua utilização industrial disseminada porque, sendo seus dedos constituídos de vários membros, apresentam elevados custos para seu desenvolvimento técnico e fabricação, em relação à utilização em geral especializada dos manipuladores, que pode ser atendida por garras específicas, de construção mais simples e barata [4].

O projeto de robôs industriais representa um compromisso entre precisão, velocidade, capacidade de carga e flexibilidade. Segundo Cutkosky [23] e Slocum *et al.* [91], o melhor é separar os movimentos do manipulador entre largos e finos. Embora a capacidade de resposta dos robôs industriais tenda a melhorar com os avanços tecnológicos, uma solução mais adequada é utilizar um efetuator para acomodações finas. Ou seja, o braço do robô fornece a posição e orientação aproximadas, enquanto o pulso e o efetuator fazem as pequenas acomodações. Isto permite que grandes manipuladores sejam usados para tarefas de montagem fina, para as quais, de outra forma, seu tamanho e falta de precisão os excluiriam.

Formas especiais das garras de dedos mecânicos são as garras de dedos maleáveis (soft grippers) e as garras de dedos múltiplos, entre outras.

A garra maleável, Figura 2.27, desenvolvida por Hirose & Umetani [33], a partir de observações dos movimentos das cobras, é uma garra com um ou mais dedos constituídos de múltiplos membros que se ajustam, juntamente com os órgãos de contato neles situados, ao contorno de objetos com as mais diferentes formas. A garra é acionada por pares de fios, e permite que cada um de seus membros aplique uma pressão constante sobre a peça.

Bianchi & Rovetta [34] desenvolveram uma garra que consiste de dois dedos articulados, acionados por um fio, que prendem o objeto contra uma placa ligada a uma mola, que funciona como um terceiro ponto de contato, Figura 2.28.

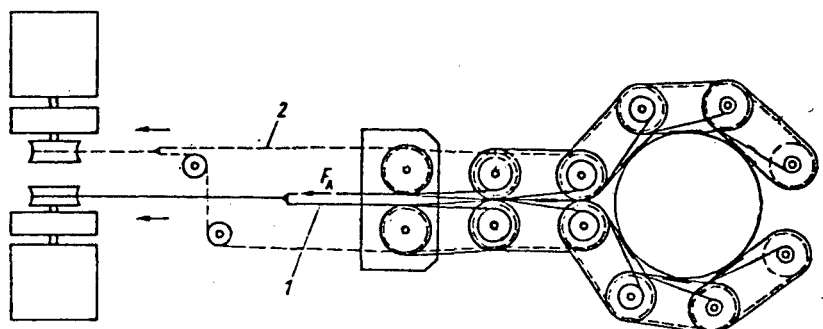


Fig 2.27 - Garra maleável [33]

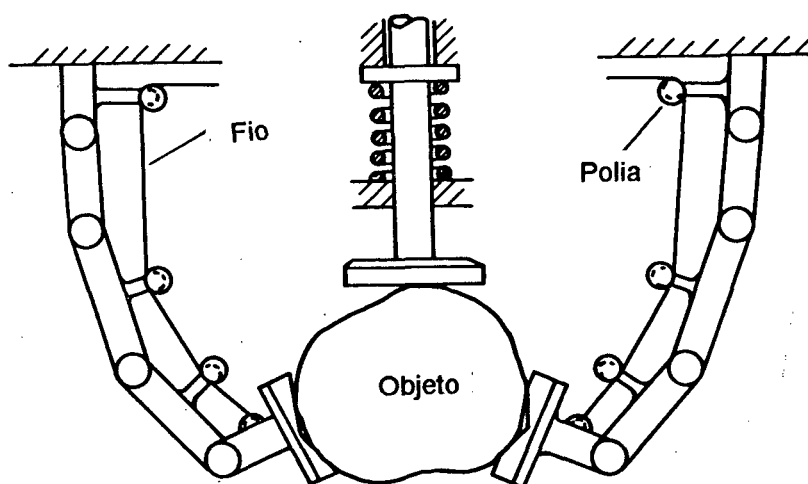


Fig. 2.28 - Garra de dois dedos articulados com apoio [34]

Jacobsen *et al.* [36] desenvolveram um dos projetos mais complexos. Trata-se de uma garra bastante antropomórfica contendo dedos operados por tendões e sensibilidade tátil. Esta garra é ainda o primeiro protótipo de um desenvolvimento mais amplo, e foi escolhida a forma antropomórfica como ponto de partida, apenas porque a mão humana já se provou uma ferramenta de manipulação poderosa e porque a experiência dos pesquisadores com as suas próprias mãos tornaria mais fácil avaliar a performance da garra. Crossley & Umholtz [35] também desenvolveram uma garra antropomórfica pelas mesmas razões, e adicionalmente porque

uma garra antropomórfica tem aplicações potenciais em prótese médica.

A garra desenvolvida por [36] é constituída por quatro dedos, com quatro graus de liberdade cada, ligados a uma palma, e esta a um pulso com mais três graus de liberdade, como mostrado na Figura 2.29. Esta "mão" não era, necessariamente, a forma final, e análises de desempenho poderiam resultar em formas alternativas, sem quaisquer semelhanças com a mão humana.

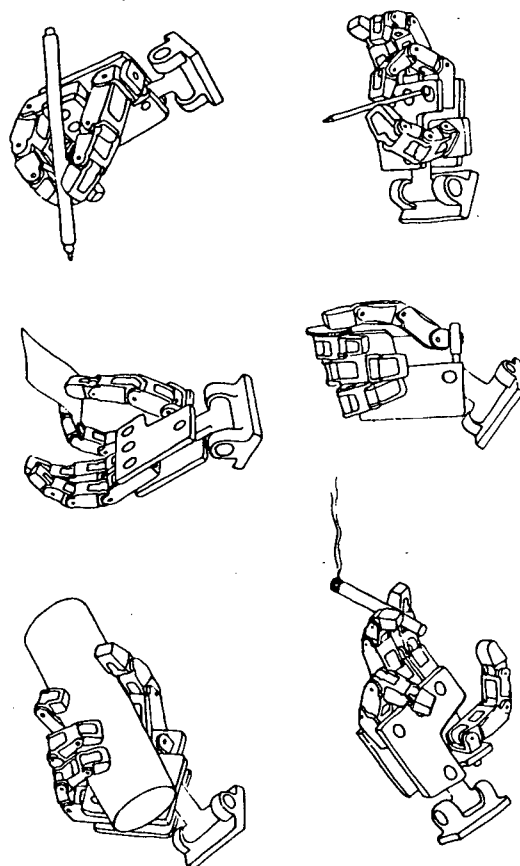


Fig. 2.29 - Garra antropomórfica [36]

Estes tipos de garras flexíveis descritos anteriormente, no entanto, ainda não são adequadas para tarefas industriais, como montagem, devido a seus movimentos lentos, baixa confiabilidade e baixa precisão posicional [86].

2.3.3.2. Garras de dedos pneumáticos

Os dedos pneumáticos são constituídos por uma câmara de ar com forma de fole (1) de um lado, e do outro por uma fita não extensível, mas recurvável (2), de tal forma que quando se enche a câmara com ar comprimido resulta o curvamento da peça 2, Figura 2.30. Estes dedos podem ser ainda reforçados por meio de estruturas internas ou externas, sem perda da sua "articulabilidade", podendo ser utilizados para uma grande faixa de esforços [4]. Estas garras podem ser usadas tanto interna quanto externamente, e um bom projeto conseguiria isto com a simples inversão dos dedos.

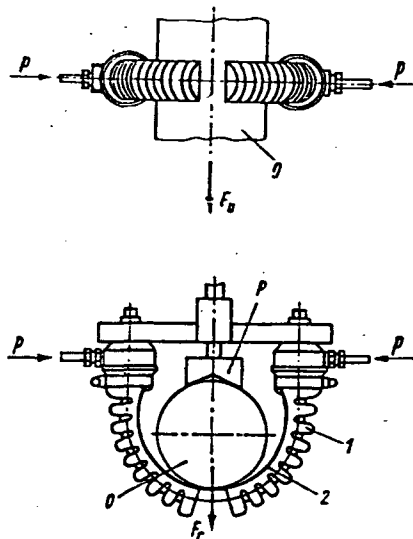


Fig. 2.30 - Garras com dedos pneumáticos [4,19]

A força de agarramento dos dedos pneumáticos depende da pressão do ar e da forma construtiva. Uma vantagem é a elasticidade dos dedos e, assim, a boa adaptabilidade à forma da peça. Como os dedos são de borracha, esta garra pode ser aplicada para superfícies sensíveis. Se dois dedos forem combinados com um prisma, também peças cilíndricas podem ser seguras e posicionadas com precisão, Figura 2.30-(b).

2.3.3.3. Outros sistemas

Além destas, a busca cada vez maior de automatização dos processos industriais via utilização de robôs levou à pesquisa e desenvolvimento de garras para aplicações bastante específicas, das quais alguns exemplos são citados a seguir.

Tur-Kaspa & Lenz [37] construíram uma garra para o manuseio de tubos ultra-finos, de até 0,01mm de parede, Figura 2.31. Estes tubos podem sofrer modificações na forma ou nas tolerâncias devido à aplicação de pequenas forças externas. Desenvolveu-se então uma garra constituída de duas tiras de borracha que são entrelaçadas, formando um anel que envolve o tubo. A prensão é feita afastando-se os suportes das tiras. A solução encontrada permite uma distribuição mais homogênea da pressão sobre o tubo.

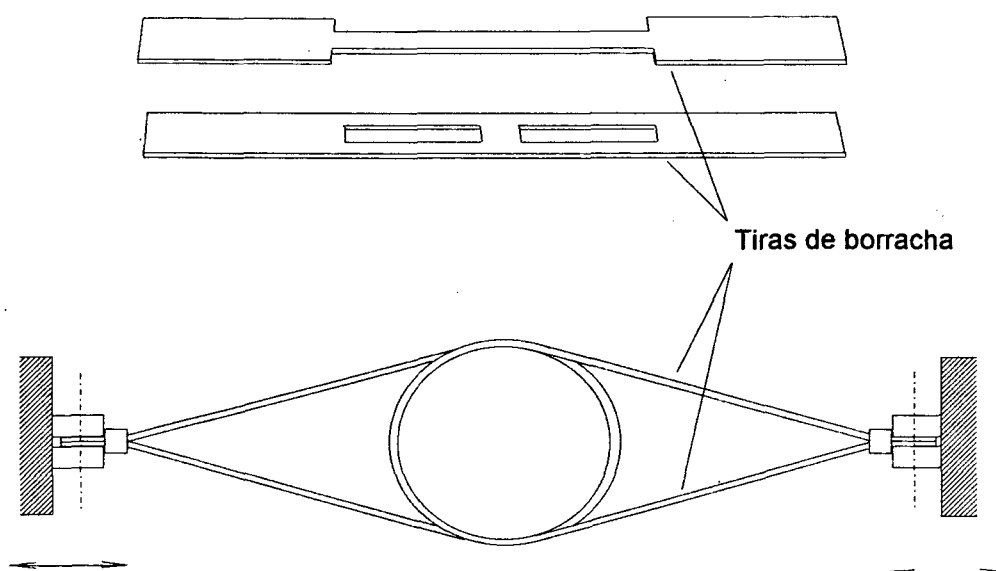


Fig. 2.31 - Garra para tubos ultra-finos [37]

Perovskii [38] desenvolveu uma garra constituída por duas hastes, que podem aproximar-se uma da outra, nas quais, no lado de trabalho, estão afixadas câmaras de borracha fina cheias de pequenas esferas duras, de mesmo diâmetro, que se amoldam à forma do objeto sendo pego, Figura 2.32. O contato faz com que se eleve a pressão sobre as esferas, impedindo seu movimento relativo. Um fole ou outro mecanismo é utilizado para reduzir a pressão nos

sacos, através de tubos perfurados, permitindo uma perfeita conformação ao objeto. A garra pode pegar em seqüência peças de diferentes formas, dimensões e massas, sem necessidade de ajustes.

Devido ao pequeno diâmetro das esferas, estas exercem uma pressão pequena e bem distribuída sobre o objeto, podendo manusear peças frágeis como copos finos ou peças de porcelana. A ausência de movimento relativo entre as esferas, devido à pressão de contato, permite uma firme preensão do objeto. Uma alternativa possível é empregar, no lugar das esferas, grãos ferrosos que são travados em suas posições por eletromagnetização.

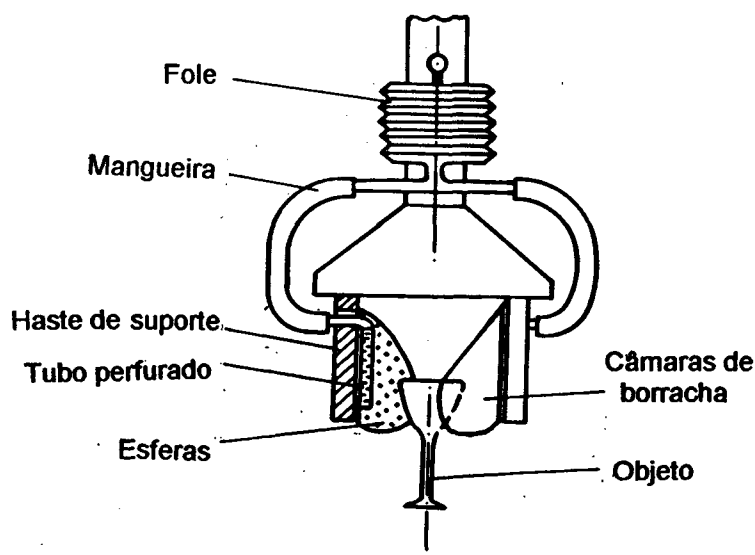


Fig. 2.32 - Garra com câmaras de borracha [38]

Scott [39] descreve uma garra "universal" (capaz de pegar adequadamente uma série de peças sem necessitar trocas) consistindo de dois blocos paralelos ligeiramente separados, contendo, cada um, uma matriz de 8x16 pinos estreitamente espaçados que podem deslocar-se vertical e independentemente uns dos outros, Figura 2.33. A garra é baixada verticalmente sobre um objeto, empurrando alguns dos pinos para cima, de forma que eles envolvam a peça. Para reter o objeto, os dois conjuntos de pinos são aproximados (agarramento externo) ou afastados

(agarramento interno) entre si. Este movimento será no máximo equivalente ao diâmetro de um pino, mas produz força suficiente para a apreensão da peça. Uma desvantagem não citada é que a peça só poderá ser largada do mesmo lado em que foi pega.

Esta garra também permite pegar mais de um objeto simultaneamente, desde que circundados por pinos dos dois conjuntos, ou então pegá-los seletivamente, pois só seriam agarrados aqueles pegos por ambos os conjuntos; outros objetos tocados pela garra seriam apenas levemente deslocados.

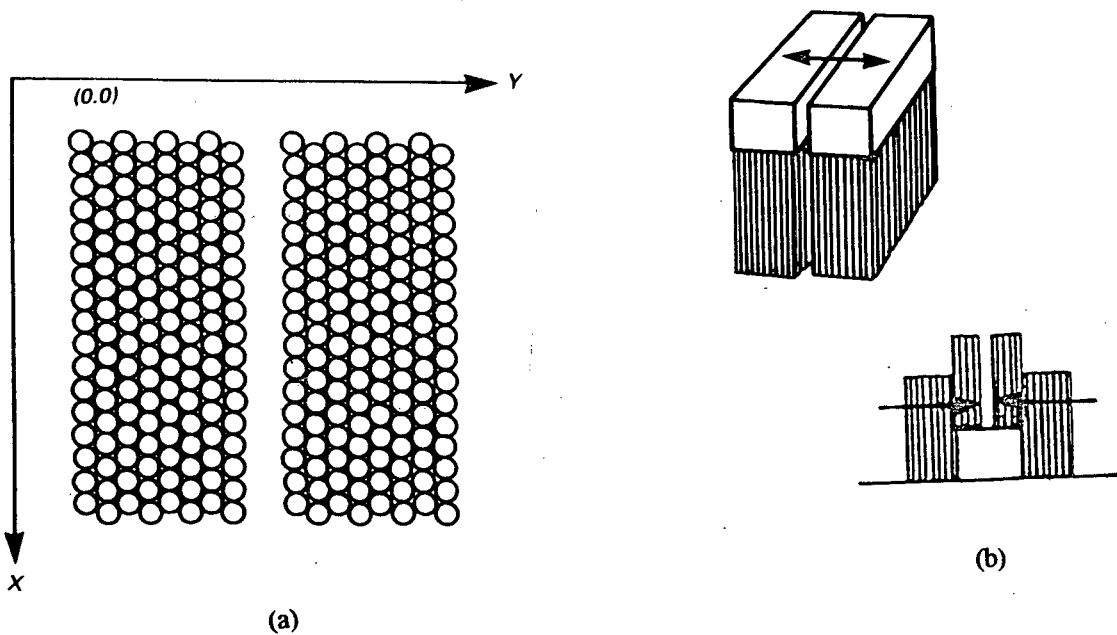


Fig. 2.33 - Garra universal [39]

Uma variante é os pinos serem constituídos por uma haste rígida no centro envolta por material inflável, onde o agarramento é feito inflando-se as bexigas.

Vassura & Nerozzi [40] desenvolveram uma garra constituída de vinte hastes, instaladas de forma escalonada sobre quatro eixos paralelos que giram em contra-rotação. As hastes diametralmente opostas são coplanares movendo-se em sentidos contrários e tocando o objeto em lados opostos. As hastes, f na Figura 2.34-(a), são separadas entre si por anéis, r , sendo movimentadas em direção ao objeto pelo torque transmitido pelo atrito entre os anéis.

Como o torque transmissível depende da pressão de contato entre os anéis, a força de

preensão entre os dedos e o objeto pode ser limitada pela redução da carga axial que age na coluna de anéis ao mínimo necessário para mover os dedos, que param assim que tocam o objeto. Deste modo, os dedos vão-se adaptando à forma do objeto, envolvendo-o como uma gaiola, sendo travados na posição final pela aplicação de uma força axial sobre os anéis, Figura 2.34-(b).

Esta garra permite manusear objetos de qualquer formato e limitar as forças de contato, reduzindo as deformações dos objetos a um mínimo, mesmo que sejam frágeis ou macios.

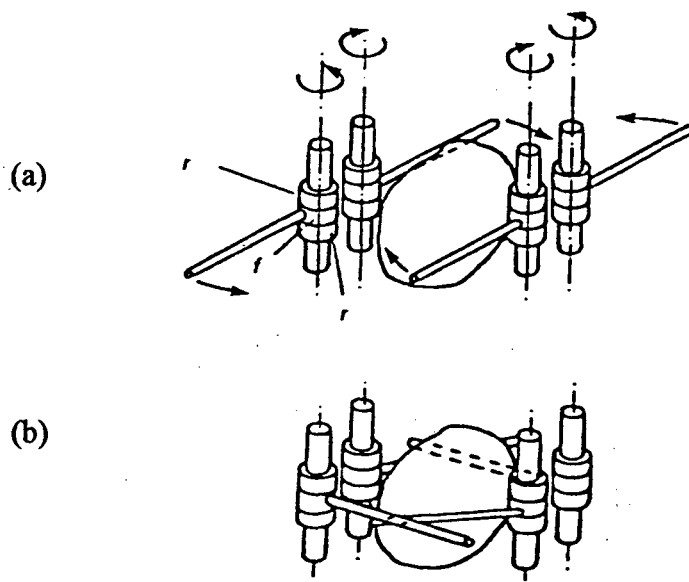


Fig. 2.34 - Garra adaptável à forma [40]

A desvantagem de todas estas garras é a dificuldade de sensorear e determinar a posição exata da peça sendo segura em relação ao pulso do robô, o que as torna inadequadas para operações que exigem maior precisão, por exemplo montagem.

Kemp *et al.* [41] descrevem o desenvolvimento de uma garra para a indústria têxtil, onde o principal problema encontrado era como separar uma camada de tecido da pilha, sem "beliscá-lo" ou perfurá-lo, o que poderia causar distúrbios às suas fibras ou às camadas inferiores. Isto é conseguido por meio de um jato de ar, que reduz a pressão e cria turbulências sobre um dos lados do tecido, levantando a camada superior, que é pega então pelo mordente, Figura 2.35.

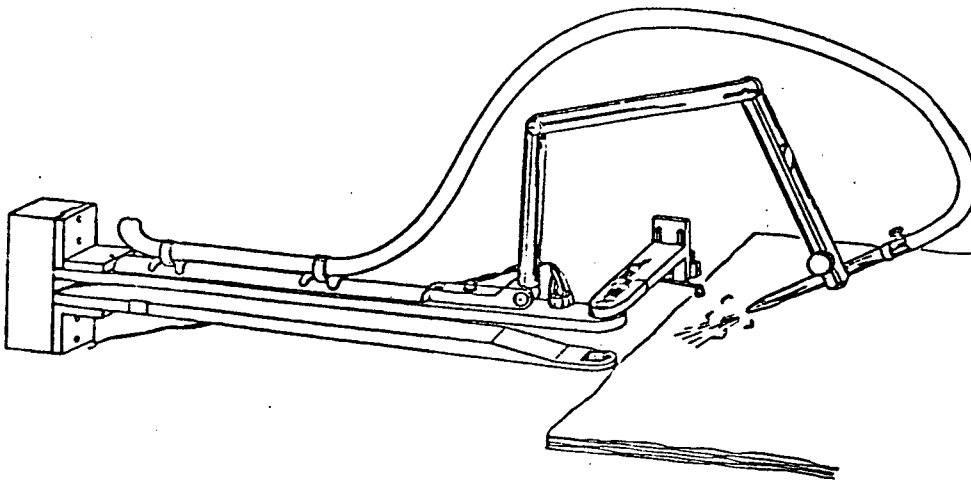


Fig. 2.35 - Garra para têxteis [41]

2.4. FERRAMENTAS

Os robôs industriais são empregados não apenas para o manuseio de peças, mas também no suporte de ferramentas e dispositivos para a execução de operações que fazem parte do processo de produção.

Atualmente, por meio dos robôs industriais são manipuladas ferramentas para furação, retificação, rebarbação, limpeza de fundidos, rebitagem, pinças para soldagem a ponto e eletrodos para soldagem a arco, pistolas de pintura, bem como dispositivos para medição e montagem.

As ferramentas ou são apenas fixadas no flange do robô industrial, ou executam também movimentos próprios, como por exemplo as pinças para soldagem a ponto.

Nos processos de usinagem, o robô pode segurar as peças ou as ferramentas. Neste último caso não há limitação quanto ao peso das peças; robôs menores podem ser usados, assumindo que as ferramentas aplicadas são menores que as peças processadas; e, se as peças são pesadas, o tempo de produção será menor, já que o braço do robô pode ser movido mais rapidamente.

Na maioria dos casos o acionamento das ferramentas é feito por meio de ar comprimido [4]. O ar se adéqua bastante como meio de acionamento, pois em geral não são necessárias grandes forças. As ferramentas geralmente têm apenas duas posições definidas, de forma que a compressibilidade do ar não tem influência sobre a precisão dos movimentos.

Quando mais de uma ferramenta é utilizada, o robô poderá trocá-las automaticamente. Elas devem ser montadas em uma prateleira ou magazine e possuírem uma interface mecânica padrão, de forma que o robô possa pegá-las em qualquer ordem. A ativação do suprimento de energia é feita simplesmente pela conexão com o canal de saída apropriado no flange do robô.

CAPÍTULO 3

PARÂMETROS E REQUISITOS PARA A SELEÇÃO DE GARRAS

3.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior pôde-se constatar que a busca por uma flexibilidade maior e uma utilização cada vez mais universal dos robôs tem levado ao desenvolvimento de uma grande quantidade de garras para robôs industriais, podendo estas garras ser projetadas tanto para aplicações mais gerais quanto para uma utilização absolutamente específica.

Um dos problemas mais cruciais encontrados no projeto de um robô é em relação ao efetuador. Não importa quão sofisticado seja o braço, se o efetuador não é adequado à tarefa, esta não pode ser executada satisfatoriamente [7,17].

As garras para robôs industriais são equipamentos altamente especializados que podem trabalhar em uma faixa estreita de variação nas propriedades mecânicas e físicas das peças [8,12,30]. Um robô universal equipado com uma garra especializada torna-se especializado, e só pode trabalhar com peças de certo tipo e tamanho, que são limitadas por características tais como resistência, propriedades magnéticas, forma e rugosidade superficial [38].

O projeto da garra resultará assim da avaliação das prioridades a que esta deverá satisfazer. A avaliação destas prioridades requer que as especificações de performance tenham sido estabelecidas.

Neste capítulo, são discutidas as necessidades e requisitos a serem considerados para o estudo das garras robóticas. São estabelecidas aqui as exigências gerais para as garras, e discutidos os parâmetros envolvidos no seu projeto, relativos à peça, à garra, à tarefa, às condições ambientais e a alguns requisitos de segurança. O estudo é restrito aos tipos de garras

que encontram uma aplicação industrial mais geral (de dedos, a vácuo e magnéticas).

3.2. CARACTERÍSTICAS DA PEÇA

As características da peça, tais como sua geometria, dimensões e tolerâncias, peso, material, estado superficial e temperatura, têm importância fundamental para a prensão, e devem ser levadas em consideração quando se seleciona uma garra para o seu manuseio. São discutidas aqui tais características e sua influência sobre os parâmetros a serem considerados quando da seleção da garra.

3.2.1. GEOMETRIA

Pode-se considerar que qualquer objeto seja limitado por superfícies discretas, que podem ser planas, cilíndricas, esféricas ou de forma arbitrária. Em tarefas de montagem industrial, cerca de 98% das peças apresentarão uma superfície de prensão plana ou circular [79]. Destas, as peças com forma cilíndrica foram identificadas como sendo as predominantes na manufatura [80].

Se a geometria da peça é conhecida, pode-se determinar superfícies de prensão adequadas ou aceitáveis. A priori, estas são quaisquer superfícies acessíveis e que podem ser adequadamente utilizadas pela garra considerada [81]. As superfícies disponíveis vão obviamente influenciar o tipo de garra adequada para manusear a peça. Por exemplo, uma garra de dois dedos rígidos exige um par de superfícies, enquanto uma garra a vácuo requer apenas uma.

As características mais relevantes para a escolha de superfícies de contato para cada tipo de garra são discutidas a seguir.

a. Garras tipo pinça de dois dedos: são geralmente usadas para pegar componentes que possuam

pares de superfícies paralelas e opostas.

Para dedos que possuem superfícies planas, existem seis tipos de contato entre estes e as superfícies das peças: plano-plano, plano-linha, plano-ponto, linha-linha, linha-ponto e ponto-ponto, mostrados na Figura 3.1. O contato ponto-ponto seria o de uma esfera com uma garra de dois dedos planos rígidos. O contato entre planos é sempre preferível. Além de um plano ser sempre melhor que uma linha para se restringir os movimentos da peça, aplica ainda, durante a apreensão, uma pressão mais uniformemente distribuída.

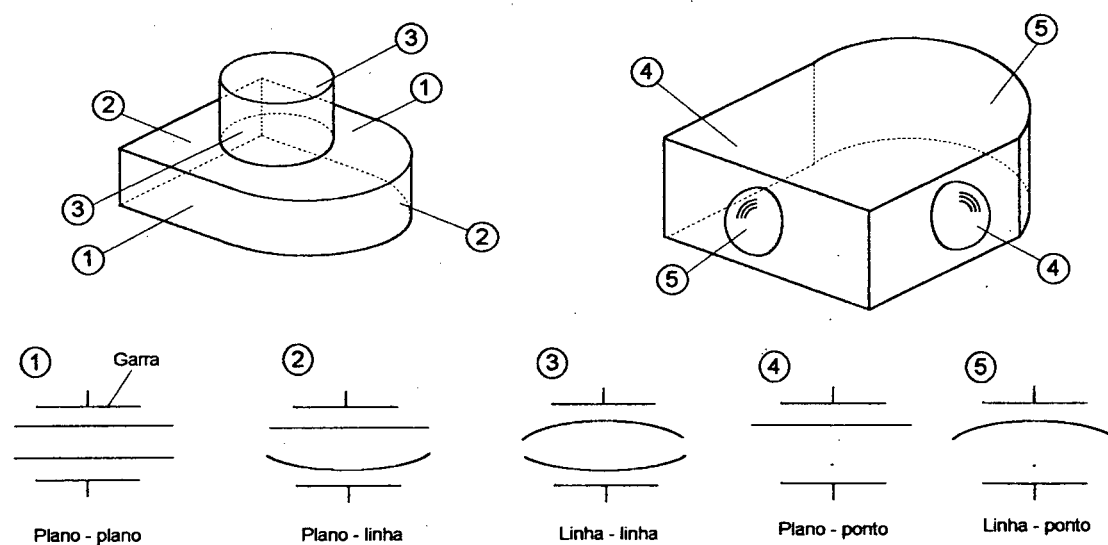


Fig. 3.1 - Tipos de contato entre garra e peça [81]

Pham e Yeo [81] propuseram cinco atributos para determinar e avaliar pares potenciais de superfícies de apreensão, descritos a seguir:

a.1. *Paralelismo*: para se restringir totalmente um objeto por atrito, usando duas superfícies planas, estas devem ter seus vetores normais opostos entre si.

Quando os planos não são paralelos, o ângulo entre eles deve ser menor que duas vezes o ângulo de atrito ψ entre as superfícies em contato. Considerando-se duas superfícies S_1 e S_2 de uma peça, com vetores normais n_1 e n_2 , e usando a condição acima, S_1 e S_2 são

superfícies de prensão adequadas se:

$$\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2 < \cos(\pi - 2\psi)$$

ou
$$\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2 < \cos\left(\pi - \frac{2\psi}{k_s}\right) \quad \text{onde } k_s \text{ é um fator de segurança.}$$

Para agarrar superfícies que não são exatamente paralelas, os dedos da garra devem ter condições de adaptar-se adequadamente, por meio de algum mecanismo de ajuste, como por exemplo os mostrados na Figura 3.2 [81,103].

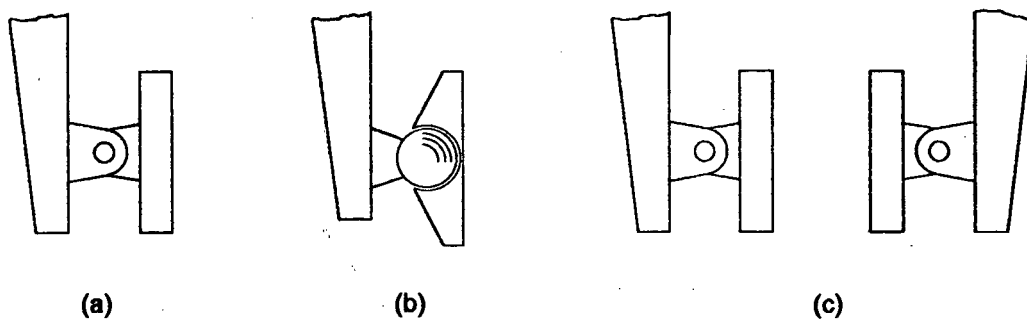


Fig. 3.2 - Dedos com sapatas auto-alinháveis [103]: (a) articulação rotativa em um dos dedos; (b) articulação esférica em um dos dedos; (c) articulação rotativa em ambos os dedos

Um material bastante utilizado para a construção das sapatas é aço recoberto com poliuretano. O poliuretano pode ser conformado ou usinado para qualquer configuração e resiste a milhares de horas de compressão e descarregamento. Ele também possui alto coeficiente de atrito e não provoca marcas na peça.

Na prática, para uma prensão de precisão, tais mecanismos de ajuste não são utilizados e os mordentes têm apenas uma conformação ou adaptabilidade reduzidas. Assim, a condição estabelecida acima torna-se

$$\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2 < \cos(\pi - \theta_c)$$

onde θ_c é o grau de conformabilidade dos mordentes. Para que estas garras possam operar dentro de limites de precisão adequados, o ângulo máximo recomendado entre duas superfícies deve ser $\theta_c = 5^\circ$ [81].

a.2. Área de projeção: a área de projeção entre um par de superfícies vai determinar a área mínima disponível que poderia ser usada como superfície de contato pelos mordentes da garra. Esta área pode ser facilmente obtida projetando-se uma superfície sobre a outra e considerando a área comum entre elas, Figura 3.3. A área resultante será diferente dependendo de como a projeção é feita, mas esta discrepância será pequena, dado que as superfícies, considerando o ângulo máximo de 5° adotado no item anterior, são aproximadamente paralelas.

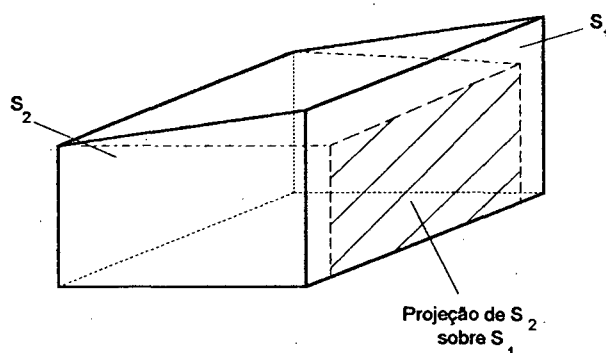


Fig. 3.3 - Projeção de uma superfície sobre a outra

Um valor limite mínimo para a área pode ser calculado como segue:

$$A_{\text{mín}} = F/P$$

$$e \quad F = \frac{k_s W}{2\mu}$$

onde F é a força estimada de prensão; P é a pressão permissível aplicada sobre a superfície, dependente do módulo de elasticidade do material; k_s é um fator de segurança dependente da aceleração máxima do robô; μ é o coeficiente de atrito e W é o peso da peça.

Uma condição essencial para um par de superfícies ser adequado à prensão é que

$$A \geq A_{\text{mín}}$$

onde A é a área comum de prensão disponível entre as superfícies.

a.3. **Distância:** a distância perpendicular entre um par de superfícies paralelas determinará a abertura mínima dos dedos. Se as superfícies são ligeiramente não-paralelas, é usada a distância entre os centróides da área comum entre as duas superfícies, Figura 3.4.

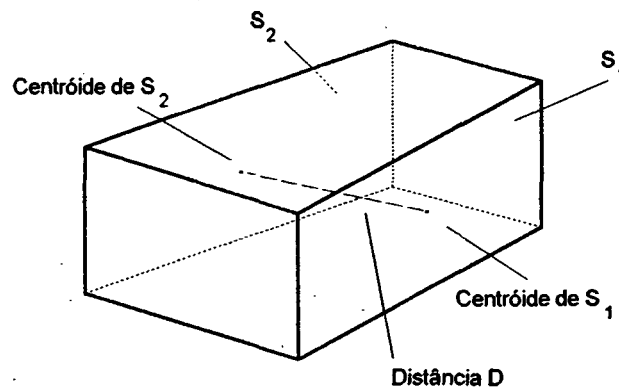


Fig. 3.4 - Distância entre duas superfícies não-paralelas [81]

Os dedos de uma garra podem ser construídos de modo a adequar-se a quaisquer distâncias existentes entre um par de superfícies. Desta forma, o atributo de distância, sozinho, é inadequado para se comparar superfícies. Segundo Pham & Yeo [81], isto pode ser contornado definindo-se um atributo angular, que leva em consideração tanto a área de interseção quanto a distância entre um par de superfícies, como segue:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A}}{D} \right)$$

Este atributo fornece uma indicação geral da probabilidade de "travamento" da peça dentro da garra e incerteza de preensão. Para explicar melhor o travamento, considere-se o exemplo a seguir, de uma peça retangular simples, apoiada sobre uma de suas superfícies, Figura 3.5.

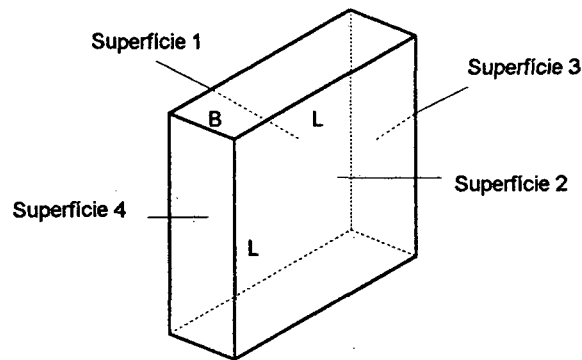


Fig. 3.5 - Peça retangular com dimensões $B \times L \times L$ [81]

Com atrito suficiente, esta peça pode ser agarrada usando-se tanto as superfícies 1 e 2 quanto as superfícies 3 e 4. Entretanto, se há erros relativos de posicionamento entre a garra e a peça, de forma que a garra toque as arestas da peça, esta pode então "travar-se" dentro dos dedos e ser segura por estas arestas, Figura 3.6. Este estado de prensão é indesejável, e deve ser evitado.

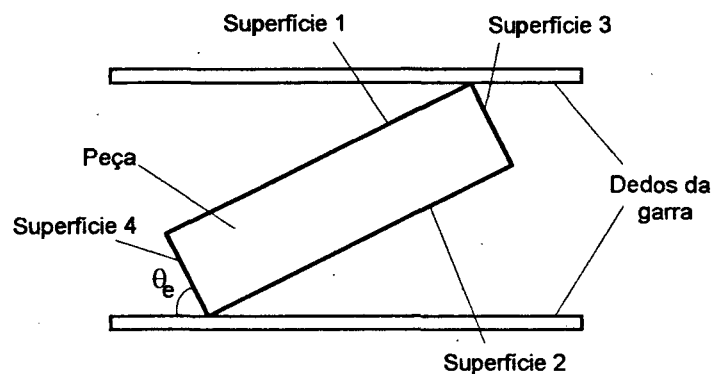


Fig. 3.6 - Exemplo de "travamento" [81]

Este travamento pode ocorrer durante a prensão quando os contatos das arestas estão contidos dentro das cunhas de atrito um do outro. Na Figura 3.7, isto significa que

$$\alpha_i < \psi \quad \text{onde} \quad \alpha_1 = \tan^{-1}\left(\frac{L}{B}\right)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{B}{L}\right), \text{ e}$$

ψ é o ângulo de atrito.

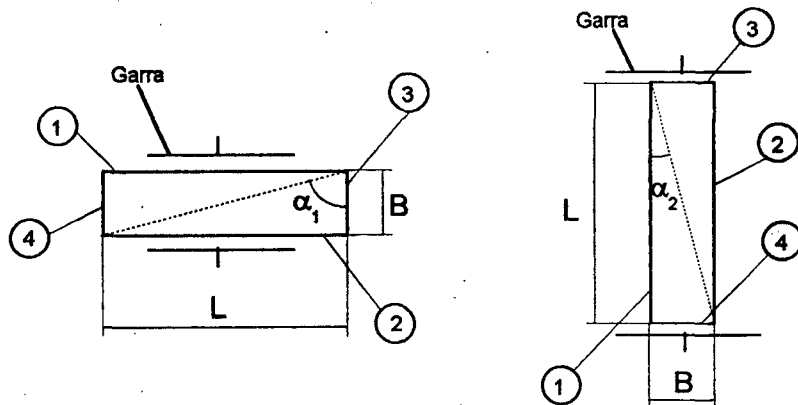


Fig. 3.7 - Ângulos α_1 e α_2 para um objeto [81]

Se $\alpha_i > \psi$, então a condição para o "travamento" é

$$\theta_{ei} > \alpha_i - \psi$$

onde θ_e é o erro posicional angular relativo entre a peça e o dedo. Isto implica que, para superfícies com um maior α , é necessário um maior θ_e , e assim a probabilidade de "travamento" é menor. Neste caso, como $\alpha_1 > \alpha_2$, as superfícies 1,2 são consideradas um par melhor para a preensão que as superfícies 3,4. Assim, em geral, o ângulo α pode ser usado como uma medida da resistência ao "travamento" de um par de superfícies.

a.4. Momento: a peça pode exercer torques tanto estáticos quanto dinâmicos nos dedos da garra (ou no pulso do robô). A magnitude dos torques depende do peso da peça, da direção de aceleração da garra e das distâncias perpendiculares entre o centro de massa e os eixos individuais de rotação.

O eixo real de rotação da peça dentro da garra é difícil de ser determinado, pois é dependente da posição e da direção da aceleração do robô. Considera-se, como simplificação, que a peça tende a girar em torno de um dos três eixos ortogonais mostrados na Figura 3.8. O ponto P é o ponto médio entre as duas superfícies de preensão. O eixo de preensão é definido como o eixo que passa pelo centróide da superfície de preensão e é perpendicular a ela.

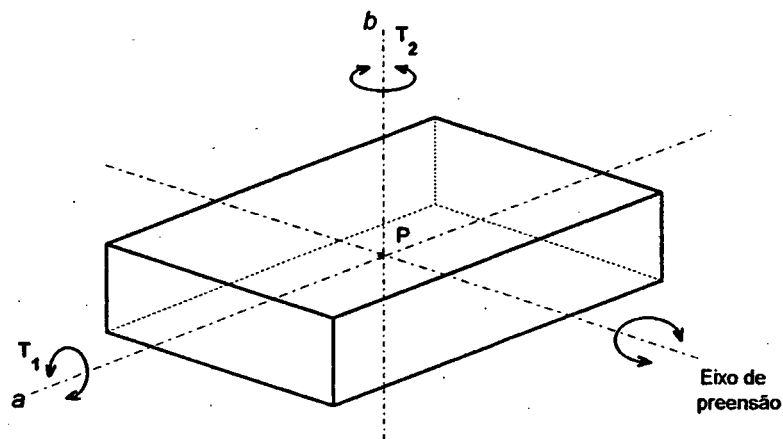


Fig. 3.8 - Eixos ortogonais de rotação da peça [81]

Qualquer torque em torno do eixo de preensão provocará o movimento da peça relativamente aos planos dos dedos (tombamento), enquanto torques em torno dos dois outros eixos provocarão uma inclinação da peça dentro dos dedos, que força-os-á a se abrirem, Figura 3.9. O tombamento é contrabalançado apenas por forças de atrito entre a peça e os dedos, enquanto os outros movimentos são contrabalançados por forças normais de reação nos planos dos dedos.

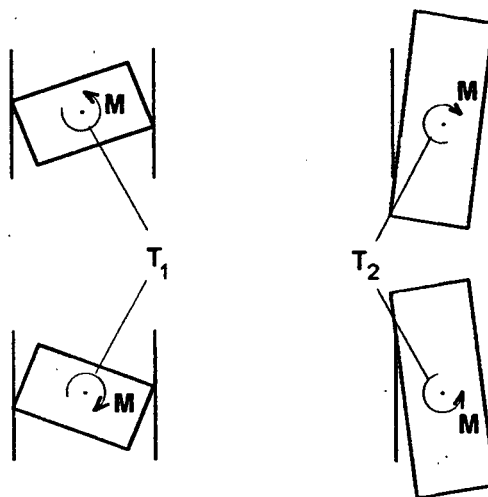


Fig. 3.9 - Momentos torçores em torno de T_1 e T_2 [81]

Em geral, é desejável agarrar a peça com seu centro de massa tão próximo quanto possível ao eixo de preensão e ao eixo da garra, de forma a minimizar os torques totais que

agem na garra.

a.5. *Tipo de superfícies*: as superfícies podem ser externas ou internas. Tomando-se um par de superfícies de contato, elas são consideradas como externas se, para efetuar a preensão, os dedos devam mover-se um em direção ao outro. Caso contrário, serão denominadas superfícies internas.

Via de regra, é preferível fazer a preensão por meio de superfícies externas, pois estas normalmente impõem menos restrições aos movimentos que a garra deve executar quando realiza a manipulação.

b. *Garras a vácuo e magnéticas*: uma garra a vácuo ou uma magnética é usada para manipular objetos que tenham superfícies planas, secas e sem contaminação. Nestes dois tipos de garras, a preensão da peça se dá por meio de uma força de tração, ao invés de uma compressão como nas garras de dedos.

Os contatos planos entre a superfície da peça e os bocais de sucção ou ímãs das garras podem ser tidos como contatos bilaterais de atrito, isto é, existe uma força tangencial às superfícies de contato, μF , onde F é a força de preensão e μ o coeficiente de atrito, e que age no sentido de impedir o escorregamento relativo entre a peça e a garra..

Discute-se a seguir os atributos de uma superfície que são relevantes para a sua classificação e seleção como uma superfície adequada para manipulação por garras a vácuo ou garras magnéticas [20,81].

b.1. *Orientação*: no caso das garras a vácuo e magnéticas, as superfícies horizontais são ideais para se pegar uma peça. Superfícies inclinadas são menos desejáveis porque exigem forças de atrito para se evitar que a peça escorregue em relação aos planos de contato, mesmo quando o braço do robô não está em movimento.

Uma superfície S_1 , com um vetor unitário normal \mathbf{n}_1 , é considerada como uma superfície aceitável para a preensão se

$$\mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_g < \cos(\pi - \theta_a)$$

$$\theta_a = \frac{\psi}{k_s}$$

onde n_g é o vetor direção da força gravitacional, θ_a é o ângulo permisível de inclinação da superfície com o plano horizontal, e k_s um fator de segurança que reflete o estado superficial da peça.

Da mesma forma que para as garras de dedos, será adotado aqui um ângulo máximo de inclinação da superfície com o plano horizontal de 5° . A razão disto é que a colocação das peças manuseadas por estas garras em seu ponto de destino é feita em geral através da superfície oposta à superfície de prensão. Desta forma, devido à acomodação da garra e à elasticidade do bocal, a peça poderá apresentar um deslocamento angular em relação ao eixo central da garra, prejudicando o seu bom posicionamento destino. Além disto, devido à força de reação que surge quando a peça é posicionada contra alguma superfície ou estrutura, quanto maior o ângulo de inclinação, maior a probabilidade da garra escorregar tangencialmente sobre a superfície de prensão.

b.2. Área: a superfície da peça determinará a máxima área de contato disponível para o bocal de uma garra a vácuo ou o ímã de uma garra magnética. Quanto maior a área de contato disponível na peça, maior a força de prensão que poderá ser obtida. Nos casos discutidos a seguir, foi considerada a pior configuração possível de prensão, ou seja, a peça é segura apenas por forças de atrito.

Para se estimar a área mínima necessária, calcula-se primeiramente a força de prensão aproximada como:

$$F = \frac{k_s W}{\mu}$$

onde μ é o coeficiente de atrito e k_s é um fator de segurança dependente da aceleração do robô e do estado superficial da peça. Para uma garra a vácuo, a área mínima de sucção é:

$$A_{\min} = \frac{F}{\Delta p}$$

onde Δp é a diferença de pressão entre o ambiente externo e o interior do bocal.

Para uma garra magnética, dado que existe uma relação linear entre a força de prensão e a área de contato, então:

$$A_{\min} = \frac{F}{k_m}$$

onde k_m é uma constante magnética.

b.3. Distância: é a distância perpendicular do centro de gravidade da peça à sua superfície. Aqui o formato da superfície é representado como um quadrilátero de lados L e o centro de massa está posicionado ao longo do eixo de prensão, a uma distância D da superfície, Figura 3.10.

Como no caso da garra de pinças, é definido um atributo angular que leva em conta tanto esta distância quanto a área superficial:

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A}}{2D} \right)$$

Em geral, superfícies com maior ângulo α são consideradas como superfícies de contato melhores que aquelas com ângulo menor, pois, em caso de inclinação da garra, é necessária, no ponto superior de contato, uma força menor para contrabalançar o momento criado pelo peso da peça, o que reduz a probabilidade de ocorrer um desprendimento entre a garra e a peça neste ponto.

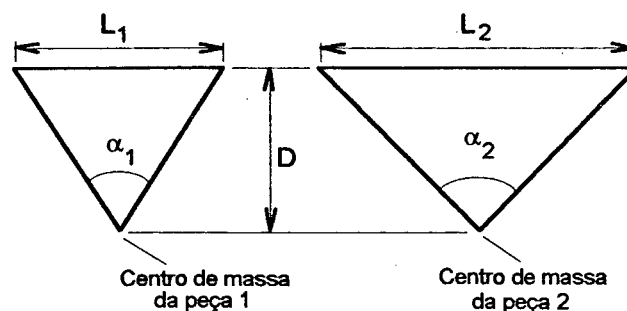


Fig. 3.10 - Ângulos α para duas superfícies diferentes [81]

b.4. *Momento*: é o torque estático exercido pelo peso da peça. O braço de alavanca neste caso é a distância perpendicular do centróide da superfície ao eixo passando pelo centro de massa, paralelo ao vetor peso unitário n_g , Figura 3.11. Obviamente, as superfícies associadas a braços de alavanca menores são mais adequadas à preensão.

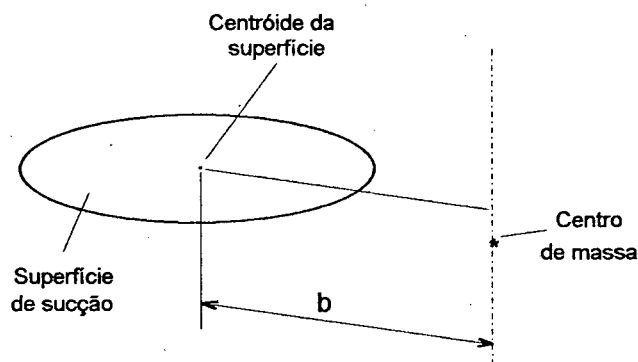


Fig. 3.11 - Braço de alavanca (b) para uma superfície [81]

3.2.2. DIMENSÕES E TOLERÂNCIAS

Uma das primeiras características a serem consideradas na seleção da garra é o tamanho da peça, pois as suas dimensões vão determinar como ela será manipulada [79].

Dimensões relativamente pequenas das peças condicionam não apenas um pequeno volume de trabalho para os órgãos de preensão da garra, mas sobretudo exigem, com relação às vizinhanças da peça, também pequenas dimensões da garra como um todo.

Esta exigência está em concordância com o desejo para a menor massa possível para a garra, devido às altas velocidades de manipulação que são necessárias na produção de pequenas peças, por questões de produtividade.

Se a garra, num sistema produtivo, não pode abrir-se o bastante para compreender todas as peças, pode ser necessário incluir-se nela algum detalhe para permitir o manuseio.

Assim, recomenda-se a adoção das técnicas de projeto voltado à montagem, ou seja, as ferramentas (garras) utilizadas e as peças devem ser projetadas em paralelo. No projeto para montagem, o conhecimento das ferramentas de montagem e da seqüência de operações são os

fatores mais importantes a serem considerados. Assim, a peça poderá conter pontos ou detalhes projetados para mais fácil agarramento e manipulação [79].

Desta forma, ao projetar peças para o manuseio por robôs, deve-se garantir:

- uma boa acessibilidade das superfícies de contato para os órgãos de preensão,
- uma precisão de prensão reprodutível nestas superfícies,
- um assentamento seguro da peça na garra,
- uma disposição favorável das superfícies de contato, para evitar freqüentes mudanças das forças de preensão e trajetórias de fechamento, caso haja mais de um tipo de peça.

Por exemplo, no chassi para montagem de equipamentos eletrônicos da Figura 3.12, os polígonos no centro foram colocados apenas para permitir seu manuseio por uma garra de dois dedos, evitando que a garra tenha que abrir-se excessivamente ao pegar o chassi pelos lados. A garra pega a peça abrindo-se (preensão interna), pois neste caso um ângulo de preensão maior estabiliza a peça durante o transporte. Além disso, a forma poligonal fornece uma cunha que centraliza a garra automaticamente.

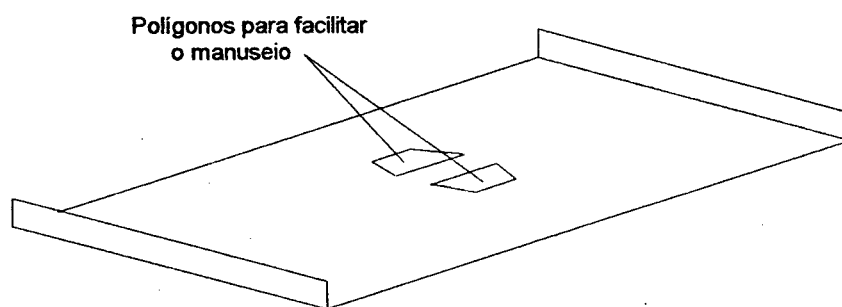


Fig. 3.12 - Adaptação para facilitar o manuseio [79]

Outro exemplo de adaptação está mostrado na Figura 3.13, onde uma garra de dois dedos paralelos não pode pegar o triângulo (a), mas com a adaptação feita em (b) isto torna-se possível, pois existe a formação de superfícies paralelas.

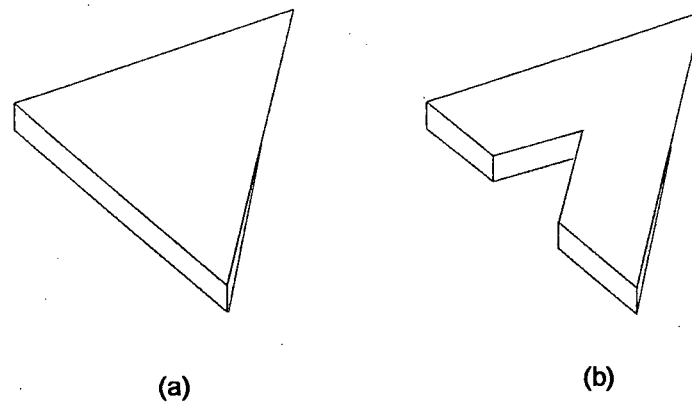


Fig. 3.13 - Modificação na peça para facilitar o manuseio [79]

As tolerâncias de fabricação da peça vão determinar a precisão com que a garra vai pegá-la. Quanto mais estreitas as tolerâncias, tanto mais próximo do previsto será feita a preensão. Os mordentes da Figura 3.2 podem ser usados para compensar desvios de paralelismo de até 5°. Os desvios de afastamento entre as superfícies são compensados pelo ângulo de abertura da garra.

Outra forma de se compensar automaticamente os desvios posicionais e de fabricação das peças - por exemplo para peças em bruto saindo de fundição ou forjamento, que não possuem tolerâncias dimensionais estreitas - é a utilização de sensores de proximidade e táteis, que permitem um correto posicionamento da garra sobre a peça.

3.2.3. PESO

A força necessária para se segurar uma peça só pode ser calculada ou estimada quando o peso é conhecido. Além disso, o peso da peça P pode também ser usado para se determinar o peso máximo permissível para a garra P_g , pois os seus pesos combinados devem ser sempre menores que a capacidade de carga L do robô, conforme a estimativa (grosseira):

$$P + P_g < L$$

Por exemplo, se o peso da peça representa uma grande proporção da capacidade de carga do robô, seria recomendável usar garras a vácuo, que geralmente são mais leves que os outros tipos.

Além do peso, a peça sofrerá acelerações, cuja direção e magnitude dependerão dos movimentos do braço. Estas acelerações causarão os momentos em torno dos eixos principais de preensão, que tenderão a forçar a abertura da garra (Figura 3.9).

O peso da peça é um dos fatores que contribui para a imprecisão posicional do robô. Quanto maior o peso na extremidade, maiores as deformações provocadas nas ligações do braço, e assim menor a acurácia posicional do manipulador [5,23].

3.2.4. MATERIAL

Da especificação do material podem ser obtidas a resistência e a rigidez da peça, e assim é possível estimar-se a pressão máxima de aperto que pode ser aplicada sobre o material sem danificá-lo (vide o cálculo da área mínima na Seção 3.2.1.a.2).

O material da peça pode determinar o tipo de garra adequada ao seu manuseio. Por exemplo, se uma peça é frágil, garras a vácuo ou magnéticas são recomendáveis, por aplicarem uma pressão uniformemente distribuída sobre a superfície de contato. O material também pode ser um impeditivo para as garras. Por exemplo, uma garra magnética só pode ser utilizada para o manuseio de materiais ferrosos.

O coeficiente de atrito μ depende da combinação de materiais em contato entre a garra e a peça, e, para se evitar escorregamento relativo entre ambas, pode-se escolher para os dedos um material que forneça um atrito maior.

3.2.5. ESTADO SUPERFICIAL

Para a preensão, deve-se dar preferência às superfícies não polidas, pois as polidas devem ser manipuladas com mais cuidado, para se evitar mordeduras e riscamento.

O coeficiente de atrito de uma peça também poderá ser uma função de seu acabamento superficial. À medida em que as superfícies se tornam mais polidas, tendendo ao caso extremo de um bloco padrão, a tendência é haver uma interação maior entre os átomos metálicos da garra e

da peça, o que eleva consideravelmente o coeficiente μ .

Além do acabamento superficial, também o grau de porosidade e permeabilidade do material é importante. Se as superfícies da peça são porosas e permeáveis ao ar, deve-se evitar a utilização de garras a vácuo.

Deve-se evitar as superfícies que apresentem contaminação por óleo ou graxa, pois estas podem interferir negativamente no contato entre a peça e a garra, especialmente no caso das garras a vácuo e magnéticas.

3.2.6. TEMPERATURA

A temperatura da peça também pode afetar a escolha da garra. Algumas precauções especiais ou alterações de projeto podem ser necessárias quando uma garra é utilizada em condições extremas.

Em geral evita-se a utilização de garras a vácuo ou magnéticas para o manuseio de peças a altas temperaturas. Para o seu manuseio podem ser utilizadas garras de pinça, desde que seus dedos sejam longos e feitos de ligas especiais com elevado ponto de fusão. Os dedos longos facilitam a dissipação do calor. Se a temperatura da peça estiver acima de 400°C, recomenda-se a utilização adicional, na garra, de blindagens térmicas ou coberturas resistentes ao calor.

O limite operacional para as garras de sucção é de 95°C, já que a borracha ou o plástico usados na confecção dos bocais podem ficar comprometidos a temperaturas mais altas. Para as garras eletromagnéticas o limite é de 200°C, pois pode haver perda na capacidade de magnetização dos materiais acima desta temperatura, muito embora algumas garras de ímãs permanentes possam ser usadas em temperaturas de até 500°C [4,7,8,11,12].

A partir da análise do ciclo de produção pode-se obter uma estimativa da temperatura da peça a ser manipulada. Por exemplo, é possível saber a temperatura com que a peça é retirada de um torno ou a temperatura com que ela sai de uma matriz de forjamento.

3.3. CARACTERÍSTICAS DA GARRA

Outro importante fator no projeto de uma garra é a consideração das características e limitações dos diversos tipos de garras, de modo a otimizar sua aplicação. A seguir é feita a discussão destes parâmetros

3.3.1. PESO

As garras devem ser tão leves quanto possível, de forma a minimizar as cargas estática e dinâmica do robô. Está claro que o peso da garra mais o da peça deve ser menor que a capacidade do robô, conforme já visto na seção 3.2.3.

A capacidade de aceleração dos robôs industriais depende grandemente das massas aplicadas à ponta do braço que, assim, influenciam o ciclo de trabalho obtível e também o máximo peso permissível da peça [32].

Baz & Vossoughi [102] estudaram o campo de tensões atuantes numa garra específica, com o objetivo de construir garras suficientemente robustas para suportar as forças de aperto, e o mesmo tempo tão leves quanto possível para maximizar a capacidade de carga do robô.

Se mais de uma garra for aceitável para o manuseio, então a mais leve deve ser preferida.

3.3.2. DIMENSÕES

As garras devem ser tão pequenas quanto possível, de forma a se reduzir o espaço requerido por elas no volume de trabalho.

Em geral uma garra, para uma faixa particular de peças, é mais versátil em seu uso quanto menor e mais leve ela for. Com uma garra menor, o volume permissível para a peça aumentará, considerando-se os problemas de interferências laterais ao pegar e depositar as peças nos equipamentos de entrada e saída.

3.3.3. FORÇA DE PREENSÃO

A capacidade de uma garra é determinada pela máxima força de preensão que ela pode produzir. Quanto maior a força, maior o peso que ela pode manusear. Como critério geral, pode-se estabelecer que a garra deve agir sobre a peça com tanta força quanto necessária para o manuseio, mas ao mesmo tempo tão pequena e bem distribuída quanto possível [29,81].

A força necessária de aperto é determinada a partir do coeficiente de atrito entre as superfícies. A força de aperto deve ser suficiente para que durante os processos de partida e frenagem, sobretudo quando se toca um batente, não resulte um deslocamento indesejado da peça. Para isto, é bastante uma força de aperto que mantenha a peça firmemente segura para picos de aceleração de 5g [78].

A faixa de forças de aperto que podem ser exercidas pela garra dá também uma medida da sua flexibilidade, pois uma ampla faixa permite à garra manusear peças de pesos e resistências variados. A dosagem da força de aperto é feita utilizando-se sensores de força. Isto é necessário para o manuseio cuidadoso de peças sensíveis.

Quando se manuseia várias peças diferentes, uma garra com força de aperto constante pode também ser usada. Contudo, a faixa de variação de pesos das peças deve ser estreita, para que a garra não aplique forças excessivas, ou maiores que as permissíveis, sobre as peças mais leves. Isto deve ser levado em conta principalmente quando se manipula peças frágeis. Neste caso, pode-se ter várias garras com força de aperto constante, e proceder à sua troca ao manusear peças pertencentes a faixas diferentes de peso.

3.3.4. ÁREA DE CONTATO NA PEÇA

Refere-se à quantidade de área requerida por uma garra e sua localização. As áreas de atuação entre o dedo e a peça têm especial significado. A estabilidade de posição e orientação da peça entre os dedos é proporcional às áreas de atuação. Havendo apenas dois pontos de contato entre a garra e a peça, a posição desta pode mudar devido a um escorregamento. Além disso, devido à pequena área de contato, resulta uma pressão maior de preensão.

Três ou mais pontos de contato estabilizam a posição da peça, Figura 3.14. Esta área pode tanto ser um único plano, quando se usa um bocal de sucção ou um ímã, ou vários planos, quando são utilizados vários bocais ou dedos. A prensão também pode ser feita sobre uma superfície, Fig. 3.14-(d), mas neste caso a garra se torna muito específica e não é adequada para o manuseio de outras peças, mesmo que sejam cilíndricas, mas de diâmetros diferentes.

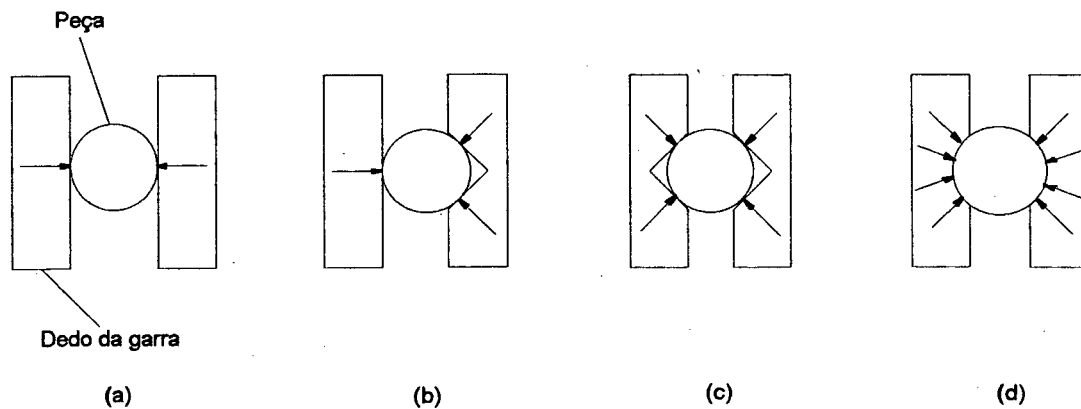


Fig. 3.14 - Aumento da superfície de atuação através de perfis adequados, para garras de dois dedos [18]

As áreas de contato possíveis são estabelecidas com base em uma avaliação das informações da peça e de sua posição nos equipamentos de alimentação e descarga. Para se estabelecer as áreas de contato, deve-se considerar a faixa de movimentos admissíveis para a inserção da garra, com suas respectivas tolerâncias, por exemplo devido a vibrações, e à área de movimentação dos elementos de garra durante a abertura e fechamento.

Este critério deve ser utilizado também para se checar a área de contato requerida pela garra contra a área de contato disponível na peça, para se garantir que esta é maior que aquela, permitindo que a peça seja mantida por atrito.

3.3.5. CAPACIDADE DE ABERTURA DA GARRA

A faixa de abertura entre as aberturas máxima e mínima dos dedos de uma garra tipo pinça é útil para se checar se uma garra em particular é capaz de manusear toda uma faixa de

peças. Isto é possível se a diferença entre as separações máxima e mínima dos dedos, $(d_{\text{máx}}, d_{\text{mín}})$, exigidas pelas peças, é menor que a faixa de abertura, R_j , da garra, isto é:

$$d_{\text{máx}} - d_{\text{mín}} < R_j$$

Se uma garra não é suficiente para se cobrir toda a faixa, então pode ser necessário o uso de mais de uma garra para isto:

$$d_{\text{máx}} - d_{\text{mín}} < R_{j1} \cup R_{j2} \cup \dots \cup R_{jn}$$

A abertura da garra pode ser determinada a partir da distância entre as superfícies de prensão, com as seguintes possibilidades:

1. A abertura da garra é projetada de forma a cobrir todo o espectro de distâncias entre as superfícies de prensão das peças.
2. A abertura da garra é projetada de forma que a máxima tolerância de uma faixa de distâncias entre as superfícies de prensão seja coberta. O espectro total de distâncias entre as superfícies de prensão é então coberto pela substituição da garra ou dos dedos.

Assim, a faixa de aberturas da garra pode ser considerada como uma medida da flexibilidade de uma garra: quanto maior a faixa, mais flexível é a garra.

3.3.6. MOVIMENTO DOS DEDOS

Mecanismos simples com movimento rotacional são geralmente usados porque são econômicos de se produzir, têm projeto descomplicado e são confiáveis, particularmente quando cilindros pneumáticos são usados como sistema de acionamento [8].

Entretanto, uma de suas desvantagens é que exigem um dispêndio maior de programação que os mecanismos que fornecem movimentos lineares dos dedos, pois a posição do centro de gravidade da peça em relação às superfícies de contato depende do ângulo de abertura dos dedos, e devem ser calculados para cada caso. Além disso, o movimento dos dedos é mais simples de ser inferido pelo programador no caso de movimento linear, sendo assim menos propenso a causar colisões [8,78].

Para se pegar peças prismáticas, é mais comumente utilizada a garra com movimento paralelo de fechamento dos dedos, que permite obter uma grande área de apoio dos dedos onde haja variações de tolerâncias ou diferenças na distância entre as faces. Estas garras têm a vantagem adicional de poderem pegar concêntricamente peças cilíndricas, mas apresentam as desvantagens de serem em geral volumosas e mecanicamente impróprias para ambientes industriais severos [8,80].

Warnecke [8] recomenda que, na maioria dos casos, não sejam ambos os dedos guiados em paralelo, porque é difícil conseguir-se um alinhamento das superfícies da peça e do dedo, devido às deformações elásticas tanto da garra quanto da peça. Assim, recomenda que um dos dedos seja guiado em paralelo, enquanto a montagem do outro é flexível.

Caso os dedos se fechem em movimento rotacional ou curvilíneo, devem possuir sapatas pivotadas, o que permite que o contato com a peça seja sempre feito uniformemente sobre a superfície, independente de suas dimensões (dentro de uma certa faixa).

3.3.7. ACIONAMENTO

Os dedos de uma garra podem ser acionados pneumática, elétrica ou hidráulicamente. Para uma garra a vácuo, este pode ser gerado diretamente por uma bomba de vácuo ou por um venturi usando ar comprimido. Uma garra magnética pode possuir ímãs permanentes ou eletroímãs. Durante o processo de seleção, esta informação pode ser utilizada para se assegurar que a fonte de acionamento esteja disponível no robô empregado.

Os atuadores são escolhidos de acordo com a força a ser transmitida, velocidade de movimento, peso e volume. É preferível evitar a montagem dos atuadores no braço, pois os sistemas de transmissão que servem à garra limitam a intercambiabilidade [7].

A linha de energia deve terminar em algum tipo de conector no flange. Para as linhas de energia, as opções são [5,78]:

- *Elétricas*: conexões elétricas podem ser feitas por meio de terminais padronizados, se o projeto mecânico do flange permitir um posicionamento preciso das duas metades do conector. Uma

solução alternativa é colocar um botão de material condutor deformável, exposto em um ou ambos os lados do flange. Com a conexão do efetuator, os terminais são pressionados um contra o outro. Materiais adequados são botões de tela de arame ou borracha condutora dopada com prata.

- *Pneumáticas*: conexões pneumáticas adequadas tanto para pressão positiva quanto para vácuo podem ser feitas pressionando-se duas superfícies metálicas e usando um anel de borracha como vedação. Conectores pneumáticos comerciais também podem ser usados, se puderem fazer e desfazer a conexão de forma confiável, quando simplesmente pressionados contra o outro ou separados.

- *Hidráulicas*: conectores hidráulicos são mais difíceis de implementar. Aqui, também, conectores que podem ser operados por simples pressão ou separação deveriam ser usados. Se o manipulador é hidráulico, usar seu próprio suprimento de fluido para operar a garra não é aconselhável, devido ao perigo de contaminá-la com abrasivos.

De preferência, deve-se utilizar para o acionamento da garra a mesma fonte de energia que a do robô, para reduzir o número de condutos de energia, o que facilita e barateia o sistema de alimentação.

Contudo, para satisfazer a objetivos específicos, poderá ser usada uma combinação dos sistemas acima. Por exemplo, devido à sua precisão e repetibilidade, um acionamento elétrico pode ser usado nas juntas do robô, e um acionamento pneumático pode ser usado na garra para rápida atuação [117].

3.3.8. CONEXÃO COM O ROBÔ

Conhecendo-se o robô no qual a garra será utilizada, obtém-se informações sobre os tipos de acionamentos disponíveis para a garra e sobre os tipos de entrada e saída de informações de controle existentes.

A capacidade de carga do robô obviamente limitará o peso máximo admissível para o conjunto garra + peça. A cinemática do robô e a sua aceleração, dependente da trajetória e do

ciclo de trabalho, determinam as forças atuantes na garra.

Robôs de vários fabricantes podem ter configurações diferentes para o flange de montagem. Assim é aconselhável checar se uma garra é projetada para ser utilizada especificamente em um modelo de robô. Uma garra que não seja compatível com o robô utilizado exigirá um flange especial de adaptação, o que reduzirá a capacidade de carga líquida do robô, aumentará o custo total e complicará a operação, sendo assim menos desejável.

Três aspectos principais da conexão mecânica entre o efetuador e o manipulador são a resistência e adaptabilidade do flange de montagem, e a proteção que este permite contra forças excessivas no efetuador [5]:

- Resistência: o flange deve ser capaz não apenas de suportar o peso do efetuador e da peça, mas também de resistir a quaisquer forças inerciais resultantes de rápidas acelerações.
- Adaptação: a maioria dos flanges de manipuladores são estruturas rígidas que não oferecem qualquer adaptação. Em algumas aplicações, entretanto, muito do trabalho do manipulador pode exigir alguma forma de acomodação em resposta a forças surgindo do contato com objetos sólidos. Em tais casos, pode ser economicamente vantajoso prover-se uma capacidade de adaptação no pulso que, ou auxiliará na execução dos movimentos necessários, ou executá-los automaticamente.
- Proteção contra sobrecargas: é extremamente desejável que o flange proporcione proteção contra ruptura para o efetuador. Uma força excessiva no efetuador deveria causar a ocorrência de uma das duas ações seguintes:
 - (1) a conexão mecânica deveria acomodar-se
 - (2) sensor(es) no flange deveriam sinalizar a ocorrência de uma ação inesperada ao computador de controle da estação, que então tomaria uma atitude para evitar a danificação do efetuador.

A ação de ruptura não deveria deixar o efetuador sem apoio. Dependendo da situação, deve-se decidir sobre a conveniência de se prender o efetuador ao pulso por um cabo de segurança, se o dano que pode resultar da queda ou ejeção do efetuador seria pior que o dano que poderia resultar caso ele ficasse oscilando, pendendo do pulso.

Por exemplo, se o efetuador fica preso a uma peça que está sendo transportada por uma correia transportadora potente, o seu flange deveria sofrer um colapso, de forma que as várias conexões de energia e sinal não sejam danificadas do lado do manipulador. O efetuador seria sacrificado para se salvar o pulso. A substituição de uma ferramenta quebrada não vai tirar o manipulador de produção por um tempo tão longo quanto seria necessário para a reparação de seu flange.

Em linhas de produção onde haja pouca necessidade de o manipulador operar sobre peças em movimento sobre um transportador, a resposta adequada à condição excepcional de ruptura será parar o manipulador tão imediatamente quanto possível. Um manipulador de grande porte pode ser danificado facilmente por uma parada muito rápida, devido à excessiva tensão que a desaceleração pode provocar sobre seus componentes, tais como engrenagens e linhas hidráulicas [5].

3.3.9. CUSTOS

Na maioria dos casos o custo da garra é um fator decisivo na avaliação final de todas as garras que atendem aos requisitos. A garra deve:

- ser passível de ser projetada e fabricada com o mínimo custo possível;
- exigir o mínimo dispêndio de manutenção possível.

Em geral se escolhe a garra mais barata que execute satisfatoriamente a tarefa. Se o custo da garra for considerado muito elevado, então outras alternativas de projeto deveriam também ser investigadas antes para se encontrar uma solução mais econômica.

Um dos fatores que mais influem sobre o custo da garra é o número de peças móveis. Assim, entre duas alternativas, deve ser escolhida a que fornecer o projeto mais simples.

Outro fator que influi enormemente sobre os custos de uma garra é a necessidade de utilização de sensores. Portanto, sempre que possível, deve-se evitar sua utilização. Por exemplo, ao invés de se utilizar uma garra possuindo sensores de força, é preferível empregar-se garras que produzem forças de prensão diferentes, e proceder-se à sua troca ao manipular peças mais frágeis.

3.4. POSICIONAMENTO DAS PEÇAS NA GARRA

Com base nas superfícies de preensão estabelecidas na especificação de performance, podem ser desenvolvidos dedos que asseguram uma preensão suficientemente segura de acordo com as forças aplicadas à peça.

Na preensão por forma, as forças de preensão são transmitidas como forças normais entre as superfícies ativas. Por outro lado, no agarramento por pressão, as forças de preensão são transmitidas por atrito como forças tangenciais entre as superfícies ativas. As forças transmitidas dependem neste caso da força de aperto e do coeficiente de atrito estático entre as superfícies.

Em contraste com a preensão por forma, forças normais devem ser aplicadas, antes que se obtenha a fixação posicional. Se estas forças normais para se produzir as forças de atrito não estão presentes, por exemplo devido a uma falta de energia, a fixação não é mais garantida. Assim, é aconselhável fixar a posição das peças em relação ao robô tanto quanto possível por agarramento por forma [8].

Dependendo das superfícies de contato, resultam várias possibilidades para se produzir um agarramento por forma.

3.4.1. PEÇAS CILÍNDRICAS

Se peças cilíndricas são pegas pela sua superfície cilíndrica, o agarramento por forma e a centragem podem ser conseguidos por meio de sistemas de dois, três ou mais pontos ou de linhas, Figura 3.15.

A vantagem de um sistema de três pontos sobre os outros é que se consegue uma centragem efetiva. Problemas de centragem são encontrados especialmente nas peças que possuem grandes tolerâncias, como peças em bruto de fundição ou forjamento. Uma solução é, por exemplo, a garra de hastes flexíveis, Figura 3.16.

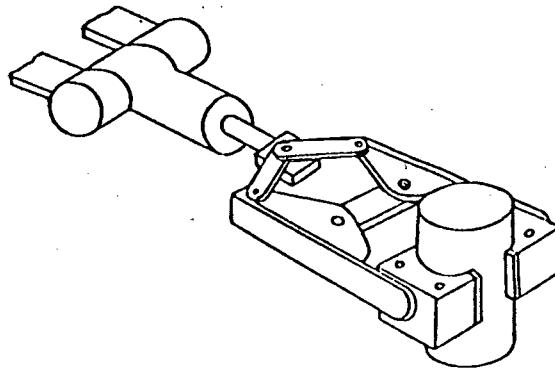


Fig. 3.15 - Garra para peças cilíndricas [30]

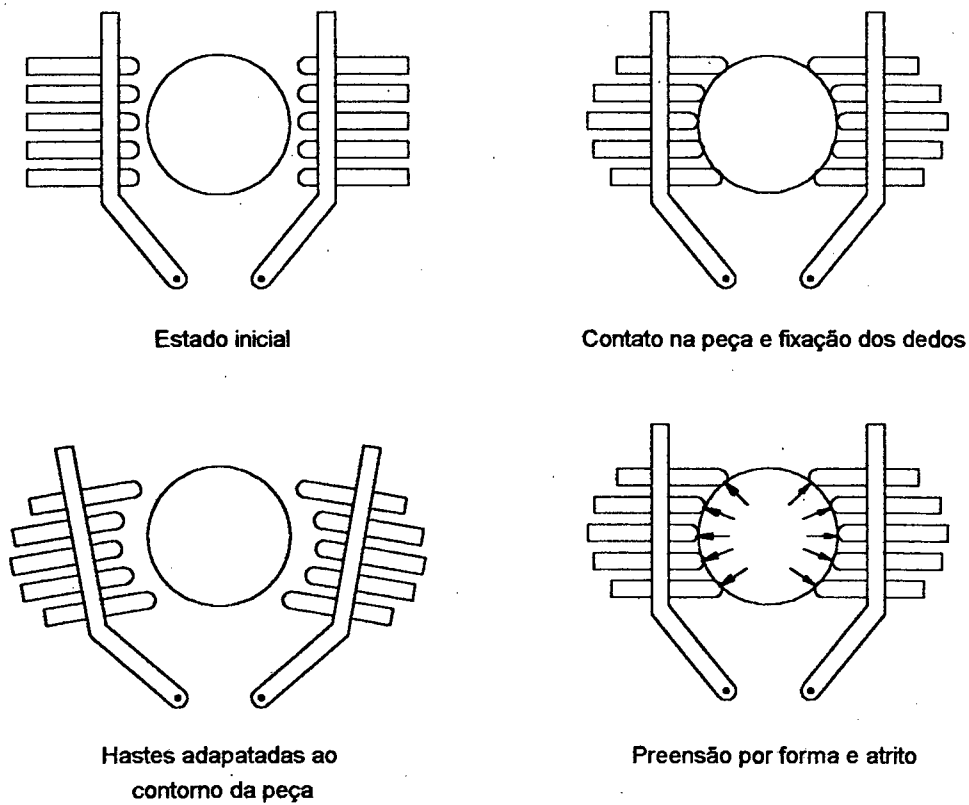


Fig. 3.16 - Garra de hastes flexíveis [18]

3.4.2. PEÇAS DE FORMAS IRREGULARES

Neste caso, o agarramento por forma pode ser obtido por vários procedimentos

distintos:

- (a) Produção de um negativo das peças pela usinagem ou conformação dos dedos da garra.
- (b) Produção de uma forma negativa das peças por moldagem com materiais plásticos. Com isto consegue-se uma prensão segura e bem posicionada das peças, Figura 3.17.
- (c) Produção de um negativo da peça por moldagem com dedos intercambiáveis, por exemplo com uma série de lâminas que são ajustadas após montagem manual, Figura 3.18.
- (d) Produção de uma forma negativa da peça usando-se materiais elásticos – borracha ou plásticos – como órgãos de contato dos dedos, ou usando-se dedos deformáveis, que se adaptam à geometria da peça, como por exemplo as garras maleáveis.

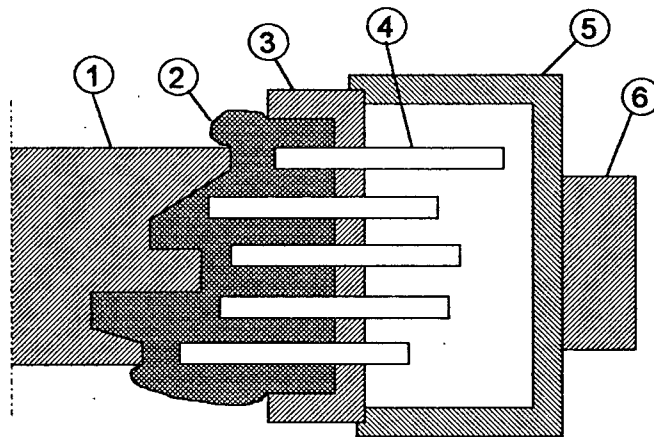


Fig. 3.17 - Garra amoldável com pinos de reforço [4,8]. (1) Peça; (2) Material plástico; (3) Suporte para o material plástico; (4) Pinos de reforço; (5) Suporte adicional; (6) Dedo da garra

3.5. TAREFA

As exigências sobre a garra dependem basicamente da tarefa a ser realizada. Esta pode ir de um simples transporte a operações mais avançadas, por exemplo centrar e orientar peças, executar movimentos adicionais ou levar informações sobre as peças para o sistema de controle do robô [8].

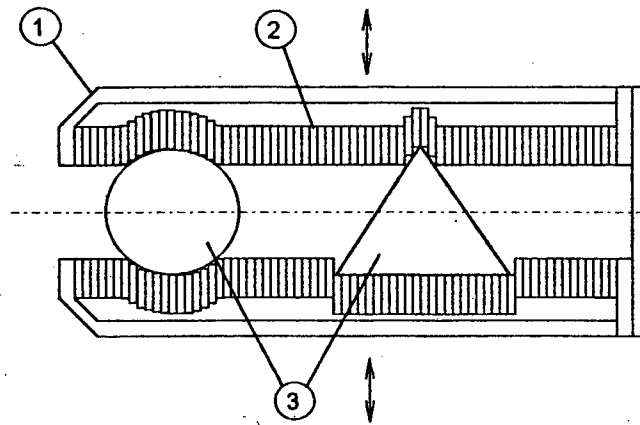


Fig 3.18 - Garra adaptável à forma das peças. (1) Dedo da garra; (2) Lamelas metálicas; (3) Peças.

3.5.1. TIPO DE TAREFA

Três tipos básicos de tarefas podem ser identificados; eles são, em ordem crescente de complexidade:

- a. Operação de transferência (pick-and-place): a peça é simplesmente pega, transportada e colocada em uma posição discreta.
- b. Processo de usinagem: neste processo, a peça sofrerá variações dimensionais, e, assim, a garra deve ser capaz de adaptar-se a estas variações.
- c. Montagem mecânica: envolve a montagem de diferentes componentes, e desta forma as superfícies de contato de cada peça devem ser escolhidas de forma que não ocorram interferências mecânicas entre os componentes durante a montagem.

Obviamente, a interferência da garra com os outros equipamentos deve ser considerada com todos os tipos de garras.

3.5.2. NÚMERO DE PEÇAS DIFERENTES

O critério para seleção de garras pode variar com o número de peças diferentes envolvidas na tarefa. Os objetos manipulados podem ser os mais diversos, podendo tratar-se de peças, ferramentas ou aparelhos de medição, entre outros. Assim, a garra deve ser bastante

flexível quando deve manusear diferentes objetos alternadamente.

Quando todas as peças são de um tipo padrão, o objetivo será selecionar as melhores superfícies de prensão disponíveis e usar o tipo de garra correspondente. Entretanto, quando ocorre mais de um tipo de peças, estas devem em primeiro lugar ser agrupadas em famílias, de acordo com as suas exigências de prensão [28,79,80]. Diferenças na forma e peso das peças, algumas vezes, tornam impossível a aplicação de uma única garra para todas as peças a serem manipuladas.

Pode-se então usar várias garras diferentes, possuindo órgãos de prensão adequados, e permitindo uma maior flexibilidade ao robô. Alternativas possíveis de solução são [15,82]:

- projetar garras para pegar peças de uma família específica, e proceder à troca da garra ao manipular peças de famílias diferentes. A garra a ser trocada é colocada em um magazine, e a seguir o robô procura a garra seguinte e a pega automaticamente, Figura 3.19;
- projetar apenas os dedos para cada família de peças, mantendo a cinemática consistente com a da garra, e cambiar apenas os dedos ao manipular peças de diferentes famílias, Figura 3.20;
- projetar dedos amoldáveis à forma das peças.

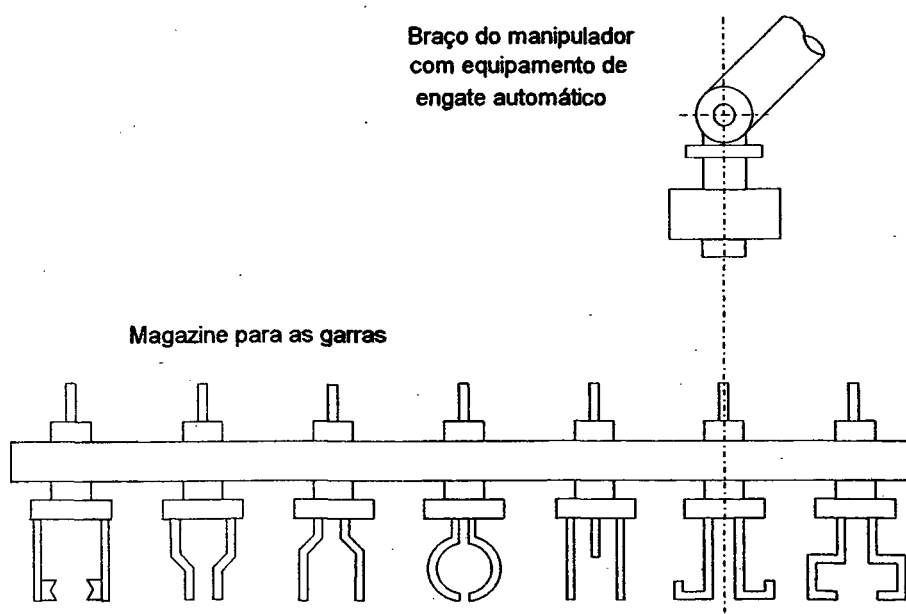


Fig. 3.19 - Sistema de troca de garras para o robô [18]

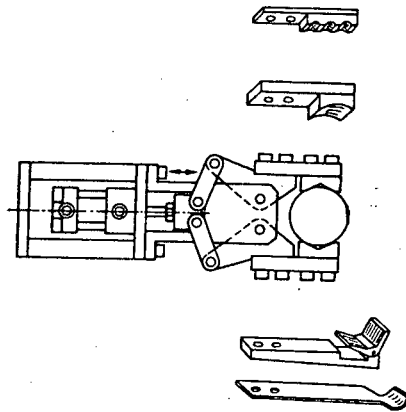


Fig. 3.20 - Sistema de troca dos dedos da garra [4]

Devem ser consideradas as vantagens e desvantagens de cada uma destas soluções, tendo em vista a aplicação da garra. A troca apenas dos dedos, mantendo-se a mesma base da garra, é uma solução preferível, pois é mais barata. Em vez de se reprojeter conexões, mecanismos de acionamento, e sistemas de monitoramento e de montagem da garra no robô, tudo o que precisa ser reprojetoado são os encaixes dos dedos [17]. Neste caso, deve-se tomar o cuidado de projetar os encaixes possuindo uma longa vida, para assegurar boa repetibilidade [1]. Dedos que se adaptam à forma da peça permitem uma universalidade maior no que se refere à preensão, mas carecem de precisão de posicionamento.

Dispositivos que permitem a troca rápida e automática da garra têm sido estudados [11,15,82-84]. O ponto crítico de tais sistemas é a combinação de leveza, capacidade de carga, precisão de movimentos axiais, longitudinais e rotacionais com o interfaceamento das linhas de transmissão hidráulicas, pneumáticas, elétricas e de sinais eletrônicos.

A despeito da grande atividade de pesquisa na área de garras, uma solução inequivocamente ideal ao problema de garras flexíveis ainda não foi encontrada. O robô fica mais lento se pára freqüentemente para trocar as garras, pois deverá dirigir-se ao magazine, efetuar a troca, e posicionar-se sobre uma nova peça. Isto exige um certo tempo, que não pode ser reduzido abaixo de um certo mínimo, tendo um impacto tanto maior sobre a produtividade quanto menor for o ciclo de trabalho do robô [5,12,23]. A correta programação dos movimentos do robô

pode permitir uma redução razoável no tempo do ciclo [136].

Um sistema de troca rápida de garras é particularmente útil quando se tem a manufatura em pequenos lotes e os robôs devem executar múltiplas tarefas, p. ex. o carregamento de máquinas operatrizes [85]. Esta troca poderia ser realizada com uma interface robô/garra que não dependa de parafusos para a conexão mecânica. Imprecisões posicionais inerentes ao robô dificultarão o encaixe de uma garra colocada em um magazine, a menos que o flange possua superfícies cônicas e acomodação para permitir à garra mover-se alguns milímetros, enquanto se encaixa com o braço.

Antes que um sistema de troca de garras seja usado, deve-se tentar minimizar o número total de garras necessárias para pegar todas as peças durante as operações, pelo aumento do número de aplicações possíveis de cada garra. Assim pode resultar um compromisso de se pegar algumas das peças através de superfícies de preensão que sejam aceitáveis, mas não necessariamente as melhores disponíveis.

Isto resulta em um maior trabalho de planejamento, mas a redução das trocas de garras aumenta o volume de peças produzidas, pois reduz a proporção dos tempos de troca, e também reduz o inventário de garras necessário numa linha de montagem, e conseqüentemente as despesas de manutenção.

Segundo Bracken [79], a abordagem mais comum para a classificação em famílias tem sido através do número de dedos que serão necessários na garra. As conclusões variam no que diz respeito à distribuição percentual, mas foi estimado que de 60 a 70% das peças podem ser manuseadas com dois dedos, de 20 a 30% por três dedos, e o restante exige quatro dedos ou ferramental especial.

Contudo uma abordagem considerando múltiplos dedos provavelmente não resolverá o problema, pois os dedos adicionais poderiam complicar ainda mais o processo de montagem, já que podem acarretar maiores interferências com o ambiente, bem como acrescentar custos e complexidade ao efetuador.

3.5.3. VOLUME DE PRODUÇÃO

Se as garras são usadas para produção em lotes pequenos ou médios de um certo tipo de peças, o número de exigências sobre elas cresce em comparação com o seu uso em grandes lotes, pois ocorrerão então várias formas de peças, seus pesos serão variáveis e os dispositivos de admissão nos equipamentos de entrada e saída possivelmente terão projetos diferentes [8].

No caso do manuseio de peças em processos de montagem em lotes pequenos e médios, um número ainda maior de tipos de peças diferentes deve ser manipulado. Assim, o esforço deve ser dirigido no sentido de se projetar garras de forma que elas sejam tão flexíveis quanto outras partes do sistema de manipulação.

O ideal seria se o robô industrial pudesse trocar suas ferramentas e garras como um operário humano quando usa diferentes ferramentas. Ele tornar-se-ia então mais versátil e permitiria a montagem automática de pequenos lotes, onde o maquinário dedicado é antieconômico.

Do lado negativo, a troca de garras e ferramentas de robôs demanda tempo, assim o crescimento da versatilidade da célula de montagem robotizada também causa o aumento do ciclo de trabalho. Em média, o tempo necessário para se levar um braço até o magazine das garras é de poucos segundos, e outro tanto é gasto na troca da garra. O robô tem então que se mover à estação de alimentação de peças, o que pode levar mais alguns segundos. Tendo terminado o trabalho com uma ferramenta, ela tem então que ser novamente trocada, o que pode causar mais alguns segundos de atraso no ciclo [12].

3.5.4. CICLO DE TRABALHO

O ciclo de trabalho de uma tarefa determinará a velocidade com que a garra tem que operar, influenciando desta forma na sua seleção.

Em geral, para ciclos curtos, garras tipo pinça devem ser preferidas, pois podem operar a velocidades maiores. A redução do tempo de ciclo do robô implica em aumento das taxas de

aceleração e desaceleração, o que provoca maiores cargas dinâmicas na peça sendo manuseada. O mínimo ciclo de trabalho do robô é assim freqüentemente limitado pela capacidade da garra em manter a peça com segurança. Quando as taxas de aceleração e desaceleração do robô são elevadas, deve-se evitar garras a vácuo e magnéticas.

A redução na força de retenção pode ser conseguida pela escolha da orientação espacial ótima da garra (que depende também do conhecimento sobre a trajetória seguida pela garra, com as respectivas acelerações), distribuição racional dos pontos de contato da peça e dos elementos de trabalho da garra, e em alguns casos, pelo uso de materiais possuindo coeficiente de atrito maior [32].

Uma solução comum para o problema de redução do ciclo de trabalho é montar duas ou mais garras no pulso de forma que, por movimento linear ou rotação, qualquer uma delas possa ser colocada na posição de trabalho.

Estas garras são em geral combinações de garras individuais, acionadas independentemente. Garras duplas permitem a redução dos tempos de manuseio, por exemplo, na troca de peças em um torno, Figura 3.21. Uma das garras retira a peça acabada e, após uma rotação do pulso, a outra garra insere uma nova peça entre as castanhas do torno, sem necessidade de retornar para pegar uma nova peça.

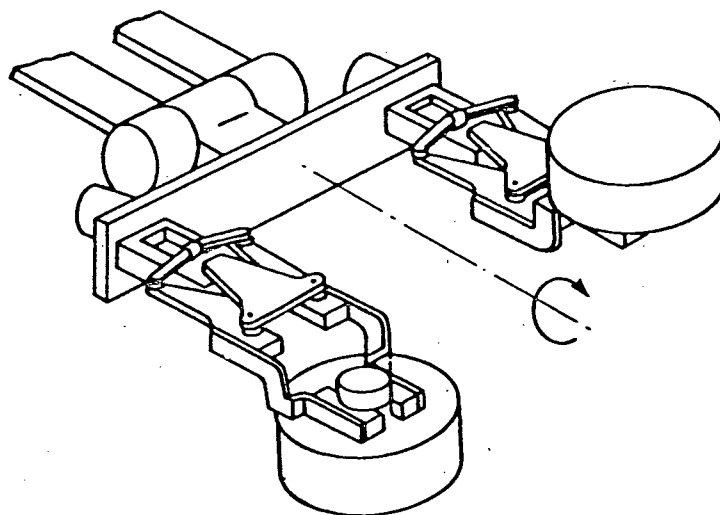


Fig. 3.21 - Garra dupla [30]

Segundo Ránky & Ho [12], estas garras oferecem algumas vantagens:

- a minimização dos tempos mortos da garra – consegue-se uma redução de até 50% do tempo de carregamento comparado com as garras de ação simples;
- a utilização de duas garras completamente diferentes, necessárias devido à grande variação nas dimensões ou formas de peças fabricadas alternadamente por uma máquina;
- taxas muito elevadas de produção poderiam exigir, de outra forma, dois robôs, aumentando o custo da célula de manufatura.

Por outro lado, deve ser levado em conta que, devido à garra dupla, o robô vai carregar um peso duplo e exigir maior volume livre junto à ponta, para evitar interferências com o ambiente.

3.5.5. PRECISÃO POSICIONAL

As garras devem ser tão rígidas quanto possível, de forma que a posição da peça, em relação a elas, possa ser mantida com o máximo de acurácia. Durante os processos de prensão e transferência, as garras devem suportar uma peça na posição mais estável, e mantê-la firme mesmo na ocorrência de choques.

Um fator importante no projeto é a acurácia com a qual um objeto se apresenta para ser pego e com a qual deve ser depositado no equipamento de saída. É claro que, sem o uso de dispositivos sensores especiais, uma peça só pode ser depositada acuradamente se seus erros posicionais iniciais no ponto de tomada são pequenos e a precisão de prensão da garra usada é boa.

Mesmo se só um tipo de peça é pego, as dimensões variam devido a erros de fabricação e a várias condições superficiais. Além disso, a garra pega peças de várias maneiras devido a folgas em seus mecanismos e aos efeitos do atrito. Assim, a posição exata da peça varia sempre, mesmo que o dispositivo de posicionamento seja perfeito [86].

Em geral, quando um elevado grau de precisão é necessário, garras tipo pinça são preferidas, já que a precisão de prensão que pode ser atingida com elas é maior que com os

outros tipos.

Desta forma, são necessárias as seguintes informações sobre os equipamentos de entrada e saída, [8]:

- (a) posição e orientação das peças nestes equipamentos,
- (b) espaço livre em torno das peças,
- (c) posição e dimensões do espaço de trabalho para o robô e a peça,
- (d) forças e momentos admissíveis e necessários para a apreensão.

Durante os processos de agarramento e transferência, as garras devem suportar uma peça na posição mais estável, e mantê-la firme mesmo se houver choques [86].

Sempre ocorre um certo desvio no posicionamento da garra em relação à peça manuseada, ou da peça em relação à sua posição teoricamente correta, o que torna necessário alguns movimentos adicionais de ajuste.

Há duas maneiras de se melhorar a precisão posicional das garras. A primeira, chamada de acomodação ativa, usa sensores para gerar dados que são usados para corrigir o posicionamento da garra. A outra forma, chamada acomodação passiva, usa elementos construídos de forma elástica ou dispositivos autocompensadores, como mancais esféricos ou discos móveis.

Uma forma bastante difundida de acomodação passiva são os mecanismos chamados RCC ("remote center compliance" – centro remoto de flexibilidade), usados para introduzir peças cilíndricas em furos, corrigindo desalinhamentos [4,5,8,10-12,23,87,89,90]. Elementos elásticos são instalados entre a garra e a ponta do braço do robô. Quando a peça toca o chanfro feito no furo, a força de contato gera uma força lateral, que corrige a posição do pino, Figura 3.22.

A acomodação passiva do pulso proporciona os movimentos finos necessários, independentemente do robô. Um aspecto importante mostrado na Figura 3.22-(b) é que a peça pode ser movida lateralmente, ao invés de girar em torno de sua superfície superior. Também podem ser corrigidas as posições quando há um alinhamento lateral, mas ocorre um desalinhamento angular, Figura 3.22-(c).

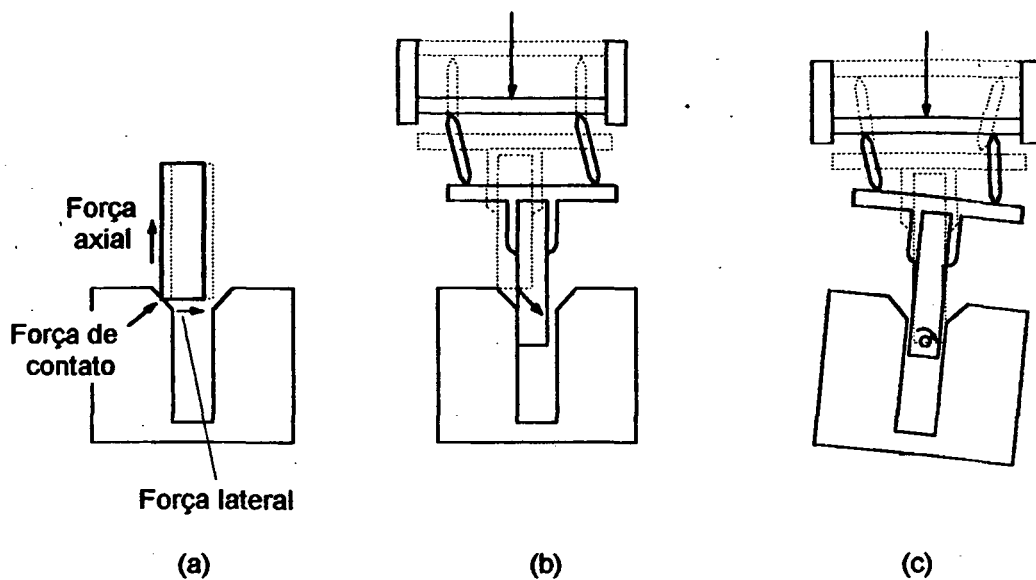


Fig. 3.22 - Sistema RCC [10]

A desvantagem dos sistemas RCC é que eles são adequados apenas para combinações garra/peça de um comprimento específico.

Para melhorar a precisão posicional de um robô, deve-se atuar preferencialmente no pulso, porque este tem um pequeno volume de trabalho [23]. Baseado nisto, Slocum *et al.* [91] desenvolveram um micromanipulador para ser instalado no pulso de um robô, que permite a inserção de uma peça em um furo com diâmetro apenas 0,1-0,2mm maior.

3.6. CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Outro fator que influi na seleção de uma garra é a correta consideração das condições ambientais nas quais o robô opera.

3.6.1. TEMPERATURA AMBIENTAL

A faixa de temperaturas de trabalho de uma garra pode ser usada na verificação contra a

temperatura ambiental, para ver se esta está dentro dos limites admissíveis.

As temperaturas máximas para as peças estão informadas na seção 3.2.6. Estas temperaturas podem ser consideradas como a temperatura ambiental limite para cada tipo de garra. Contudo, na prática, este parâmetro não representa uma limitação, já que a garra está aplicada na ponta de um robô, e estes não são adequados para condições extremas de temperaturas ambientais. A faixa de temperaturas de utilização de robôs vai de 5 a 70°C, e umidade relativa máxima de 90%.

3.6.2. CONTAMINAÇÃO

Limalhas, óleo ou lubrificante e outras substâncias similares no meio ambiente podem contaminar as superfícies da peça. Isto afetará não só o atrito, como também o contato entre os planos de agarramento da garra com as superfícies da peça, caso as limalhas fiquem entre eles.

A contaminação é especialmente indesejada para garras a vácuo e magnéticas, e pode ocasionar falha do agarramento. Por exemplo, a força de prensão de uma garra magnética pode ser significativamente reduzida quando há intervalos de ar entre a superfície de contato do ímã e a peça devido à presença de limalha metálica [7].

Para uma garra a vácuo, superfícies contaminadas por óleo terão um coeficiente de atrito reduzido, e assim um movimento de deslizamento pode ocorrer com uma força externa menor.

3.6.3. RESTRIÇÕES FÍSICAS

As restrições físicas do espaço de trabalho no qual a garra será utilizada relacionam-se com o seu tamanho e com a acessibilidade da peça.

O espaço de trabalho representa uma limitação às dimensões da garra, que deve ser dimensionada tomando-se por base o menor espaço que ocorre para a sua aplicação.

As restrições nas vizinhanças da peça a ser agarrada, devido à localização de outros objetos, podem afetar a acessibilidade da peça como um todo ou de algumas de suas superfícies

em particular. Assim, como já mencionado, é necessário assegurar-se que qualquer superfície usada para a prensão possa ser alcançada pela garra escolhida, sem que haja interferências com outros elementos do ambiente.

As áreas de contato possíveis são estabelecidas com base em uma avaliação da posição das peças nos equipamentos de alimentação e de descarga. Por exemplo, superfícies de uma peça que são ocultas pelos elementos de fixação destes equipamentos não podem ser usadas para a prensão.

Deve ser verificado se há correspondência entre as áreas possíveis de contato nos equipamentos de prensão e descarga. Warnecke [8] cita as possibilidades:

- Caso I: se não há correspondência, as seguintes soluções são possíveis:

1. Disposição intermediária da peça entre os equipamentos de alimentação e descarga.
2. Modificação dos equipamentos de alimentação e descarga.
3. Modificação da peça.

- Caso II: se há correspondência em relação a apenas uma superfície da peça, o que não permite a sujeição entre duas faces opostas, deve-se decidir se uma garra de sucção ou magnética deverá ser usada. Se nenhuma destas puder ser utilizada, uma das três soluções possíveis do caso I terá que ser adotada.

- Caso III: se há correspondência de várias superfícies individuais de contato sem formação de um par de superfícies opostas, deve ser adotado o mesmo procedimento do caso II ou prever-se uma garra de três ou vários dedos.

- Caso IV: se há pares de superfícies de contato que permitem a prensão entre dois dedos, deve-se determinar o par mais favorável. Neste caso, todo o espectro de peças deve ser considerado para se estabelecer correspondência de pares de superfícies de contato dentro de uma faixa maior.

3.7. SEGURANÇA

A literatura sobre robôs industriais trata sobretudo da segurança de toda a célula robótica, não discutindo muito especificamente a segurança com relação às garras [4,5,11,92-95]. Contudo, podem ser estabelecidas algumas regras de segurança no que tange a estas.

As garras seguram materiais ou ferramentas que podem causar ferimentos caso se choquem ou mesmo entrem em contato com pessoas, como por exemplo esmeris ou eletrodos. Assim, deve-se envidar todos os esforços possíveis para reduzir a energia cinética dos robôs, para que seu controle seja mais fácil e confiável. No projeto do braço procura-se colocar os componentes pesados, tais como motores, nas ligações mais próximas da base; da mesma forma, deve-se tentar construir as garras o mais leves possível, seja através da utilização do menor número de elementos, seja pela utilização de materiais mais leves.

Para o caso de entrarem em contato com algum elemento do meio-ambiente, as garras podem posuir sensores de contato, que paralisariam os movimentos do robô, evitando sobrecargas na garra ou no pulso, reduzindo os riscos de danificação.

Outro item, no que se refere à segurança, pode ser o do escape do material que o robô industrial está segurando (p.ex. uma ferramenta ou metal fundido). Entre os acidentes relatados com robôs, a ejeção da peça ocorre com relativa frequência [95]. A força de prensão das garras deve ser então fornecida por molas. A força de acionamento é utilizada para a abertura da garra, e o objeto não pode soltar-se da garra em caso de falta de energia [4].

Também o tipo de abastecimento de energia deve ser considerado. No caso de pintura em spray, a concentração do solvente pode elevar-se acima do nível explosivo. Neste caso, deve-se dar preferência a uma forma não elétrica de transmissão de energia, para evitar a possibilidade de ocorrência de fagulhas. Em um ambiente radioativo, é aconselhável evitar-se a transmissão de energia por sistemas hidráulicos, pois haveria o problema adicional de se limpar óleo contaminado em caso de um acidente [5,118].

As linhas de fornecimento de energia para a garra que ficam pendentes do efetuator podem facilmente prender-se a equipamentos ou ser atingidas, e apresentar desta forma danos

severos. Colocar os condutos de energia ao longo (ou melhor ainda, por dentro) das ligações do manipulador é muito mais seguro. Cada linha de energia deve terminar de preferência em algum tipo de conector no pulso [5].

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

4.1. INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foram levantados os parâmetros e requisitos a serem considerados na seleção de uma garra.

Neste capítulo é apresentada a metodologia pela qual os parâmetros e restrições relativos à geometria da peça, seu material, temperatura e alguns parâmetros relativos às condições ambientais e de segurança são implementados em um programa computacional para a seleção de garras.

Este programa, escrito em Linguagem C++, usa os mesmos princípios de funcionamento dos sistemas especialistas, e poderá servir de base a um possível desenvolvimento, no futuro, de um sistema especialista mais amplo, capaz de auxiliar engenheiros e técnicos da área na tomada de decisões.

Inicialmente é feita a descrição de como funcionam os sistemas especialistas, e parte-se então para a determinação de como os parâmetros devem ser adimensionalizados, em primeiro lugar, para que depois possam ser agrupados, por meio de pesos relativos, para que resulte a seleção de um tipo de garra.

4.2. SISTEMAS ESPECIALISTAS

4.2.1. DEFINIÇÃO

Sistemas especialistas, ou sistemas de apoio à tomada de decisão, são programas que simulam a perícia de um especialista na resolução de problemas e tomada de decisões. Eles utilizam o conhecimento básico que permite a uma pessoa atuar como um especialista quando lida com problemas complexos, fornecendo soluções a problemas de um domínio específico de conhecimentos. Quando se apresenta um conjunto inicial de dados relativos ao problema a ser resolvido, um sistema especialista chega a uma solução por uma forma de "raciocínio" que envolve fazer-se inferências baseadas nos dados fornecidos e no conhecimento disponível [106-108,127].

Estes sistemas são apenas um dos métodos de resolução de problemas da inteligência artificial. A inteligência artificial, como um todo, teve seu início em 1956, quando John McCarthy sugeriu que problemas de senso comum poderiam ser resolvidos pela manipulação de expressões no cálculo de predicados [109,139].

Os sistemas especialistas têm encontrado atualmente várias aplicações industriais. Eles têm sido usados para o projeto de mecanismos [110-114], classificação e seleção de peças e equipamentos [115-119], simulação e controle de processos produtivos [120-125], auxílio à manutenção [126] e determinação de cronogramas [107].

O sistema especialista é composto de módulos, Figura 4.1. A base global de dados armazena os dados relativos ao domínio e registra informações sobre os vários estágios do processo de solução. A base de conhecimentos armazena regras, que representam a visão do especialista. Uma regra estabelece que algo acontecerá se certas condições forem satisfeitas. A regra pode não ser sempre aplicável, e seus conceitos podem não ser precisamente definidos. O motor de inferência é o responsável pelo controle da forma pela qual o sistema raciocina [106,108].

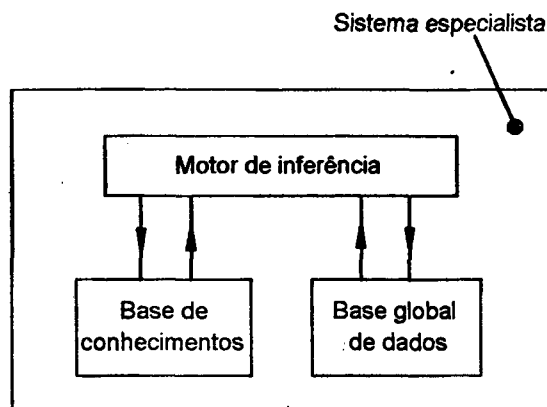


Fig. 4.1 - Componentes de um sistema especialista [108]

Esta estrutura, na qual conhecimentos, dados e lógica estão desacoplados é um dos principais recursos de um sistema especialista, simplificando grandemente seu projeto e manutenção. Outras características comumente associadas a um sistema especialista são sua capacidade de lidar com problemas complexos e de explicar seus resultados, e sua natureza iterativa, voltada para o usuário.

Atualmente, os sistemas especialistas são construídos assumindo-se que o engenheiro de conhecimentos pode determinar uma pequena área do conhecimento, estruturável e bem definida, e desenvolver uma classificação clara de conceitos relevantes e suas características, juntamente com um conjunto de regras que os relacione [127].

Uma parte significativa do processo de desenvolvimento do sistema especialista envolve a aquisição de conhecimentos. Aquisição de conhecimentos é a transferência e transformação da experiência em resolver problemas, de uma fonte de conhecimentos, para um programa de computador. O sistema final refletirá o entendimento do engenheiro de conhecimentos sobre o assunto [107,128,138].

4.2.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O princípio básico da análise de decisões é decompor um problema complexo de decisão em problemas mais simples, resolver estes problemas mais simples, e combinar as soluções através

de uma regra lógica [129].

Em cada problema, o tomador de decisões tem certas alternativas disponíveis, cada uma possuindo atributos ou características específicas.

Assim, o procedimento para tomada de decisões consiste em [131]:

1. estruturar o problema em alternativas e atributos,
2. avaliar cada atributo de cada alternativa,
3. determinar pesos relativos aos atributos, e
4. agregar as avaliações de cada atributo e os pesos respectivos destes em uma avaliação global das alternativas, usando modelos formais de agregação.

As melhores alternativas são então recomendadas baseado nos valores totais obtidos.

A hipótese por trás deste princípio de seleção de alternativas é que a decomposição levará a julgamentos mais precisos que métodos diretos ou holísticos, na maioria das situações, devido à dificuldade das pessoas em fazer avaliações globais diretas sobre problemas complexos.

Os atributos podem ser convenientemente estruturados pelo uso de uma hierarquia, Figura 4.2. No topo da hierarquia encontra-se um atributo global que representa o valor geral do tomador de decisões. Este atributo máximo tende a ser extremamente geral, abstrato e abrangente. Quando se desce na hierarquia, os atributos tornam-se mais específicos, concretos e restritos [129].

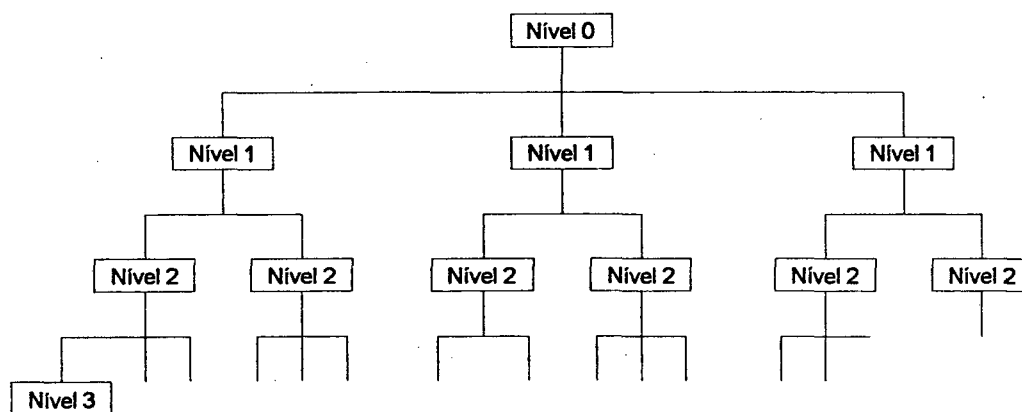


Fig. 4.2 - Hierarquia de atributos [129]

Um conjunto de atributos é considerado completo quando inclui todos os aspectos relevantes do problema, e quando representa totalmente o atributo global. À medida em que se decompõe o conjunto de atributos, aumenta a acurácia na avaliação de cada atributo.

Contudo, há um número ideal de níveis hierárquicos, abaixo do qual os atributos não são suficientemente significativos para permitir a avaliação das alternativas, e além do qual o sistema perde em operacionalidade e acurácia na integração dos atributos, devido ao aumento do número de pesos relativos a estes [129,130]. Na verdade, não há critérios formais para se estabelecer o nível ideal de decomposição de atributos, e isto é deixado para a intuição do analista.

Após se estabelecerem os atributos e as alternativas de seleção de cada um, com os respectivos pesos, parte-se para determinar a melhor solução.

A idéia chave, num problema de decisão multiobjetivos, é chegar a uma solução de compromisso, pois conseguir simultaneamente os valores ótimos de todos os objetivos é geralmente impossível em uma situação realmente conflitante [134].

Para tomar-se uma decisão há um conjunto de m alternativas, cada qual possuindo n valores para os atributos. Denomina-se $A^{(k)}$ à k -ésima alternativa, representada por:

$$A^{(k)} = (x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)})$$

onde $x_i^{(k)}$ ($i = 1, n; k = 1, m$) denota o valor do i -ésimo atributo para a k -ésima alternativa.

É construída uma matriz, onde estão os valores dos n atributos para as m alternativas, Figura 4.3.

Alternativas	Atributos			
	X_1	X_2	..	X_n
$A^{(1)}$	$x_1^{(1)}$	$x_2^{(1)}$	..	$x_n^{(1)}$
$A^{(2)}$	$x_1^{(2)}$	$x_2^{(2)}$	..	$x_n^{(2)}$
\vdots	\vdots	\vdots		\vdots
$A^{(m)}$	$x_1^{(m)}$	$x_2^{(m)}$	..	$x_n^{(m)}$

Fig. 4.3 - Matriz das alternativas e respectivos valores dos atributos

É então atribuído um valor relativo a cada conjunto de valores $x_i^{(k)}$ ($k=1,m$), ou seja, os valores dos atributos em cada coluna da matriz da Figura 4.3 são comparados entre si, e é estabelecido um valor normalizado $\alpha_i^{(k)}$, por exemplo variando de 0 a 1, que indica o grau de satisfação com o valor de $x_i^{(k)}$.

O passo seguinte é indicar o grau de importância que o especialista dá a cada atributo. Assim, para cada X_i , é dado um peso relativo K_i , onde o valor de K_i indica a importância do atributo X_i em relação a todos os atributos. Um exemplo desta valoração está mostrado na Figura 4.4.

Alternativas	Atributos			
	X_1	X_2	..	X_n
	$K_1=0,8$	$K_2=1,0$		$K_n=0,6$
$A^{(1)}$	$\alpha_1^{(1)}=0,9$	1,0	..	0,3
$A^{(2)}$	0,8	0,4	..	0,7
:	:	:		:
$A^{(m)}$	1,0	0,7	..	0,8

Fig. 4.4 - Coeficientes de satisfação de cada alternativa pelos atributos e pelo peso relativo dos atributos

A melhor alternativa é então definida como a que apresentar o maior valor para o somatório

$$\sum_{i=1}^n K_i \alpha_i^{(k)}$$

Outros tratamentos matemáticos da tomada de decisões foram apresentados por Michalowski & Szapiro [132], e Arbel [133] considerando a geração de uma solução como um problema de otimização vetorial. Offodile *et al.* [117] e Boubekri *et al.* [118] aplicaram sistemas especialistas para a seleção de robôs, onde um robô é selecionado se os valores de seus atributos são equivalentes ou superiores aos requisitos mínimos da tarefa.

Deve ser ressaltado que um sistema especialista é na verdade um sistema de aconselhamento, e poderá não ser perfeito nem completo [106]. As soluções encontradas podem ser satisfatórias, não necessariamente ótimas [107]. Para chegar a uma decisão, este aconselhamento deve ser considerado pelo engenheiro juntamente com outras fontes de informação

4.3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA COMPUTACIONAL

Os pesquisadores de inteligência artificial desenvolveram vários métodos para a representação do conhecimento. O mais popular deles é o sistema baseado em regras devido a suas vantagens: modularidade, uniformidade e naturalidade [110].

Os dados sobre um problema são representados principalmente como valores normalizados, e o conhecimento como regras para atribuir estes valores e ordená-los.

É feita, a seguir, a descrição do processo de determinação dos valores normalizados dos diversos parâmetros a serem considerados na seleção de garras.

4.3.1. GEOMETRIA DA PEÇA

No que se refere à geometria, este desenvolvimento segue basicamente o modelo proposto por Pham & Yeo [108] para garras de dois dedos rígidos pegando superfícies paralelas.

a. Garras de dedos rígidos

a.1. Paralelismo e polaridade

É definido um atributo PA, que representa o produto escalar dos vetores normais às superfícies. Para este atributo assume-se o valor

$$-1 \leq PA \leq -0,996$$

o que quer dizer que o ângulo entre as duas superfícies opostas deve ter um valor máximo de cerca de 5° .

É feita uma normalização, para converter os atributos para valores entre 0 e 1.

O valor normalizado de P_{ii} é calculado como

$$P_{ii} = \frac{|PA_i| - |PA_{\min}|}{|PA_{\max}| - |PA_{\min}|} \quad \text{se} \quad PA_{\min} \neq PA_{\max}$$

$$P_{ii} = 1 \quad \text{se} \quad PA_{\min} = PA_{\max}$$

para $i = 1, m$ pares de superfícies, onde PA_{\max} representa, dentre os pares de superfícies considerados, o par de maior valor e PA_{\min} o par de menor valor para o atributo.

Desta forma, o par de superfícies mais paralelo receberá o valor de 1, e ao par menos paralelo será dado o valor de 0, Figura 4.5.

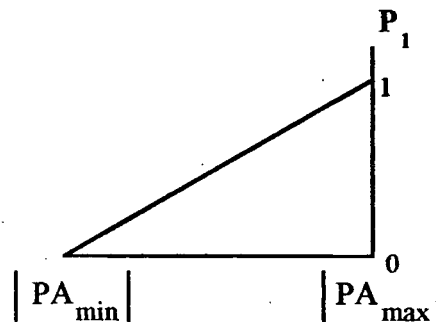


Fig. 4.5 - Normalização do atributo P_{ii}

a.2. Área de projeção

De maneira similar ao item anterior, define-se um atributo normalizado P_{i2} , para a área de projeção AR_i , dado por

$$P_{i2} = \frac{|AR_i| - |AR_{\min}|}{|AR_{\max}| - |AR_{\min}|} \quad \text{se} \quad AR_{\min} \neq AR_{\max}$$

$$P_{i2} = 1 \quad \text{se} \quad AR_{\min} = AR_{\max}$$

para $i = 1, m$ pares de superfícies. AR_{\max} é o maior valor entre os m pares de superfícies considerados, e AR_{\min} o menor, Figura 4.6. Assume-se que $AR_i > 0$.

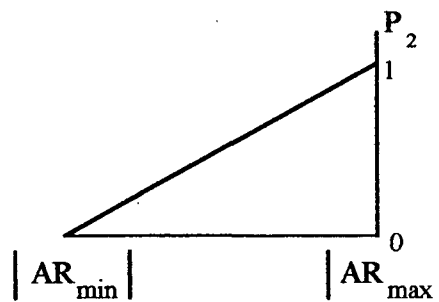


Fig. 4.6 - Normalização do atributo P_{i2}

a.3. Distância

Para o atributo de distância, usa-se, em lugar do ângulo α mencionado na seção 3.2.1, item a.3, um valor DS definido diretamente por:

$$DS = \frac{\sqrt{AR}}{D}$$

onde AR é o valor da área de projeção entre as superfícies, e D a distância entre seus centróides.

O valor normalizado deste atributo, P_{i3} , Figura 4.7, é computado como

$$P_{i3} = 0 \quad \text{se} \quad DS_i \leq 0,4 \quad \text{ou} \quad DS_i \geq 100$$

$$P_{i3} = \frac{5}{6}(DS_i - 0,4) \quad \text{se} \quad 0,4 < DS_i < 1$$

$$P_{i3} = \frac{5}{30}(DS_i - 1) + 0,5 \quad \text{se} \quad 1 \leq DS_i \leq 4$$

$$P_{i3} = \frac{100 - DS_i}{96} \quad \text{se} \quad 4 < DS_i < 100$$

para $i = 1, m$ pares de superfícies.

Quando $DS_i \leq 0,4$, a probabilidade de travamento é considerada muito alta, pois a área de contato é pequena relativamente à distância, e quando $DS_i \geq 100$, ou seja, a área é muito grande comparada à distância, considera-se que as duas superfícies estão muito próximas. Assim dá-se o valor zero aos seus valores normalizados. Estas relações geométricas estão mostradas na Figura 4.8.

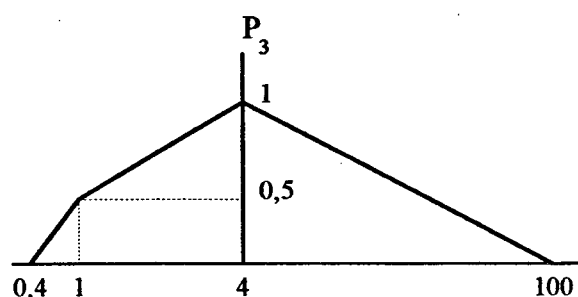


Fig. 4.7. - Normalização do atributo P_{i3}

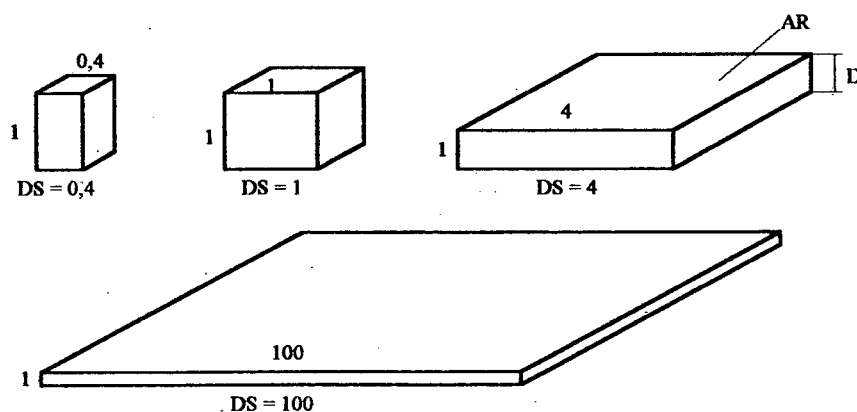


Figura 4.8 - Representação geométrica do atributo DS

a.4. Momento de tombamento

O momento de tombamento tende a fazer a peça girar em torno do eixo de prensão, ou seja, suas superfícies de contato girarão paralelamente às superfícies de contato da garra. Este movimento é resistido apenas pelas forças de atrito entre a peça e os dedos.

Para avaliar o atributo relativo ao momento de tombamento que a peça exerce sobre a garra, define-se uma distância DT , mostrada na Figura 4.9, que é a distância perpendicular entre o centro de massa da peça e o eixo de prensão.

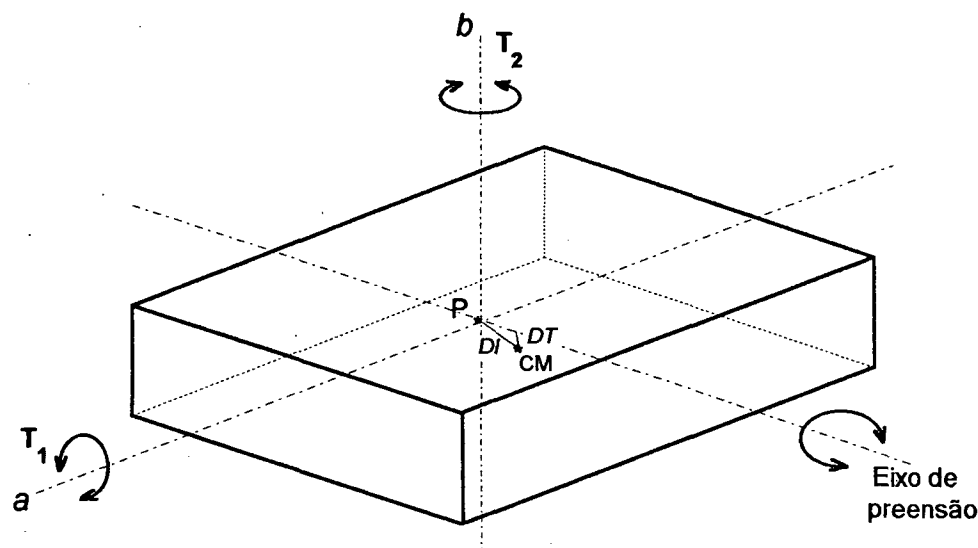


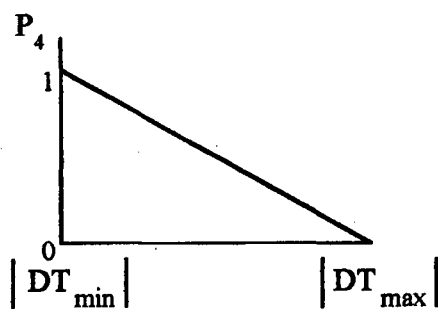
Fig. 4.9 - Distância do centro de massa ao eixo de prensão da peça

Para este atributo, a normalização é feita da seguinte forma:

$$P_{i4} = \frac{|DT_{\max}| - |DT_i|}{|DT_{\max}| - |DT_{\min}|} \quad \text{se} \quad DT_{\min} \neq DT_{\max}$$

$$P_{i4} = 1 \quad \text{se} \quad DT_{\min} = DT_{\max}$$

para $i = 1, m$ pares de superfícies, onde DT_{\max} representa o maior valor para esta distância, entre os pares de superfícies considerados, e DT_{\min} é a menor dentre elas. O maior valor de P_{i4} é atribuído ao par de superfícies que fornece o mínimo momento, Figura 4.10.

Fig. 4.10 - Normalização do atributo P_{14}

a.5. Momento de inclinação

Os momentos em torno dos outros dois eixos da Figura 4.9 tendem a inclinar a peça dentro dos dedos, forçando-os a se abrirem (vide Figura 3.9). Este momento é resistido pelas reações normais nos planos dos dedos.

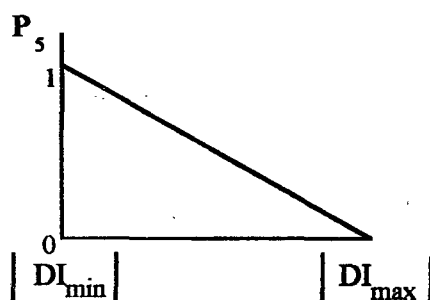
Para considerar este fator, toma-se a distância entre o centro de massa e o ponto P na Figura 4.9. O ponto P é o ponto médio entre as duas superfícies de contato.

O valor normalizado para o atributo relativo ao momento de inclinação é mensurado através da distância DI do centro de massa da peça ao ponto P:

$$P_{i5} = \frac{|DI_{\max}| - |DI_i|}{|DI_{\max}| - |DI_{\min}|} \quad \text{se} \quad DI_{\min} \neq DI_{\max}$$

$$P_{i5} = 1 \quad \text{se} \quad DI_{\min} = DI_{\max}$$

para $i = 1, m$ pares de superfícies. Aqui também o valor máximo será atribuído ao par de superfícies que apresentar o menor valor para DI, Figura 4.11.

Figura 4.11 - Normalização do atributo P_{15}

a.6. Tipo de preensão

Sendo o tipo de preensão uma grandeza discreta, o seu atributo P_{i6} toma a forma

$P_{i6} = 0,2$ se TP = preensão interna

$P_{i6} = 1$ se TP = preensão externa

Este valor expressa uma ordem de grandeza relativa da preferência pelo tipo de preensão. Isto se dá porque é preferível pegar uma peça externamente, pois os movimentos da garra em geral sofrem menores restrições, e ângulos maiores tendem a garantir uma preensão mais estável.

a.7. Tipo de contato

O contato entre a garra e a peça pode se dar através de planos, linhas ou pontos, dependendo do tipo de superfície de preensão que a peça apresenta.

Para este atributo também são considerados valores discretos, expressando uma ordem de preferência conforme [130]. Estes valores são adotados como:

Tipo de contato: plano-plano $\rightarrow P_{i7} = 1$
 plano-linha $\rightarrow P_{i7} = 0,8$
 plano-ponto $\rightarrow P_{i7} = 0,6$
 linha-linha $\rightarrow P_{i7} = 0,4$
 linha-ponto $\rightarrow P_{i7} = 0,2$
 ponto-ponto $\rightarrow P_{i7} = 0$

Após o processo de normalização das grandezas relativas à geometria das superfícies, são criados vetores que contêm os atributos especificados. Assim, para um par de superfícies, tem-se o vetor

$$PS_i = [P_{i1} \ P_{i2} \ P_{i3} \ P_{i4} \ P_{i5} \ P_{i6} \ P_{i7}] \quad \text{onde } 0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad (i = 1, m; j = 1, 7)$$

que gera uma estrutura, chamada de PARSUP, que indexa um par particular de superfícies e o valor de seus atributos:

$$\text{PARSUP}(S_p, S_q, P_{i1}, P_{i2}, P_{i3}, P_{i4}, P_{i5}, P_{i6}, P_{i7})$$

onde S_p e S_q referem-se aos números do par de superfícies, Figura 4.12.

Par de superfícies	Vetor	Atributos				
		P_1	P_2	..	P_7	
(S_p, S_q)	PS_i	P_{i1}	P_{i2}	..	P_{i7}	
(S_1, S_2)	PS_1	P_{11}	P_{12}	..	P_{17}	
(S_1, S_3)	PS_2	P_{21}	P_{22}	..	P_{27}	
:	:	:	:		:	
(S_{x-1}, S_x)	PS_m	P_{m1}	P_{m2}	..	P_{m7}	

Fig. 4.12 - Indexação dos atributos de um par de superfícies

No estudo feito anteriormente, foram consideradas apenas superfícies planas paralelas. Isto pode ser facilmente estendido às superfícies cilíndricas e esféricas.

Em uma superfície cilíndrica, seja de revolução – superfície 1 na Figura 4.13 –, ou um semicilindro – superfície 2 – o contato com uma garra possuindo dedos planos dar-se-á sempre ao longo de apenas uma linha, e não haverá área de interseção entre as superfícies opostas, o que resulta em $P_{i2} = 0$, $P_{i3} = 0$.

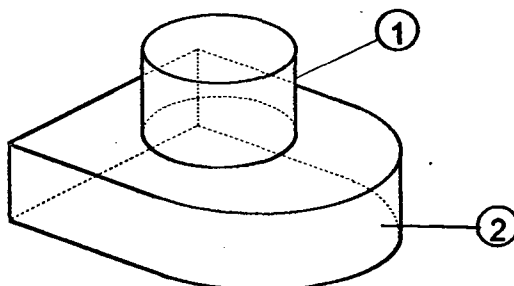


Fig. 4.13 - Contatos com superfícies cilíndricas

Deste modo, quando o programa pede a definição do tipo de superfície, uma superfície cilíndrica gera um vetor \mathbf{PS}_i da forma

$$\mathbf{PS}_i = [P_{i1} \ 0 \ 0 \ P_{i4} \ P_{i5} \ P_{i6} \ P_{i7}]$$

onde P_{i1} expressa a conicidade da superfície. Se a superfície 1 for perfeitamente cilíndrica, $P_{i1} = 1$.

A estrutura para uma superfície semicilíndrica, oposta a outra qualquer, é

$$\text{SUPSCL}(S_p, S_q, P_{i1}, 0, 0, P_{i4}, P_{i5}, P_{i6}, P_{i7})$$

e para uma superfície cilíndrica de revolução

$$\text{SUPCLR}(S_p, P_{i1}, 0, 0, P_{i4}, P_{i5}, P_{i6}, P_{i7})$$

Da mesma forma, se a peça tiver em um dos seus lados uma superfície semi-esférica, Figura 4.14, esta gera um vetor \mathbf{PS}_i da forma

$$\mathbf{PS}_i = [1 \ 0 \ 0 \ P_{i4} \ P_{i5} \ P_{i6} \ P_{i7}]$$

$P_{i1} = 1$, pois um dedo sempre tocará um ponto da esfera de forma perfeitamente paralela ao outro.

Como o contato é pontual, $P_{i2} = 0$, $P_{i3} = 0$.

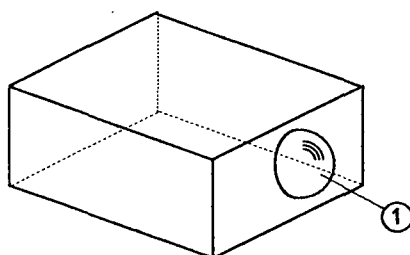


Fig. 4.14 - Contato com uma superfície semi-esférica

A estrutura gerada tem a forma

$$\text{SUPSEM}(S_p, 1, 0, 0, P_{i4}, P_{i5}, P_{i6}, P_{i7})$$

Uma esfera, para o manuseio por uma garra de dois dedos planos paralelos, gera um vetor

$$\mathbf{PS}_i = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0]$$

pois, como o centro de massa está sobre o eixo de preensão, não haverá momentos de tombamento ou inclinação ($P_{14} = P_{15} = 1$), a preensão será externa ($P_{16} = 1$), e o contato será ponto-ponto ($P_{17} = 0$). A estrutura gerada por uma esfera será

$$\text{SUPESF} = (S_p, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0)$$

A relação dos m pares de superfícies pode ser agora classificada, tanto de acordo com a magnitude de um atributo particular quanto de acordo com a soma ponderada de todos os sete atributos. A primeira abordagem assume que um atributo particular seja o mais crítico, enquanto a segunda toma todos os sete atributos em consideração.

Definidas as superfícies e seus atributos, o próximo passo é avaliar as possíveis soluções e identificar as melhores. Isto requer a utilização de medidas de performance para os atributos, considerando a importância de cada um destes dentro do conjunto de alternativas.

Assim, a avaliação envolverá uma soma ponderada dos atributos, que expressa sua influência e importância sobre a classificação das alternativas. Isto é feito dando-se pesos aos atributos [108,130,132-135]. Estes pesos são normalizados para somar 1. Desta forma, define-se um vetor de pesos K , onde

$$K = [K_1 \ K_2 \ \dots \ K_n]^T \quad \text{onde} \quad 0 \leq K_j \leq 1$$

$$\text{e} \quad \sum_{j=1}^n K_j = 1$$

O modelo de decisão multicritério é baseado em que as constantes de peso K_j são representações acuradas do julgamento do especialista, e que os valores determinados para cada alternativa, com respeito a cada critério, são representativos daquela alternativa [135].

O peso também pode definir o interesse ou a incerteza do especialista. O especialista pode estar interessado no valor de alguns atributos, e pouco ou de forma alguma nos outros. Quando várias alternativas produzem satisfação similar em relação a dado atributo, torna-se menos significativa a diferenciação entre as alternativas, no que se refere a este atributo, e assim

seu peso será pequeno. Da mesma forma, os pesos serão pequenos se a incerteza com relação a um dado atributo é grande [108,130,135].

Em geral, a determinação dos pesos é iterativa. Em qualquer estágio de um processo, o especialista avalia uma dada decisão com relação a um estereótipo, e uma direção de melhoria guia a busca de uma decisão final. Assume-se, desta forma, que a próxima solução gerada vai estar mais próxima ao estereótipo [136].

A avaliação final dos pares de superfícies de prensão, para garras de dois dedos será dada pelos elementos do vetor R , onde

$$R_i = \sum_{j=1}^7 P_{ij} K_j \quad 0 \leq R_i \leq 1.$$

É então criada uma estrutura SPTOTAL para registrar todos os pares de superfícies avaliadas:

$$SPTOTAL(S_p, S_q, K_1 P_{i1}, K_2 P_{i2}, K_3 P_{i3}, K_4 P_{i4}, K_5 P_{i5}, K_6 P_{i6}, K_7 P_{i7}, R_i)$$

Par de superfícies	Vetor	Atributos ponderados					Avaliação das superfícies
		$K_1 P_1$	$K_2 P_2$	..	$K_7 P_7$	
(S_p, S_q)	PS_i	$K_1 P_{i1}$	$K_2 P_{i2}$	..	$K_7 P_{i7}$	R_i
(S_1, S_2)	PS_1	$K_1 P_{11}$	$K_2 P_{12}$	..	$K_7 P_{17}$	R_1
(S_1, S_3)	PS_2	$K_1 P_{21}$	$K_2 P_{22}$	..	$K_7 P_{27}$	R_2
:	:	:	:		:	:	
(S_{x-1}, S_x)	PS_m	$K_1 P_{m1}$	$K_2 P_{m2}$	..	$K_7 P_{m7}$	R_m

Fig. 4.15 - Avaliação final dos pares de superfícies

Usando os valores R_i , todos os m pares de superfícies podem ser classificados de 1 a m . O par que apresenta maior R_i é considerado o mais adequado para a prensão, recebendo a ordem 1, e assim sucessivamente.

b. Garras a vácuo e magnéticas

b.1. Orientação

É definido um atributo OR, representando o produto escalar entre o vetor normal à superfície e o vetor peso unitário, cujo valor deverá satisfazer a

$$-1 \leq OR \leq -0,996$$

ou seja, o ângulo de desvio da superfície em relação à horizontal deverá ser no máximo 5°.

Para este atributo, o valor normalizado será

$$V_{h1} = \frac{|OR_h| - |OR_{\min}|}{|OR_{\max}| - |OR_{\min}|} \quad \text{se} \quad OR_{\min} \neq OR_{\max}$$

$$V_{h1} = 1 \quad \text{se} \quad OR_{\min} = OR_{\max}$$

para $h = 1$,s superfícies de topo, onde OR_{\max} representa, dentre as superfícies consideradas, a superfície mais horizontal, e OR_{\min} a mais inclinada, até o limite de 5°, Figura 4.16.

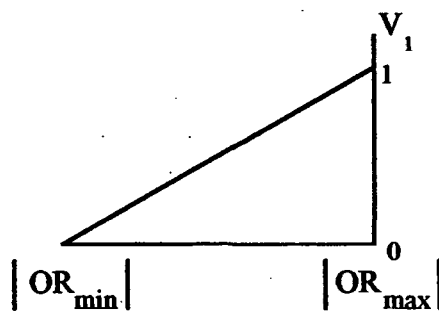


Fig 4.16 - Normalização do atributo V_{h1}

b.2. Área

De maneira similar, define-se um atributo V_{h2} para a área superior disponível para a prensão, dado por

$$V_{h2} = \frac{|AH_h| - |AH_{\min}|}{|AH_{\max}| - |AH_{\min}|} \quad \text{se} \quad AH_{\min} \neq AH_{\max}$$

$$V_{h2} = 1 \quad \text{se} \quad AH_{\min} = AH_{\max}$$

para $h = 1, s$ superfícies de topo. AH_{\max} é a maior dentre as áreas, e AH_{\min} a menor, assumindo que $AH > 0$. A normalização está representada na Figura 4.17.

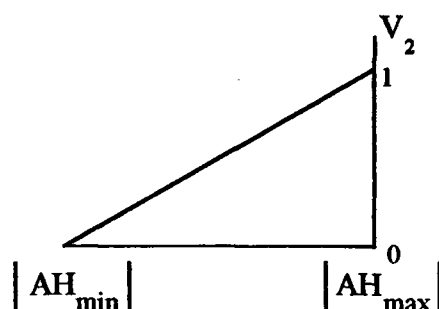


Fig. 4.17 Normalização do atributo V_{h2}

b.3. Distância

Este atributo refere-se à distância em que o centro de massa situa-se em relação à superfície da peça. Pode-se defini-lo como

$$DS = \frac{\sqrt{AH}}{D}$$

onde AH é a área superior disponível e D a distância entre ela e o centro de massa da peça.

O vetor normalizado para V_{h3} , Figura 4.18, é dado por

$$V_{h3} = \frac{|DS_{\max}| - |DS_h|}{|DS_{\max}| - |DS_{\min}|} \quad \text{se} \quad DS_{\min} \neq DS_{\max}$$

$$V_{h3} = 1 \quad \text{se} \quad DS_{\min} = DS_{\max}$$

para $h = 1, s$ superfícies.

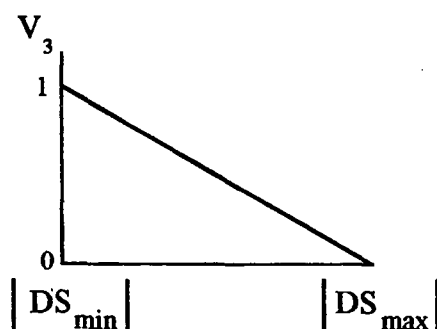


Fig. 4.18 - Normalização do atributo V_{h3}

b.4. Momento

Para avaliar o momento que a peça exerce sobre a garra, é usada como atributo a distância entre o centróide da superfície de contato e o vetor peso unitário, que passa pelo centro de massa da peça.

Assim, tem-se para este atributo

$$V_{h4} = \frac{|MD_{\max}| - |MD_h|}{|MD_{\max}| - |MD_{\min}|} \quad \text{se} \quad MD_{\min} \neq MD_{\max}$$

$$V_{h4} = 1 \quad \text{se} \quad MD_{\min} = MD_{\max}$$

para $h = 1, s$ superfícies. A normalização deste atributo está representada na Figura 4.19.

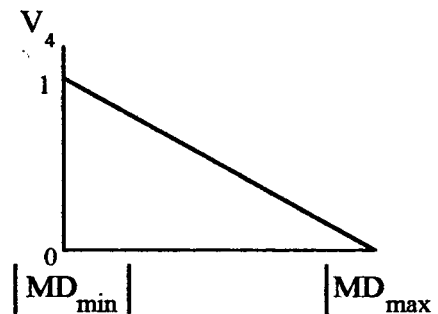


Fig. - 4.19 - Normalização do atributo V_{h4}

Identicamente aos pares de superfícies, o programa gera, para as superfícies planas superiores, adequadas para o manuseio por garras a vácuo e magnéticas, um vetor ST , que contém os valores dos atributos para a h -ésima superfície:

$$ST_h = [V_{h1} \ V_{h2} \ V_{h3} \ V_{h4}] \quad \text{onde} \quad 0 \leq V_{hr} \leq 1 \quad (h = 1, s; \ r = 1, 4)$$

que gera uma estrutura chamada SUPTOPO, que indexa as superfícies superiores e o valor de seus atributos:

$$SUPTOPO(S_h, V_{h1}, V_{h2}, V_{h3}, V_{h4})$$

onde S_h refere-se ao número de uma superfície de topo particular, e V_{hr} aos valores dos atributos
 Figura 4.20.

Superfície	Vetor	Atributos			
		V_1	V_2	V_3	V_4
S_h	ST_h	V_{h1}	V_{h2}	V_{h3}	V_{h4}
S_1	ST_1	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}
S_2	ST_2	V_{21}	V_{22}	V_{23}	V_{24}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_s	ST_s	V_{s1}	V_{s2}	V_{s3}	V_{s4}

Fig. 4.20 - Indexação das superfícies de topo

Uma superfície cilíndrica não pode ser adequadamente manipulada por uma garra de sucção. Assim, uma superfície cilíndrica é eliminada *a priori* quando se consideram estas garras.

Para a prensão de uma superfície esférica por uma garra a vácuo, é gerado um vetor:

$$ST_h = [1 \quad V_{h2} \quad V_{h3} \quad V_{h4}]$$

onde a área de prensão, relativa ao atributo V_{h2} , é a área da base da calota esférica definida pelo contato entre a esfera e o bocal. Como esta área será sempre horizontal, $V_{h1} = 1$.

Para a avaliação final das superfícies de topo, usa-se um vetor de pesos L , que considera a importância relativa do atributo:

$$L = [L_1 \quad L_2 \quad L_3 \quad L_4]^T \quad \text{onde} \quad 0 \leq L_r \leq 1$$

$$\text{e} \quad \sum_{r=1}^4 L_r = 1$$

e que aplicado aos elementos de cada ST_h produz a classificação das superfícies dada pelo vetor C , Figura 4.21, onde

$$C_h = \sum_{r=1}^4 V_{hr} L_r$$

Superfície	Vetor	Atributos ponderados				Avaliação das superfícies
		$L_1 V_1$	$L_2 V_2$	$L_3 V_3$	$L_4 V_4$	
S_h	ST_h	$L_1 V_{h1}$	$L_2 V_{h2}$	$L_3 V_{h3}$	$L_4 V_{h4}$	C_h
S_1	ST_1	$L_1 V_{11}$	$L_2 V_{12}$	$L_3 V_{13}$	$L_4 V_{14}$	C_1
S_2	ST_2	$L_1 V_{21}$	$L_2 V_{22}$	$L_3 V_{23}$	$L_4 V_{24}$	C_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
S_s	ST_s	$L_1 V_{s1}$	$L_2 V_{s2}$	$L_3 V_{s3}$	$L_4 V_{s4}$	C_s

Fig. 4.21 - Avaliação final das superfícies de topo

Uma estrutura STTOTAL registra todas as superfícies de topo avaliadas:

$$STTOTAL(S_h, L_1 V_{h1}, L_2 V_{h2}, L_3 V_{h3}, L_4 V_{h4}, C_h)$$

Após a classificação das superfícies e dos pares de superfícies de contato da peça, parte-se para a determinação da garra mais adequada para o seu manuseio. Determina-se um vetor global de pesos, G ,

$$G = [G_1 \ G_2 \ G_3]^T \quad \text{onde} \quad 0 \leq G_f \leq 1$$

$$\text{e} \quad \sum_{f=1}^3 G_f = 1$$

que representa os pesos relativos de preferência entre as garras, onde G_1 refere-se às garras de dois dedos, G_2 às garras de sucção e G_3 às garras magnéticas.

A escolha final das superfícies e tipos de garras será feita pelos valores dos elementos do vetor E , de ordem $(m+2s)$, resultante da aplicação do vetor G sobre a matriz Ω ,

$$\mathbf{E}_{((m+2s) \times 1)} = \mathbf{\Omega}_{((m+2s) \times 3)} \mathbf{G}_{(3 \times 1)}$$

sendo a matriz $\mathbf{\Omega}$, de ordem $((m+2s) \times 1)$ definida por

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} & 0 & 0 \\ \mathbf{R} & : & : \\ & 0 & 0 \\ \hline 0 & & 0 \\ : & \mathbf{C} & : \\ 0 & & 0 \\ \hline 0 & 0 & \\ : & : & \mathbf{C} \\ 0 & 0 & \end{bmatrix}$$

Desta maneira, no vetor $\mathbf{E} = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_{m+2s}]^T$, o maior valor para E_t , onde $t = 1, m + 2s$, fornecerá a superfície, ou par de superfícies, mais adequada para a prensão.

4.3.2. PROCESSO DE APRENDIZADO

Quando as superfícies ordenadas segundo \mathbf{E} são fornecidas ao usuário através de um vetor de classificação \mathbf{X}_t , ele pode interrogar o sistema sobre a razão de um par particular de superfícies, ou uma superfície, ser considerado melhor que os outros, ou porque outro par ou outra superfície não são adequados. É dada uma explicação simples baseada nas propriedades geométricas das superfícies, bem como na importância relativa dos vários atributos.

Por outro lado, se o usuário não está satisfeito com os resultados do sistema, ele pode entrar com sua própria classificação, \mathbf{X}_u , e o sistema vai tentar então avaliar e comparar ambas as classificações, de acordo com o valor de correlação de ordem, dado por [108]:

$$D_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^z d_i^2}{z(z^2 - 1)} \quad -1 \leq D_s \leq 1$$

onde d_i é a diferença entre as classificações do sistema e do usuário para o i -ésimo elemento do vetor E e z é o número total de superfícies e pares de superfícies considerado, $z \leq m + 2s$.

Se ambas as classificações são idênticas, $D_g = 1$, e quando elas são totalmente opostas, isto é, o melhor par de uma é considerado o pior na outra, e assim sucessivamente, então $D_g = -1$. Em outros casos, D_g vai estar na faixa entre -1 e 1 . Desta forma, D_g fornece uma medida de quão próxima a classificação do usuário vai estar da do sistema.

Assim, se:

(1) $D_g \geq 0.98$:

o sistema considera que a sua classificação e a do usuário estão de acordo, e não tenta alterar seu sistema interno de ordenamento.

(2) $0.5 \leq D_g \leq 0.98$:

o sistema tenta alterar automaticamente seus pesos K_j , L_h ou G_f , até encontrar um valor que concorde com o do usuário, da seguinte forma:

(2.1) Se o valor alterado for entre um par de superfícies e uma superfície de topo:

Se $|E_{tu} - E_{ts}| \geq 0,2$ então o sistema pega os valores de G_f correspondentes e faz

$G_F = G_F - 0,02$ onde G_F é o elemento de maior valor e G_f o de menor valor entre

$G_f = G_f + 0,02$ eles,

e compara os resultados. Se a classificação não mudou, então faz:

(2.1.1) Se G_F refere-se a um par de superfícies e G_f a uma superfície de topo:

$$K_j = K_j - 0,01$$

$K_j = K_j + 0,01$ onde K_J é o maior valor e K_j o menor dos valores do vetor K

$L_H = L_H + 0,01$ onde L_H é o maior valor e L_h o menor dos valores do vetor L

$$L_h = L_h - 0,01$$

(2.1.2) Se G_F refere-se a uma superfície de topo e G_f a um par de superfícies:

$$K_j = K_j + 0,01$$

$K_j = K_j - 0,01$ onde K_J é o maior valor e K_j o menor dos valores do vetor K

$$L_H = L_H - 0,01$$

$$L_h = L_h + 0,01 \quad \text{onde } L_H \text{ é o maior valor e } L_h \text{ o menor dos valores do vetor } L,$$

e recalcula-se os valores de **E**.

(2.2) Se a modificação for entre o mesmo tipo de superfícies, então **G** permanece inalterado e as modificações são feitas apenas em **K** e **L**, desde que não sejam todos os elementos de uma linha P_{ij} ou V_{hr} menores que os da outra. Neste caso a alteração é impossível.

3) $-1 \leq D_g \leq 0,5$:

a correlação é considerada muito ruim. Neste caso, o sistema pede ao usuário para entrar com novos valores para **K**, **L** e **G**.

4.3.3. OUTROS PARÂMETROS DA PEÇA

Após a entrada dos dados relativos à geometria da peça, o programa pede que se informe diretamente o peso da peça ou então seu volume. Como ele tem armazenadas as densidades de diferentes tipos de materiais, pode calcular o peso diretamente a partir deste parâmetro.

Em primeiro lugar, o peso pode ser checado contra a capacidade de carga do robô. Por uma estimativa inicial, o peso máximo permitido para a garra será

$$P_g = L - P_p$$

onde **L** é a capacidade de carga do robô e P_p é o peso da peça. As capacidades de carga de vários robôs poderão ser facilmente incluídas na memória do programa.

O peso da peça também fornece o valor mínimo para a área de contato, A_{\min} . No caso de garras de dois dedos, é dada por

$$A_{\min} = \frac{F}{\sigma_c}$$

$$F = \frac{k_s P}{2\mu}$$

onde : **F** é a força estimada de prensão

σ_c é a pressão admissível

k_s é um fator de segurança, adotado como 5 para que a garra suporte um pico de aceleração máximo de 5g,

P é o peso da peça

μ é o coeficiente de atrito. Os coeficientes de atrito para várias combinações de materiais da garra e da peça também estão armazenados na memória do computador.

O programa também tem armazenados os módulos de elasticidade de vários materiais. A pressão de compressão admissível, σ_c , é adotada como 0,07% do módulo de elasticidade, conforme recomenda [140].

Se a área disponível na superfície é menor que A_{\min} , então o valor do atributo P_{12} deste par de superfícies torna-se zero.

Via menu, o programa solicita que se informe a temperatura da peça, o que é usado para se fazer uma eliminação *a priori* dos tipos de garras que podem ser usados. Se a temperatura for maior que 95°C, então G_2 , no vetor global de pesos \mathbf{G} torna-se zero. Acima de 200°C, tem-se $G_3 = 0$.

4.3.4. PARÂMETROS RELATIVOS AO AMBIENTE E À SEGURANÇA

4.3.4.1. Condições ambientais

a) Contaminação

As condições ambientais são informadas ao programa por meio de respostas dadas, através do menu de entrada, a perguntas sobre a presença de óleo ou limalhas e cavacos sobre a peça. Caso estas estejam presentes, são descartadas as garras a vácuo e magnéticas, fazendo-se $G_2 = G_3 = 0$ no vetor global de pesos.

b) Restrições físicas

Uma superfície que esteja encoberta por alguma estrutura do meio ambiente, ou por outra peça, não pode ser utilizada para a prensão. Assim, qualquer superfície que não possua um espaço livre de no mínimo 5mm de largura em torno de si, está descartada para a prensão.

Para o caso de uma superfície de topo, este valor poderia ser tomado ainda maior, pois seria necessário uma distância suficiente para que a ponta do braço se aproximasse verticalmente da peça.

4.3.4.2. Segurança

Quanto a este item, o programa interroga o usuário sobre a existência de muitos equipamentos no espaço de trabalho do robô, o que poderia aumentar o risco de colisões.

Também são questionadas a existência de substâncias explosivas em suspensão no ambiente, a radioatividade do material e as acelerações. Estes parâmetros são usados pelo programa para retornar algumas recomendações de projeto.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos pela aplicação do programa sobre tipos variados de geometrias e condições de prensão de peças, além de algumas outras variações nos parâmetros.

Os valores dos pesos nos vetores **K**, **L** e **G** são inicialmente definidos pelo especialista, expressando uma ordem de importância relativa entre os atributos em cada vetor.

À medida em que os testes vão sendo conduzidos, a resposta fornecida pelo computador é analisada para ver se está em concordância com a considerada correta. Em caso afirmativo, passa-se para o teste seguinte. Caso a resposta seja considerada insatisfatória, então os pesos deverão ser modificados.

Desta maneira, vai sendo feita também a calibração dos vetores de pesos **K**, **L** e **G**. Os valores dos elementos de **K**, **L** e **G** estarão tão mais próximos do ideal quanto maior o número de testes a que for submetido o programa, com as devidas correções. Estes valores podem ser tidos como corretos a partir do ponto em que novos testes feitos não impliquem na sua modificação.

Como ponto de partida, adotou-se os seguintes valores para os pesos dos atributos:

$$\mathbf{K} = [0,09 \ 0,26 \ 0,12 \ 0,18 \ 0,12 \ 0,09 \ 0,14]^T$$

$$\mathbf{L} = [0,2 \ 0,4 \ 0,2 \ 0,2]^T$$

$$\mathbf{G} = [0,7 \ 0,2 \ 0,1]^T$$

5.2. TESTES DO PROGRAMA

- 1º TESTE

Para o 1º teste, considera-se uma peça cúbica de aço, de dimensões $L=50\text{mm}$, Figura 5.1. O programa deveria produzir uma classificação onde os pares de superfícies (2,4) e (3,5) são igualmente bons, e melhores que a superfície (1), para ser manipulada por vácuo.

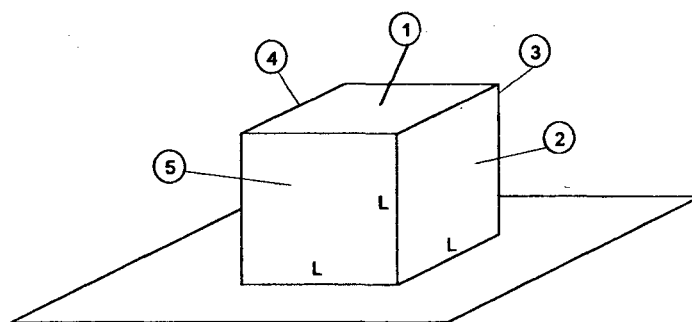


Fig. 5.1 - 1º teste

Resultados:

Como era de se esperar, os pares de superfícies planas paralelas são preferidos à superfície de topo.

Os valores dos atributos para os pares de superfícies (2,4) e (3,5) são iguais, $P_{ij} = 1$, exceto $P_{i3} = 0,5$. Como (1) é a única superfície de topo, $V_{1r} = 1 \rightarrow C_1 = 1$. Assim a preferência, dada por E será

$$E = [0,66 \quad 0,66 : 0,2 : 0,1]^T$$

- 2º TESTE

Para o 2º teste, considera-se o paralelepípedo da Figura 5.2, onde $A=30\text{mm}$, $B=50\text{mm}$ e $C=50\text{mm}$. O resultado esperado seria, nesta ordem de preferência, o par (2,4), o par (3,5) e a superfície (1).

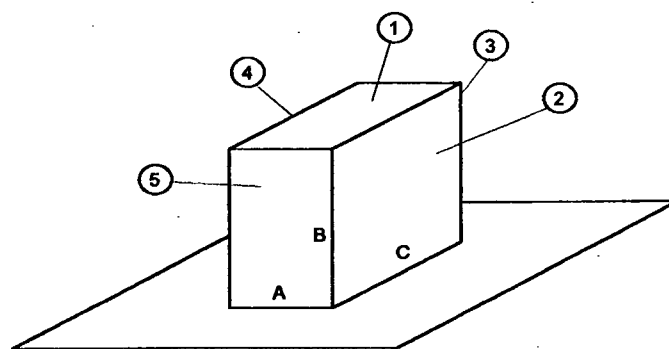


Fig. 5.2 - 2º teste

Resultados:

Como previsto, a ordem de preferência das superfícies foi respectivamente (2,4), (3,5) e (1), com os valores

$$E = [0,67 \quad 0,46 \div 0,2 \div 0,1]^T$$

A grande diferença (~ 45%) na preferência de (2,4) e, relação a (3,5) deve-se ao grande valor dos pesos atribuídos à área.

- 3º TESTE

Considera-se aqui que duas das superfícies têm um ângulo de inclinação de 6°. O esperado é que o par (2,4), Figura 5.3, seja eliminado, com a preferência sendo pelo par (3,5) e pela superfície (1), nesta ordem. Dimensões consideradas: A=30mm, B=50mm, C=50mm.

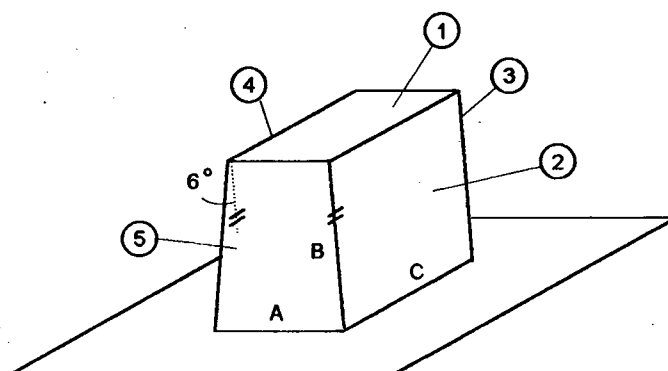


Fig. 5.3 - 3º teste

Resultados:

O par (2,4) sofreu uma eliminação *a priori* pelo programa, já que o ângulo de inclinação é maior que o limite estabelecido de 5°. A preferência foi, nesta ordem, o par (3,5), com valor 0,64, e a superfície (1), com valores 0,2 e 0,1.

O programa, se questionado porque da não classificação de (2,4), responderá que a eliminação deve-se ao excessivo desvio angular deste par.

- 4° TESTE

A altura da peça do 1° teste foi reduzida. Neste caso, espera-se um desempenho bem melhor da superfície (1), que deveria ser a preferida. Dimensões consideradas: L=50mm, B=5mm.

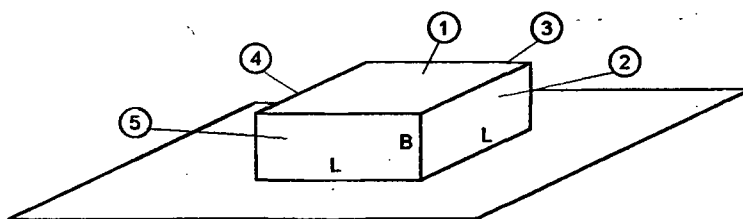


Fig. 5.4 - 4° teste

Resultados:

Aqui houve uma diferença entre os resultados esperados e os obtidos. O valor global de preferência obtido por (2,4) e (3,5) foi 0,62, enquanto (1) obteve 0,2 e 0,1.

Mais do que uma necessidade de reformulação dos pesos, fica patente neste exemplo outra deficiência do sistema atual. As superfícies são avaliadas apenas pelo valor total da área, sem qualquer consideração quanto à sua forma, ou seja, a maneira como esta superfície se distribui no plano. Isto poderá ser corrigido num desenvolvimento futuro pela inclusão de algum fator de forma entre os atributos.

- 5º TESTE

Aqui testa-se as restrições físicas. Considera-se que a peça só tem um quarto de sua superfície lateral livre, devido a interferências com o ambiente. Neste caso a superfície (1) deveria apresentar melhores resultados. Dimensões: $L=50\text{mm}$.

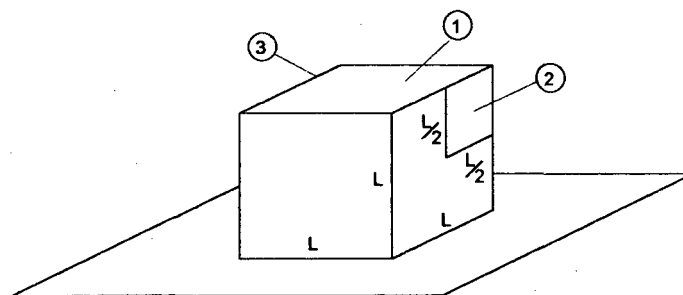


Fig 5.5 - 5º teste

Resultados:

Aqui foi feita uma correção nos fatores de peso, pois o par (2,3) foi retornado como sendo o melhor. O maior problema deste exemplo surge do fato de que só há uma superfície de cada tipo, e assim seus atributos tendem a receber o valor 1, já que são simultaneamente o máximo e o mínimo dos valores da faixa considerada. A verificação da adequação dos novos fatores de peso será feita no exemplo a seguir, aumentando o universo de comparação das superfícies.

Para os exemplos seguintes, os pesos serão modificados para

$$\mathbf{K} = [0,1 \ 0,2 \ 0,13 \ 0,19 \ 0,13 \ 0,1 \ 0,15]^T$$

$$\mathbf{L} = [0,2 \ 0,4 \ 0,2 \ 0,2]^T$$

$$\mathbf{G} = [0,55 \ 0,3 \ 0,15]^T$$

A aplicação destes pesos aos exemplos anteriores não modificou a ordem de preferência das superfícies.

- 6° TESTE

Será utilizado o mesmo exemplo do teste anterior, mas agora também considerando o par (4,5) na Figura 5.6 livre para prensão, apenas para aumentar o número de superfícies de comparação e poder verificar os novos valores dos pesos. O resultado deveria ser, por ordem de preferência: (4,5), (1) e (2,3).

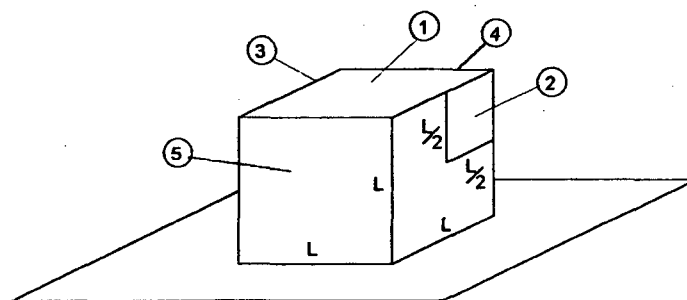


Fig 5.6 - 6° teste

Resultados:

Neste caso, os resultados foram como esperados, com o par de superfícies (4,5) apresentando o valor de 0,51, a superfície (1) de 0,3, para garras a vácuo, e o par (2,3) um valor de 0,19.

- 7° TESTE

Neste exemplo estuda-se a diferença entre as prensões interna e externa. Os pares (1,3) e (2,4) deveriam ter melhor classificação, por serem prensão externa. As prensões entre os pares (1,5), (2,6), (3,7) e (4,8) embora seja externas (o movimento da garra é de fechamento), não devem dar bons resultados, pois as superfícies estão muito próximas entre si e afastadas do centro de massa. A prensão interna entre (5,7) e (6,8), seria preferível a estes últimos pares. Dimensões: L=50mm, espessura E=5mm.

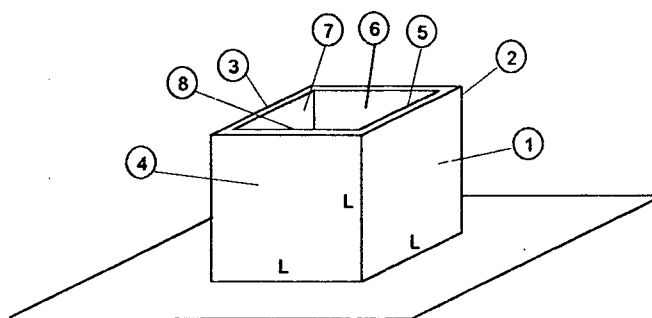


Fig. 5.7 - 7º teste

Resultados:

Os valores encontrados para a preferência foram (sem considerar a aplicação do vetor G , pois trata-se apenas de pares de superfícies):

(1,3), (2,4)	0,935
(1,5), (2,6), (3,7), (4,8)	0,664
(5,7), (6,8)	0,658

que não era o desejado. O vetor K foi então modificado para:

$$K = [0,1 \ 0,2 \ 0,12 \ 0,19 \ 0,14 \ 0,1 \ 0,15]^T$$

resultando em

(1,3), (2,4)	0,940
(5,7), (6,8)	0,662
(1,5), (2,6), (3,7), (4,8)	0,654

Os valores para os dois últimos grupos de pares de superfícies são praticamente os mesmos. Caso se queira uma diferenciação maior, pode-se alterar novamente os valores de K_j . Mas os valores terão que ser determinados pelo usuário, pois a diferença está abaixo da faixa de trabalho do sistema. Outra alteração possível será nos valores de P_6 , o atributo que determina a preferência entre apreensão interna e externa.

- 8º TESTE

Trata-se de um cilindro colocado verticalmente. Devido à relação de altura do centro de massa em relação à área de topo, uma garra de dois dedos pegando a superfície cilíndrica deve fornecer maior estabilidade que uma garra de sucção pegando pela superfície (1). Dimensões: $L=50\text{mm}$, $D=10\text{mm}$.

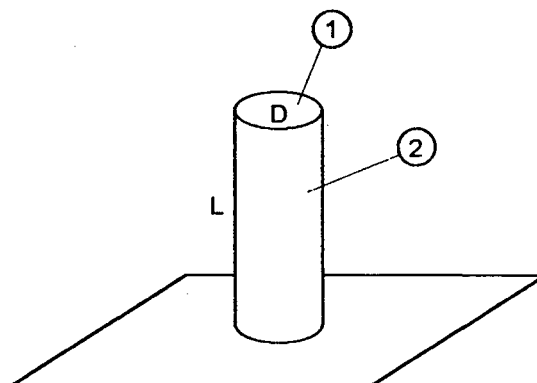


Fig. 5.8 - 8º teste

Resultados:

A garra de dedos apresentou melhores resultados, com valor $E_1 = 0,37$ contra $E_2 = 0,30$ para garras de sucção, como esperado, pois a preensão lateral é mais estável porque o centro de massa fica contido entre os dedos, embora a área de preensão seja teoricamente nula.

- 9º TESTE

Considera-se um cilindro como no caso anterior, onde a área lateral do mesmo foi bastante reduzida, Figura 5.9. A relação área/altura da superfície de topo foi bem melhorada. Espera-se que esta seja a escolhida. Dimensões: $L=10\text{mm}$, $D=50\text{mm}$.

Resultados:

Na verdade, houve uma repetição dos resultados do 8º teste, apesar de ser bem claro que a sucção pela superfície (1) é bem mais estável. É exatamente o mesmo caso que ocorreu no 5º teste, onde o problema continua sendo a falta de um universo maior de comparação.

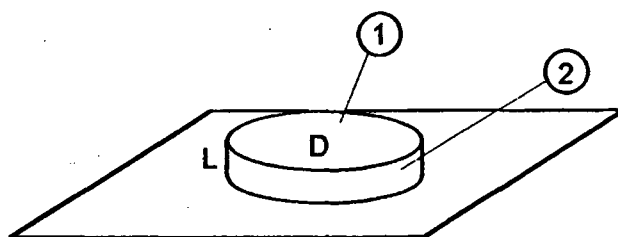


Fig 5.9 - 9° teste

Este exemplo, assim como o 4° teste, mostrou a necessidade de se incluir, no futuro, algum fator de forma como atributo para as superfícies.

- 10° TESTE

Tem-se aqui uma outra variação do 7° teste, onde o cilindro encontra-se agora deitado. Neste caso tem-se, para a prensão por dois dedos, duas superfícies planas opostas ou uma superfície cilíndrica. Dimensões: $L=50\text{mm}$, $D=10\text{mm}$.

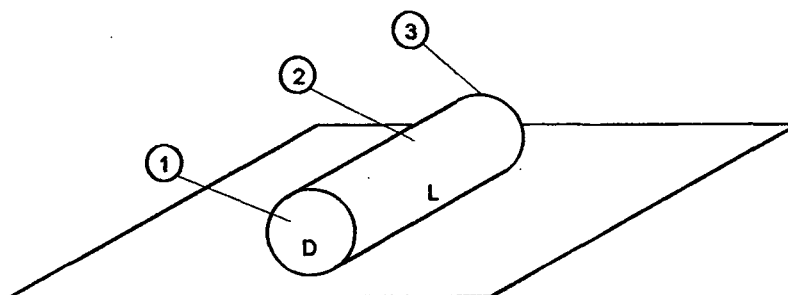


Fig 5.10 - 10° teste

Resultados:

Este exemplo foi mais favorável, pois permitiu a comparação entre garras de dedos. Como era esperado, a prensão pela superfície (1,3), com valor $E_1 = 0,48$ foi preferida a se pegar a peça pela superfície (2), com valor $E_2 = 0,32$.

- 11° TESTE

Este teste consiste de um cilindro onde apenas um terço de sua superfície lateral está disponível para a prensão, como poderia acontecer por exemplo no caso em que há problemas de interferência com as castanhas de um torno. Dimensões: $L = 50\text{mm}$, $D = 10\text{mm}$.

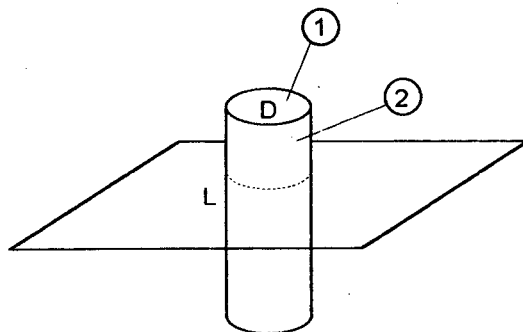


Fig. 5.11 - 11° teste

Resultados:

Aqui também a prensão usando dedos paralelos foi preferida, com valor $E_1 = 0,32$ contra $E_2 = 0,30$ para a garra de sucção.

- 12° TESTE

Este teste consiste na prensão de uma esfera com diâmetro $D=50\text{mm}$. Espera-se que uma garra de sucção seja escolhida, pois uma garra de dedos rígidos tocaria a esfera em apenas dois pontos, e a magnética apenas em um.

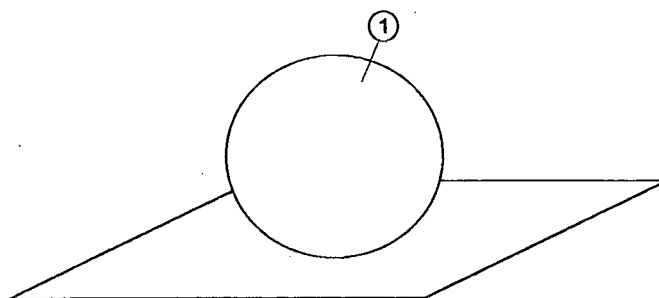


Fig. 5.12 - 12° teste

Resultados:

Neste teste a garra de sucção é escolhida. A garra de dedos paralelos é eliminada porque só apresenta contatos pontuais, e o programa foi instruído para, quando houver apenas contatos pontuais, fazer $G_1 = 0$. Já o bocal de sucção fecha-se sobre a peça; a área de prensão é a área da base da calota esférica definida pelo contato da peça com o bocal.

- 13° TESTE

Este é o único exemplo da aplicação de um sistema semelhante que foi possível encontrar na literatura [108]. A vantagem deste exemplo é o grande número de superfícies, o que permite uma melhor comparação entre as superfícies, e também entre os resultados deste sistema com uma referência. A peça está apresentada na Figura 5.12. Para a realização dos cálculos, a peça foi dimensionada conforme mostrado na figura.

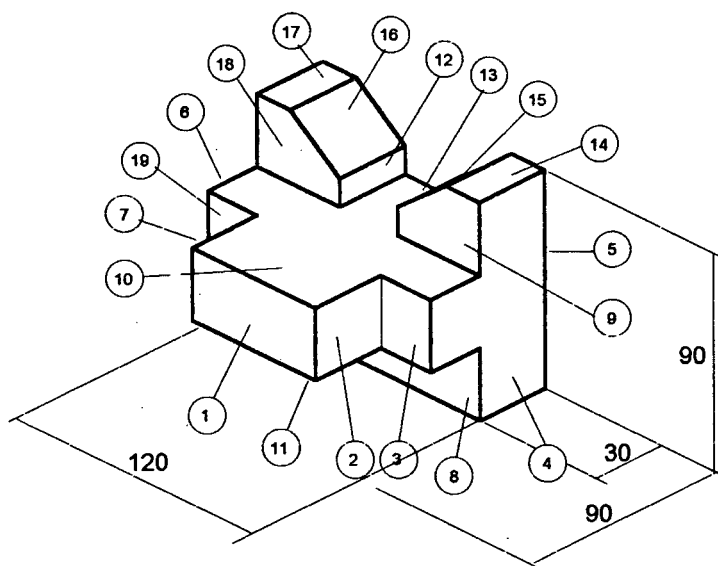


Fig. 5.13 - 13° teste

Resultados:

Com os dados sobre a geometria fornecidos ao sistema, foi gerado para as superfícies de topo (10), (14) e (17), após a normalização, o seguinte vetor de avaliação dos atributos

$$C = [1 \quad 0,2 \quad 0,2]^T$$

As superfícies (15) e (16) foram descartadas por apresentarem um ângulo muito elevado com o plano horizontal.

Na referência [108] citada foi estudada apenas a preensão por garras de dois dedos rígidos, apresentando superfícies planas de contato. É feita a seguir a comparação destes resultados com o vetor R gerado por este programa:

Par de superfícies	Valor dos R_i gerados por este programa	Valor dos R_i da referência
(5,8)	0.801	0.64
(4,6)	0.797	0.78
(10,11)	0.788	0.72
(1,5)	0.775	0.62
(12,13)	0.553	0.31
(3,5)	0.485	0.28
(5,19)	0.485	0.28
(4,13)	0.436	0.35
(6,12)	0.436	0.35
(5,9)	0.418	0.34
(5,18)	0.418	0.34
(2,7)	0.4	0.28

Tabela 5.1 - Comparação dos resultados do programa

Como se pode ver, os resultados convergem no sentido em que um grupo de quatro pares de superfícies apresenta um desempenho muito acima dos outros, embora as preferências relativas dentro destes grupos variem.

Isto se deve principalmente ao fato de que os valores usados por [108] como pesos dos

atributos são todos iguais, com valor de 1/6 – só são considerados aí seis atributos, não se fazendo referência ao tipo de contato, pois são apenas consideradas as superfícies planas das peças – ao passo que no presente trabalho os atributos foram balanceados para se satisfazer também às exigências de manuseio por outros tipos de garras.

Os pesos dos atributos utilizados para gerar este resultado podem ser redefinidos pelo usuário, principalmente no que diz respeito à primeira superfície. É visível que (8) é uma superfície de difícil acesso, e assim não é desejável para a preensão. Ela pode ser eliminada facilmente pelo programa pelo critério de restrição física citado em 4.3.4.1.

A classificação final das superfícies é

Superfície ou ar de superfícies	Valor final dos E_i gerados
(5,8)	0.441
(4,6)	0.438
(10,11)	0.433
(1,5)	0.426
(12,13)	0.304
(10)	0.3
(3,5)	0.267
(5,19)	0.267
(4,13)	0.240
(6,12)	0.240
(5,9)	0.230
(5,18)	0.230
(2,7)	0.22
(14)	0.06
(17)	0.06

Tabela 5.2 - Valores finais de classificação das superfícies

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Com base nos parâmetros de prensão, foi desenvolvido um programa, que faz uso das técnicas de sistemas especialistas, capaz de, levando em conta as características da peça e alguns fatores relativos às condições de trabalho, selecionar o melhor tipo de garra dentre as de maior aplicação industrial consideradas, ou seja de dois dedos rígidos, a vácuo e magnéticas.

Os resultados do programa mostraram um desempenho bastante satisfatório, atendendo aos requisistos inicialmente propostos.

O sistema desenvolvido é capaz de :

- com os dados fornecidos sobre a geometria da peça, fornecer o tipo de garra mais adequado,
- levar em consideração fatores tais como o tipo de material, peso, forças agindo sobre a peça, para serem considerados juntamente com o tipo de garra selecionado e fornecer a garra mais adequada,
- "aprender" com a experiência, ou seja, das comparações realizadas com os dados entrados pelo usuário, que são consideradas as soluções ideais, modificar sua forma de classificar as superfícies, contudo dentro de limites bem estreitos de variação dos parâmetros,
- responder às perguntas dos usuários quanto às razões de como a classificação está feita ou dizer porque determinadas garras não são adequadas para o manuseio das peças.

Este programa não abrange todo o espectro possível de variáveis a serem consideradas no projeto de uma garra, mas é um primeiro passo neste sentido. É um programa voltado para o usuário, com entrada e saída de informações através de menus, de forma a facilitar ao máximo sua utilização.

Uma desvantagem do sistema atual é que todas as informações sobre a geometria da peça devem ser separadamente informadas pelo usuário. Um ponto a ser desenvolvido no futuro

seria o interfaceamento deste programa com um sistema CAD. Desta forma, as informações sobre geometria e dimensões da peça já seriam adquiridas automaticamente pelo programa. Como este programa já tem armazenadas as informações sobre a densidade da peça, seu peso pode ser automaticamente obtido através do volume.

Outra interface possível seria o conhecimento do robô e das trajetórias que ele segue durante a operação, o que já forneceria diretamente os valores das acelerações a que ele está submetido.

Outro aspecto negligenciado neste programa foi a necessidade de utilização de sensores. Conforme o tipo da tarefa a ser executada e a precisão requerida, um sistema especialista mais sofisticado forneceria os tipos de sensores adequados, juntamente com suas faixas de operação.

Neste programa também foram desconsideradas as garras de três ou mais dedos. O desenvolvimento atual das pesquisas neste campo sugere que estas garras poderão em breve encontrar maiores aplicações industriais.

O acréscimo do número de dedos tende a aumentar a flexibilidade da garra, dependendo do seu projeto, e assim reduzir o número de trocas de garras necessárias durante operações que envolvem o manuseio de várias peças diferentes, mas isto também provoca o aumento do número de exigências quanto a seu manuseio e controle, bem como da possibilidade de interferências espaciais. Estes dados devem ser cuidadosamente estudados e quantificados.

Este sistema deve ser considerado apenas como um passo inicial dentro do desenvolvimento de um futuro sistema especialista, bem mais abrangente, para auxiliar na tomada de decisões relevantes quanto ao projeto de garras.

À medida em que cresce o número de parâmetros, a complexidade do sistema aumenta consideravelmente, já que vai havendo, a cada vez, um número maior de vetores de pesos, cujos valores estão acoplados, resultando em maior dificuldade para determinar as grandezas relativas dos pesos.

A sistemática adotada para a calibração dos vetores de pesos baseou-se na que foi proposta por Pham & Yeo [108] apenas para os casos de comparação entre superfícies paralelas de prensão para manipulação por dois dedos rígidos. Contudo, este sistema de equações

mostrou-se bastante instável, convergindo apenas quando a troca na ordem de preferência das superfícies é feita entre superfícies com classificação bem próxima, e mesmo nestes casos pode divergir, se a amplitude nas mudanças de K_j , L_r e G_r não é pequena.

Para um desenvolvimento mais amplo de um sistema especialista, devem ser concentrados esforços no sentido de se conseguir um conjunto de equações de comportamento mais estável.

Uma sugestão para a continuação da presente linha de trabalho seria um programa que pudesse processar dados sobre peças de formas e dimensões variadas, a serem manipuladas durante um mesmo ciclo, conforme a composição dos lotes. Deverá ser capaz de interrelacionar as várias dimensões e geometrias, de forma a minimizar a necessidade de troca de garras. Uma das principais dificuldades será como tomar a decisão de pegar algumas peças através de superfícies que não são as ideais.

Outra sugestão para ampliação deste sistema seria que ele tivesse armazenados em bancos de dados vários tipos de mecanismos para movimentação dos dedos, e retornasse ao usuário um esquema do mecanismo mais adequado. Um sistema ainda mais completo poderia, a partir dos dados sobre a peça, operação, condições ambientais etc., retornar ao usuário também o dimensionamento dos vários mecanismos.

BIBLIOGRAFIA

1. KOREN, Yoram. *Robotics for Engineers*. New York, McGraw Hill, 1985.
2. HEISERMAN, David. *Robot Intelligence...with experiments*. Blue Ridge Summit (USA), TAB Books, 1981.
3. ASADA, Haruhiko & SLOTINE, Jean-Jacques E. *Robot Analysis and Control*. New York, John Wiley and Sons, 1986.
4. VOLMER, Johannes (ed.). *Industrieroboter: Entwicklung*. Heidelberg, Alfred Hüthig, 1984.
5. HUNT, V. Daniel. *Industrial Robots Handbook*. New York, Industrial Press, 1983.
6. KAFRISSSEN, Edward & STEPHANS, Mark. *Industrial Robots and Robotics*. Reston (USA), Reston, 1984.
7. L'HOTE, François; KAUFMANN, Jean-Marie; ANDRÉ, Pierre & TAILLARD, Jean-Pierre. *Robot Technology - Vol. 4: Robot Components and Systems*. Englewood Cliffs (USA), Prentice-Hall, 1983. (Trad. orig. francês *Les Robots*. Paris, Hermes, 1979.)
8. WARNECKE, H.J. & SCHRAFT, R.D. *Industrial Robots: Application Experience*. Kempston (UK), I.F.S. Publications, 1982. (Trad. orig. alemão *Industrieroboter*. Mainz, Krausskopf, 1979.)
9. PHAM, D.T. & HEGINBOTHAM, W.B. (eds.). *Robot Grippers*. Berlin, Springer, 1986.
10. ASFAHL, C. Ray. *Robots and Manufacturing Automation*. New York, John Wiley, 1985.
11. ANDEEN, Gerry B. (ed.). *Robot Design Handbook*. New York, McGraw-Hill, 1988.
12. RÁNKY, Paul G. & HO, C.Y. *Robot Modelling - Control and Applications with Software*. Kempston (UK), IFS Publications, 1985.
13. DWIVEDI, Suren N. (ed.). *Robotics and Factories of the Future - Proceedings of an International Conference - Charlotte, North Carolina, U.S.A - Dec 4-7, 1984*. Berlin, Springer, 1984.

14. NINH, Binh; SHARMA, J.P. & DWIVEDI, Suren N. "How to Increase Productivity". In: DWIVEDI [13], pp. 705-715.
15. WRIGHT, A.J. "Light Assembly Robots - An End-Effector Exchange Mechanism". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 315-325.
16. BATTON, J.H.; HUDSON, R.L.; SHARMA, J.P. & DWIVEDI, S.N. "End Effector for Manipulation of Orbital Construction Components". In: DWIVEDI [13], pp. 356-365.
17. MONFORTE, Mathew. "Abstract-Assembly Type Industrial Robots Equipped with an Intelligent, Self-Adjusting Tool Changing End-Effector Perform a Variety of Assembly Tasks in One Robot Cell". In: DWIVEDI [13], pp. 192-199.
18. BLUME, Christian & DILLMANN, Rüdiger. *Frei programmierbare Manipulatoren*. Würzburg, Vogel, 1981.
19. NEUBAUER, Gernot. "Pneumatic Grippers". *Machine Design*, vol. 54, n. 27, 1982, pp. 69-71.
20. TELLA, R.; BIRK, J. & KELLEY, R. "A Contour-Adapting Vacuum Gripper". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 85-100.
21. PARKER, J.K.; DUBEY, R.; PAUL, F.W. & BECKER, R.H. "Robotic Fabric Handling for Automatic Garment Manufacturing". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 175-188.
22. SALISBURY, J.K. & ROTH, B. "Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 419-434.
23. CUTKOSKY, Mark R. *Robotic Grasping and Fine Manipulation*. Boston, Kluwer, 1985.
24. MISHRA, Bud & SILVER, Naomi. "Some Discussions of Static Gripping and Its Stability". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 19, n. 4, 1989, pp. 783-796.
25. JAMESON, John W. & LEIFER, Larry J. "Automatic Grasping: An Optimization Approach". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 17, n. 5, 1987, pp. 806-814.
26. RED, W. Edward. "Local Manipulation Using a N-Link Articulated End-Effector". In: DWIVEDI [13], pp. 228-239.

27. AHMAD, Shaheen & FEDDEMA, John T. "Static Grip Selection for Robot-Based Automated Assembly Systems". *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, n. 6, 1987, pp. 687-717.
28. JACOBI, P. & GNAUCK, G. "Rationalisierungsmittel zur Auslegung von Greifern". *Maschinenbau*, vol. 30, n. 5, 1981, pp. 198-201.
29. SHIMOJIMA, Hiroshi; YAMAMOTO, Kotaroh & KAWAKITA, Kohzoh. "A Study of Grippers with Multiple Degrees of Mobility". *JSME International Journal*, vol. 30, n. 261, 1987, pp. 515-522.
30. CHEN, Fan Yu. "Gripping Mechanisms for Industrial Robots". *Mechanism and Machine Theory*, vol.17, n. 5, 1982, pp. 299-311.
31. AL-FAHED, A. M. & PANAGIOTOPOULOS, P. D. "Multifingered Frictional Robot Grippers: A New Type of Numerical Implementation". *Computers & Structures*, vol. 42, n. 4, 1992, pp. 555-562.
32. KOLPASHNIKOV, S.N. & CHELPANOV, I.B. "Calculation and Design Principles of High-Speed Robot Grippers". *Mechanism and Machine Theory*, vol. 25, n. 2, 1990, pp.149-160.
33. HIROSE, Shigeo & UMETANI, Yoji. "The Development of Soft Gripper for the Versatile Robot Hand". *Mechanism and Machine Theory*, vol. 13, n. 3, 1978, pp. 351-359.
34. BIANCHI, G. & ROVETTA, A. "Grasping Process for Objects of Irregular Shape". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 125-137.
35. CROSSLEY, F.R.E. & UMHOLTZ, F.G. "Design for a Three-Fingered Hand". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 329-339.
36. JACOBSEN, S.C.; WOOD, J.E.; KNUTTL, D.F. & BIGGERS, K.B. "The UTAH/MIT Dextrous Hand. Work in Progress". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 341-389.
37. TUR-KASPA, Y. & LENZ, E. "A Gripper for Ultra-Thin-Walled Tubes with a Built-in Force Sensor". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 189-195.
38. PEROVSKII, A.P. "Universal Grippers for Industrial Robots". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 79-84.
39. SCOTT, P.B. "The 'Omnigripper': A Form of Robot Universal Gripper". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 109-123.

40. VASSURA, G. & NEROZZI, A. "A Multi-Finger Gripper". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 165-174.
41. KEMP, D.R.; TAYLOR, G.E.; TAYLOR, P.M. & PUGH, A. "A Sensory Gripper for Handling Textiles". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 155-163.
42. SCHWEIZER, M. & FRANKENHAUSER, B. "Programmierbare, sensorgeführte Greifer für Industrieroboter". *Konstruktion*, vol. 40, 1988, pp. 213-216.
43. RUOCCO, S.R. *Robot Sensors and Transducers*. Milton Keynes (UK), Open University Press, 1987.
44. FU, King S.; GONZÁLEZ, Rafael C. & LEE, C.S. George. *Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence*. New York, McGraw-Hill, 1987.
45. NAWARA, Leszek & KOWALSKI, Marek. "Analysis of the Random Component of Multicoordinate Measuring Machines and Metrological Robots Position Error". *Annals of the CIRP*, vol. 36, n. 1, 1987, pp. 373-376.
46. LEU, M.C. & DUKOVSKI, V. "Effect of Mechanical Compliance on Deflection of Robot Manipulators". *Annals of the CIRP*, vol. 36, n. 1, 1987, pp. 305-309.
47. SLOCUM, Alexander H.; HARDT, David E. & GREENSPAN, Lewis. "Development of a Six Degree-of-Freedom Position and Orientation Sensing Device: Design, Theory and Testing". *International Journal on Machine Tools and Manufacturing*, vol. 28, n. 4, 1988, pp. 325-339.
48. HUEY Jr., C.O. & ANAND, Joseph. "Mapping of Positioning Error of Robot Manipulators". In: DWIVEDI [13], pp. 337-344.
49. KOREN, Yoram & SHOHAM, Moshe. "End-Effector Guidance System of Robot Arms". *Annals of the CIRP*, vol. 36, n. 1, 1987, pp. 289-292.
50. BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. & WEILL, R. "Hierarchically Structured Multisensor System for an Intelligent Mobile Robot". *Annals of the CIRP*, vol. 36, n. 1, 1987, pp. 331-334.

51. SUZUKI, Hisashi & ARIMOTO, Suguru. "Visual Control of Autonomous Mobile Robot Based on Self-Organizing Model for Pattern Learning". *Journal of Robotic Systems*, vol. 5, n. 5, 1988, pp. 453-470.
52. CAO, Zuo L.; HUANG, Yuyn & HALL, Ernest L. "Region Filling Operations with Random Obstacle Avoidance for Mobile Robots". *Journal of Robotic Systems*, vol. 5, n. 2, 1988, pp. 87-102.
53. HIRZINGER, G. "Issues in Low-Dimensional Sensing and Feedback". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 19, n. 4, 1989, pp. 832-839.
54. FOROUGH, F.; RAHNEJAT, H. & BERA, H. "Tactile Sensors for Robot Handling". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, vol. 201, n. B1, 1987, pp. 51-58.
55. HEYTLER, Peter G. "The Industrial Robot: 1985-1995". In: DWIVEDI [13], pp. 69-76.
56. LUO, Ren C. & LOH, Horng-Hai. "Tactile Array Sensor for Object Identification Using Complex Moments". *Journal of Robotic Systems*, vol. 5, n. 1, 1988, pp. 1-12.
57. BROWN, David B.; HEMAMI, Hooshang & ISTEFAPOULOS, Yorgo. "On-Line Exploration of an Unknown Surface by a Robotic Probe". *Journal of Robotic Systems*, vol. 6, n. 5, 1989, pp. 521-543.
58. LEAVER, S.O.; McCARTHY, J.M. & BOBROW, J.E. "The Design and Control of a Robot Finger for Tactile Sensing". *Journal of Robotic Systems*, vol. 5, n. 6, 1988, pp. 567-581.
59. SCHLAICH, Gerd; GWEON, Daegab G. & CHO, Hung-Suk. "Industrieroboter mit taktilen Sensoren zur Kontaktteilmontage". *Werkstattstechnik*, vol. 77, n. 12, 1987, pp. 671-674.
60. VOLMER, J.; JACOBI, P.; HÄHLE, F. & LANGER, V. "Montage mit sensorgesteuertem Greifer". *Maschinenbautechnik*, vol. 29, n. 4, 1980, pp. 165-169.
61. WEIßMANTEL, Heinz & GAIROLA, Arun. "Die Verwendbarkeit von leitenden Kunststoffen für taktile Sensoren". *Feinwerktechnik & Messtechnik*, vol. 89, n. 2, 1981, pp. 79-84.
62. GAIROLA, Arun & WEIßMANTEL, Heinz. "Handhabungstechnik mit taktilen Sensoren". *et*, vol. 103, n. 10, 1982, pp. 514-517.
63. SERAJI, H. "Adaptive Force and Position Control of Manipulators". *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, n. 4, 1987, pp. 551-578.

64. MASUDA, R.; HASEGAWA, K. & OSAKO, K. "Slip Sensor of Industrial Robot and its Application". *Electrical Engineering in Japan*, vol. 96, n. 5, 1976. (Op. cit. in FOROUGHI [54]).
65. BEJCZY, A.K. "Sensors, Controls and Man-Machine Interface for Advanced Teleoperation". *Science*, vol. 208, 1980, pp. 1327-1335.
66. ROGOS, Jürgen. "Praktischer Einsatz sensorgeführter Schweißroboter". *Werkstatt und Betrieb*, vol. 120, n. 9, 1987, pp. 727-732.
67. MAUER, Georg F. "An End-Effector Based Imaging Proximity Sensor". *Journal of Robotic Systems*, vol. 6, n. 3, 1989, pp. 301-316.
68. LUO, Ren C. "Microcomputer-Based Robot Dynamic Sensing Using Linear Array Sensor for Object Recognition and Manipulation". *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, n. 2, 1987, pp. 199-213.
69. BEHNAM, Bahr & HUANG, J. Tsai. "Microcomputer-Based Optical Sensor for Seam Tracking Robot". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 21, n. 1-4, 1991, pp. 535-539.
70. LUO, Ren C. & MULLEN Jr., Robert E. "A Modified Optical Flow Approach for Robot Tracking and Acquisition". *Journal of Robotic Systems*, vol. 6, n. 5, 1989, pp. 489-508.
71. LUO, Ren C. & LIN, Min-Hsiung. "Issues and Approaches of Automatic Focusing Algorithms for Intelligent Robot Eye-in-Hand System". *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, n. 4, 1987, pp. 459-476
72. MUNDY, J.L. "Automatic Visual Inspection". *Proc. 1977 Conf. on Decision and Control*, 1977, pp. 705-710.
73. MILUTINOVIC, Dragan S. & MILACIC, Vladimir R. "A Model-Based Vision System Using a Small Computer". *Annals of the CIRP*, vol. 36, n. 1, 1987, pp. 327-330.
74. LUO, Ren C.; SCHERP, Ralph S. & LANZO, Mark. "Object Identification Using Automated Decision Tree Construction Approach for Robotics Applications". *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, n. 3, 1987, pp. 423-433.

75. FUKUDA, Toshio & HASEGAWA, Osamu. "Creature Recognition and Identification by Image Processing Based on Expert System for Control of a Micromanipulator". *JSME International Journal*, série III, vol. 33, n. 2, 1990, pp. 269-277.
76. MOHAMED, Ahmed S. & ARMSTRONG, William W. "Measuring Learning Progress in Intelligent Autonomous Robots". *Journal of Robotic Systems*, vol. 5, n. 6, 1988, pp. 583-607.
77. WANG, Ching-Cheng & SHEKHAR, Amit. "On-Line Acquisition of Link Deformation for the Robot of Accuracy". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 21, n. 1-4, 1991, pp. 529-533.
78. ZACHAU, Henning; BUSCHBECK, Hans & HELM, Wolfgang (eds.). *Einsatz von Industrierobotern*. Berlin, VEB, 1986.
79. BRACKEN, F.L. "Parts Classification and Gripper Selection Design for Automatic Handling and Assembly". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 27-34.
80. PHAM, D.T. & YEO, S.H. "Concentric Gripping of Cylindrical Workpieces Using Quasi-Parallel Grippers". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 229-261.
81. PHAM, D.T. & YEO, S.H. "A Knowledge-Based System for Robot Gripper Selection: Criteria for Choosing Grippers and Surfaces for Gripping". *International Journal on Machine Tools and Manufacturing*, vol. 28, n. 4, 1988, pp. 301-313.
82. SCHMIDT, I. "Flexible Moulding Jaws for Grippers". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 101-107.
83. LUO, R.-C. "An Automatic Quick-Change Gripper Finger for Assembly Automation". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 265-275.
84. RUSTERHOLTZ, R. "A Gripper- and Tool-Change System for Increasing the Flexibility of Assembly Robots". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 299-314.
85. VRANISH, J.M. "A 'Quick-Change' System for Robots". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 277-297.
86. ARAI, T. & ASADA, M. "Properties of Rotational Hands with Versatility". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 199-212.

87. VOLMER, J.; JACOBI, P. & HÄHNEL, K. "Fügemechanismen mit nachgiebigen Gliedern für Montage-Industrieroboter". *Maschinenbau*, vol. 29, n. 3, 1980, pp. 115-118.
88. PRITSCHOW, G. & TUFFENTSAMMER, K. "A New Procedure for the Economic Programming of Tooling Robots in the Case of Small Batches". *Annals of the CIRP*, vol. 36, n. 1, 1987, pp. 339-342.
89. WHITNEY, D.E. "Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts". *Transactions of the ASME - Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 104, mar/1982, pp. 65-77.
90. NEVINS, J.L. "Information-Control Aspects of Sensor Systems for Intelligent Robotics". *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, n. 2, 1987, pp. 215-228.
91. SLOCUM, Alexander H.; GREENSPAN, Lewis & PERIS, James P. "Design and Implementation of a Five Axis Robotic Micromanipulator for Inserting Parts into Precision Collets". *International Journal on Machine Tools and Manufacturing*, vol. 28, n. 2, 1988, pp. 131-139.
92. ZISKOVSKY, Joseph P. "Robotics - the First Step to CIM and The Factory of the Future". In: DWIVEDI [13], pp. 154-160.
93. GHOSH, Kalyan; SEVINGY, Anatole & SEHA, Fathi. "Safety Problems in Robotic Systems and Some Methods for Their Solution". In: DWIVEDI [13], pp. 724-732.
94. KIRCH, Willi. "Arbeitssicherheit beim Einsatz von Industrierobotern und Handhabungsgeräten". *Werkstatt und Betrieb*, vol. 119, n. 1, 1986, pp. 21-24.
95. FLÜHR, Peter. "Industrieroboter und Sicherheit". *Werkstatt und Betrieb*, vol. 120, n. 9, 1987, pp. 733-734.
96. SPINGLER, Jochen C. "Montageautomatisierung mit Industrierobotern in kleinen und mittleren Unternehmen". *Werkstattstechnik*, vol. 77, n. 12, 1987, pp. 663-666.
97. MAEKAWA, Hitoshi; KANEKO, Makoto; YOKOI, Kazuhito; TANIE, Kazuo & IMAMURA, Nobuaki. "Grasp Control for a Multifingered Hand with Kinematic Redundancy". *JSME International Journal*, série III, vol. 33, n. 4, 1990, pp. 546-552.

98. VOSSOUGH, R. & DONATH, M. "Robot Finger Stiffness Control in the Presence of Mechanical Nonlinearities". *Transactions of the ASME - Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 110, 1988, pp. 236-245.
99. THAKOR, Nitish V. & McNEELA, Martin A. "Application of a Dynamic Programming Algorithm for Trajectory Planning of Finger-Like Manipulators". *Journal of Robotic Systems*, vol. 4, n. 3, 1987, pp. 341-354.
100. CHELPANOV, I.B. & KOLPASHNIKOV, S.N. "Problems with the Mechanics of Industrial Robot Grippers". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 35-44.
101. OKADA, T. "Computer Control of Multijointed Finger System for Precise Object Handling". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 391-417.
102. BAZ, A. & VOSSOUGH, J. "Stress Considerations in Robot Grippers". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 213-228.
103. KONSTANTINOV, M.S. & GALABOV, W.B. "Kriterien zum Entwurf von Greifermechanismen für Manipulatoren und Industrieroboter". *Maschinenbau*, vol. 27, n. 12, 1978, pp. 532-536.
104. LAUGIER, C. "A Programm for Automatic Grasping of Objects with a Robot Arm". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 45-53.
105. WOLTER, J.D.; VOLZ, R.A. & WOO, A.C. "Automatic Generation of Gripping Positions for Assembly". In: PHAM & HEGINBOTHAM [9], pp. 55-74.
106. BLOCKLEY, D.I. & BALDWIN, J. F. "Uncertain Inference in Knowledge-Based Systems". *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 113, n. 4, 1987, pp. 467-481.
107. SRIHARI, K. & MUTHUKRISHNAN, R. "An Expert System Methodology for Aircraft- Gate Assignment". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 21, n. 1-4, 1991, pp. 101-105.
108. PHAM, D.T. & YEO, S.H. "A Knowledge-Based System for Robot Gripper Selection: Implementation Details". *International Journal on Machine Tools and Manufacturing*, vol. 28, n. 4, 1988, pp. 315-324.

109. BRACHMAN, Ronald J. "The Basics of Knowledge Representation and Reasoning". *AT&T Technical Journal*, vol. 67, n. 1, 1988, pp. 7-24.
110. SONI, A.H.; DADO, Mohammad H.F. & WENG, Yicheng. "An Automated Procedure for Intelligent Mechanism Selection and Dimensional Synthesis". *Transactions of the ASME - Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, vol. 110, n. 2, 1988, pp. 130-137.
111. FAGAN, Michael J. "Expert Systems Applied to Mechanical Engineering Design - Experience with Bearing Selection and Application Program". *Computer-Aided Design*, vol. 19, n.7, 1987, pp. 361-367.
112. GÜNTHER, W. & SAßE, J. "Unterstützung konstruktiver Entwicklungsprozesse durch Methoden der Wissensverarbeitung". *Konstruktion*, vol. 43, 1991, pp. 207-213.
113. GROEGER, B. "Ein System zur rechnerunterstützten und wissensbasierten Bearbeitung des Konstruktionsprozesses". *Konstruktion*, vol. 42, 1990, pp. 91-96.
114. ITO, Ikuo & ONOZAWA, Takao. "An Intelligent Aspect of CAD for Mechanical Design (The Conceptual Design of a Simple Object)". *Bulletin of JSME*, vol. 29, n. 247, 1986, pp. 301-305.
115. IWATA, Kazuaki; SUGIMURA, Nobuhiro & FUKUDA, Yoshiro. "Knowledge-Based Flexible Part Classification System for CAD/CAM". *Annals of the CIRP*, vol. 36, n. 1, 1987, pp. 317-320.
116. ZHU, J. Y. & ZHANG, Y. Z. "An Expert System for the Part Classification". *Annals of the CIRP*, vol. 36, n. 1, 1987, pp. 351-353.
117. OFFODILE, O.F.; LAMBERT, B.K. & DUDEK, R.A. "Development of a Computer-Aided Robot Selection Procedure". *International Journal of Production Research*, vol. 25, n. 1, 1987, pp. 1109-1121.
118. BOUBEKRI, Nourredine; SAHOUI, Majid & LAKRIB, Chabane. "Development of an Expert System for Industrial Robot Selection". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 20, n. 1, 1991, pp. 119-127.

119. DEARMON, J.M. & LIOU, Y.H. Andrew. "An Expert System for Respirator Selection". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 21, n. 1-4, 1991, pp. 85-87.
120. MÁRKUS, A. & HATVANY, J. "Matching AI Tools to Engineering Requirements". *Annals of the CIRP*, vol. 36, n. 1, 1987, pp. 311-315.
121. HADDOCK, Jorge & HARTSHORN, Todd A. "A Decision Support System for Specific Machine Selection". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 16, n. 2, 1989, pp. 277-286.
122. HADDOCK, Jorge & O'KEEFE, Robert M. "Using artificial Intelligence to Facilitate Manufacturing Systems Simulation". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 18, n. 3, 1990, pp. 275-283.
123. SCHMIDEK, B.; WIGGER, P. & ASCHERADEN, M. v. "Expertensystem für die Produktionssteuerung". *Werkstattstechnik*, vol. 80, 1990, pp. 682-686.
124. WARNECKE, H.-J. & DANGELMAIER, W. "Unterstützung von Produktionsplanung und -steuerung (PPS) mit künstlicher Intelligenz (KI)". *Werkstattstechnik*, vol. 80, n. 3, 1990, pp. 145-148.
125. KALLEY, Gordon S. & McDERMOTT, Kevin J. "Using Expert Systems to Incorporate the Principles of Motion Economy as a Means of Improving Robot Manipulator Path Generation". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 16, n. 2, 1989, pp. 207-213.
126. HORRIX, Christoph. "Expertensysteme zur Fehlerdiagnose von Werkzeugmaschinen". *Werkstatt und Betrieb*, vol. 124, n. 2, 1991, pp. 101-104.
127. NGWENYAMA, Ojelanky; GRANT, Delvin & SRIHARI, K. "Epistemological Problems in the Development of Intelligent Information Systems for Industrial Applications". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 17, n. 1-4, 1989, pp. 67-72.
128. BUCHANAN, B.G. & DUDA, R.O. "Principles of Rule-Based Expert Systems". *Advances in Computers*, vol. 22, 1983, pp. 164-216. (Op. cit. in NGWENYAMA *et al.* [127]).
129. KOELLING, C. Patrick & CHO, Y. Jin. "Attribute Decomposition in Multiattribute Decision Analysis: An Important Issue in DSS Design". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 21, n. 1-4, 1991, pp. 107-110.

130. SHIPLEY, Margaret; DE KORVIN, André & OBID, Riad. "A Decision-Making Model for Multi-Attribute Problems Incorporating Uncertainty and Bias Measures". *Computers & Operations Research*, vol. 18, n. 4, 1991, pp. 335-342.
131. VON WINTERFELD, D. & EDWARDS, W. *Decision Analysis and Behavioral Research*. Cambridge, Cambridge University Press, 1986. (Op. cit. in KOELLING & CHO [129].)
132. MICHALOWSKI, Wojtek & SZAPIRO, Tomasz. "A Procedure for Worst Outcomes Displacement in Multiple Criteria Decision Making". *Computers & Operations Research*, vol. 16, n. 3, 1989, pp. 195-206.
133. ARBEL, Ami. "Approximate Articulation of Preference and Priority Derivation". *European Journal of Operational Research*, vol. 43, n. 3, 1989, pp. 317-326.
134. TAPIA, Cesar G. & MURTAGH, Bruce A. "Interactive Fuzzy Programming with Preference in Multiobjective Decision-Making". *Computers and Operations Research*, vol. 18, n. 3, 1991, pp. 307-316.
135. ANANDALINGAM, G. & OLSSON, C.E. "A Multi-Stage Multi-Attribute Decision Model for Project Selection". *European Journal of Operational Research*, vol. 43, n. 3, 1989, pp. 271-283.
136. NAYLOR, Chris. *Build Your Own Expert System*. New York, Halsted Press, 1985.
137. KLAHR, Philip & WATERMAN, Donald E. (eds.). *Expert Systems - Techniques, Tools and Applications*. Reading (USA), Addison-Wesley, 1986.
138. HAYES-ROTH, Frederick; KLAHR, Philip & MOSTOW, David J. "Knowledge Acquisition, Knowledge Programming, and Knowledge Refinement". In: KLAHR & WATERMAN [137], pp. 310-349.
139. SCHILDT, Herbert. *Inteligência Artificial Utilizando Linguagem C*. São Paulo, McGraw-Hill, 1989. (Trad. orig. inglês *Artificial Intelligence Using C*. New York, McGraw-Hill, 1987.)
140. PROVENZA, Francesco (org.). *Projetista de Máquinas*. São Paulo, Escola Pro-Tec, 1976.

APÊNDICE A

SENSORES

A.1. INTRODUÇÃO

Nos robôs convencionais, as posições da garra são controladas a partir das posições das juntas do braço. Estes robôs são adequados para ambientes industriais altamente organizados, onde a localização das peças é alterada com pequena frequência, ou onde grandes pacotes de software já têm gravadas as posições de praticamente todas as peças. Nem todas as empresas são assim. Destarte, para atenderem ao maior número possível de aplicações industriais, os robôs devem poder adaptar-se automaticamente à tarefa [6].

Um sensor ou transdutor é um dispositivo de medição ou controle que transforma uma forma não-elétrica de energia, à entrada, em um sinal eletrônico de saída para um sistema de controle de processos. Sua função é monitorar a operação da garra. A informação obtida por eles é transmitida ao sistema de controle do robô, que toma então as ações necessárias, seja para evitar obstáculos, seja para posicionar e orientar a garra [17,43].

Os sensores externos vêm tendo uma importância industrial cada vez maior. Eles permitem ao robô interagir com o meio-ambiente de uma forma flexível, em contraste com a operação preprogramada, na qual o robô executa tarefas repetitivas através de um conjunto de funções programadas de antemão. Um sistema dotado de sensores é adaptável a uma gama muito maior de aplicações, atingindo um maior grau de universalidade [44].

Os sensores fornecem informações sobre a posição efetiva da garra em relação à peça. Através deles, o robô pode localizar e realizar os movimentos finos para o adequado posicionamento da garra sobre a peça, compensando os erros resultantes de desvios na posição da peça ou de variações nas suas dimensões.

Na ausência de sensores, o robô deve apresentar uma alta rigidez para satisfazer às exigências de acurácia. Todos os erros geométricos no manipulador vão sendo acumulados e resultam em uma limitada precisão posicional [45-48,77]. Entretanto, quando a posição da ponta do manipulador é monitorada diretamente por um sistema sensor, é possível fazer a compensação dos erros acumulados, devidos a erros de posicionamento das juntas e à elasticidade das ligações e das juntas. A rigidez do braço torna-se então menos significativa, e o peso do manipulador pode ser reduzido [6,11,43,49].

A utilização de sensores externos permite uma maior independência de operação aos robôs. Um exemplo disto tem sido o desenvolvimento experimental de robôs móveis, capazes de deslocar-se livremente, desviando de obstáculos e reconhecendo sua posição por comparação da imagem observada com dados armazenados na memória [50-52,76].

Devido a problemas relacionados ao seu preço, às suas dimensões, à dificuldade de integrá-los ao sistema de controle do robô e à sua insuficiente confiabilidade, os sensores não eram muito empregados em robôs. Desenvolvimentos recentes têm contornado estes problemas, e a tendência é que cada vez mais robôs possuam capacidade sensorial [53].

Os sensores podem entrar ou não em contato com a peça. Os sensores de contato incluem os sensores que respondem a contato físico, como toque, escorregamento, força e torque. Entre os sensores que não entram em contato com a peça, é feita a distinção entre sensores de proximidade, que são instalados na garra e detectam peças numa estreita vizinhança dela, e sensores de distância, que rastreiam peças localizadas a uma distância maior, e que geralmente são instalados fora da garra [5,6,11,12,44].

Os sensores de distância permitem a orientação a grosso modo do manipulador, enquanto os sensores de proximidade e toque estão associados com os estágios finais da preensão do objeto. Sensores de força e torque são usados como dispositivos para se controlar a manipulação de um objeto uma vez que ele foi agarrado, por exemplo, para evitar seu esmagamento ou que ele escorregue [44].

A.2. SENSORES TÁTEIS

Sensores táteis respondem a forças de contato que surgem entre eles e objetos sólidos. Estes sensores não indicam a presença de um objeto até que eles efetivamente o toquem. Nesta categoria se incluem os sensores de toque, força e torque.

Os sensores visuais, usados para a obtenção de dados sobre a posição da peça, podem ter o seu campo de visão obstruído. Também podem ser necessárias informações sobre áreas inacessíveis, para se executar serviços de reparação. Os sensores táteis evitam estes problemas, porque a coleta de dados ocorre diretamente na interface entre o efetuador e a peça. Eles podem aumentar ou mesmo substituir a visão em tarefas como trabalho no escuro ou apanhar peças em caixotes [54].

A realimentação tátil pode ser usada para determinar a posição e orientação de um objeto dentro da garra, após ter sido pego, para explorar e perceber a forma de um objeto desconhecido, e para identificar o peso, rigidez e rugosidade superficial através do toque [56-58]. Em trabalhos de montagem, estes sensores podem ser empregados para compensar a flexibilidade, excentricidade e erros de posicionamento do braço [59].

Os sensores táteis podem ser sensores de articulação da garra, posicionados no flange entre esta e o braço do manipulador, ou sensores dos dedos, localizados nos dispositivos de preensão da garra [60]. Os sensores táteis estão descritos nos itens seguintes.

A.2.1. SENSORES DE TOQUE

Os sensores de toque são basicamente interruptores que respondem à presença ou ausência do objeto, produzindo um sinal binário de saída. Na sua forma mais simples, um interruptor é colocado na superfície interna de cada dedo de uma garra, Figura A.1. Este tipo de sensoreamento é útil para se determinar se uma peça está presente entre os dedos. Movendo-se a garra sobre um objeto e fazendo-se seqüencialmente contato com a sua superfície, é também possível centrar a garra sobre o objeto para preensão e manipulação [44].

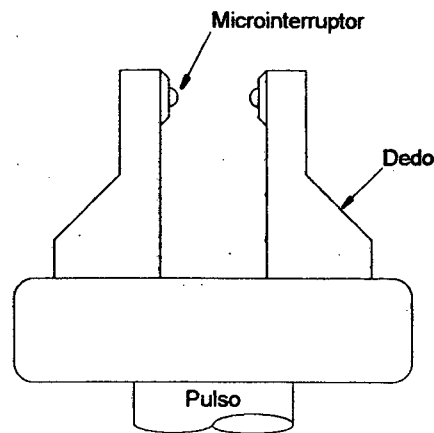


Fig. A.1 - Sensor de toque [44]

Os tipos mais simples de sensores de toque não requerem qualquer dispositivo sensor específico, se os objetos que eles vão manipular são condutores elétricos. A aplicação de uma pequena diferença de potencial entre eles causará a queda do potencial a zero quando o contato ocorrer [5].

Múltiplos sensores de toque binários podem ser utilizados na superfície interna de cada dedo para fornecer informação tátil suplementar. Podem também ser montados nas superfícies externas de uma garra para fornecerem sinais de controle úteis para guiá-la no espaço de trabalho, de forma análoga às mãos humanas num quarto totalmente escuro, ou para cessar o movimento do robô quando o efetuador faz contato com algum objeto que penetra em sua trajetória [5,44].

A.2.2. SENSORES DE FORÇA

Um sensor de força é um dispositivo analógico que produz um sinal de saída proporcional às forças de contato, indicando a sua magnitude, ao invés de uma saída binária.

A maioria das garras opera com uma força de prensão constante, não possuindo, desta forma, a flexibilidade e o controle que podem ser conseguidos por uma garra dotada de sensores de força. Esta pode controlar a força com que manuseia a peça, aplicando as forças desejadas quando necessário, e podendo evitar assim possíveis danos ou deformações em peças delicadas e frágeis.

A Figura A.2 mostra uma garra cujos dedos estão cobertos com uma matriz de sensoreamento tátil. As placas de sensoreamento externo são dispositivos binários típicos e têm a função de guiar a garra através do espaço de trabalho.

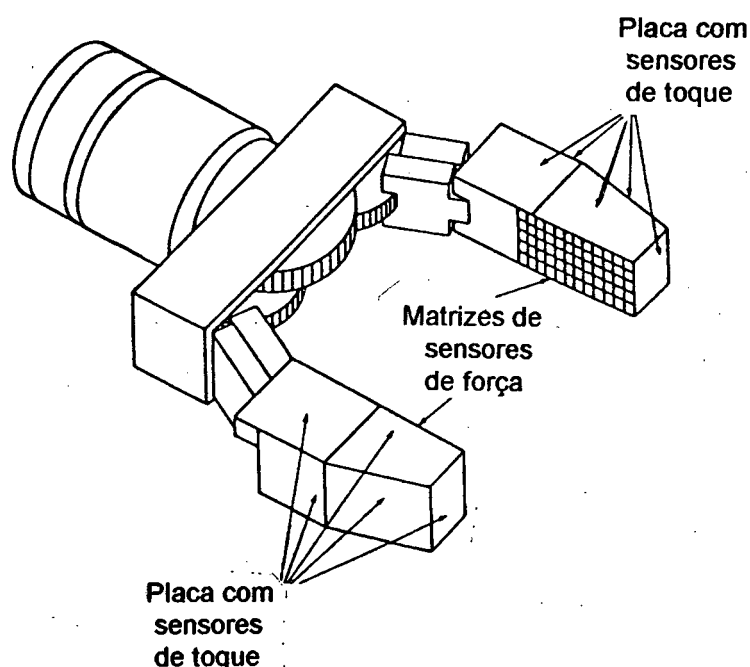


Fig. A.2 - Garra equipada com matrizes de sensoreamento tátil [44]

Os sensores de força estão dispostos num arranjo de eletrodos, Figura A.3-(a), em contato elétrico com um material cuja resistência varia como função da compressão. Este material é uma matriz de silicone ou poliuretano, onde encontram-se disseminados grãos de carbono, cobre ou prata, com diâmetro médio de 0,15 a 0,225mm, e que perfazem de 15 a 20% do volume total [61].

Nestes dispositivos, freqüentemente chamados de "pele artificial", quando é feito o contato com a peça, a força de prensão provoca deformações locais. A resistência através do material diminui na razão direta da força, pois uma força maior causa um maior contato entre os grãos condutores, Figura A.3-(b). Isto reduz o percurso seguido pela corrente elétrica, ao mesmo tempo em que aumenta o número de passagens disponíveis [62]. Estas variações contínuas na

resistência são transformadas em sinais elétricos cuja amplitude é proporcional à força sendo aplicada em qualquer ponto sobre a superfície. No estado descarregado, o material é isolante.

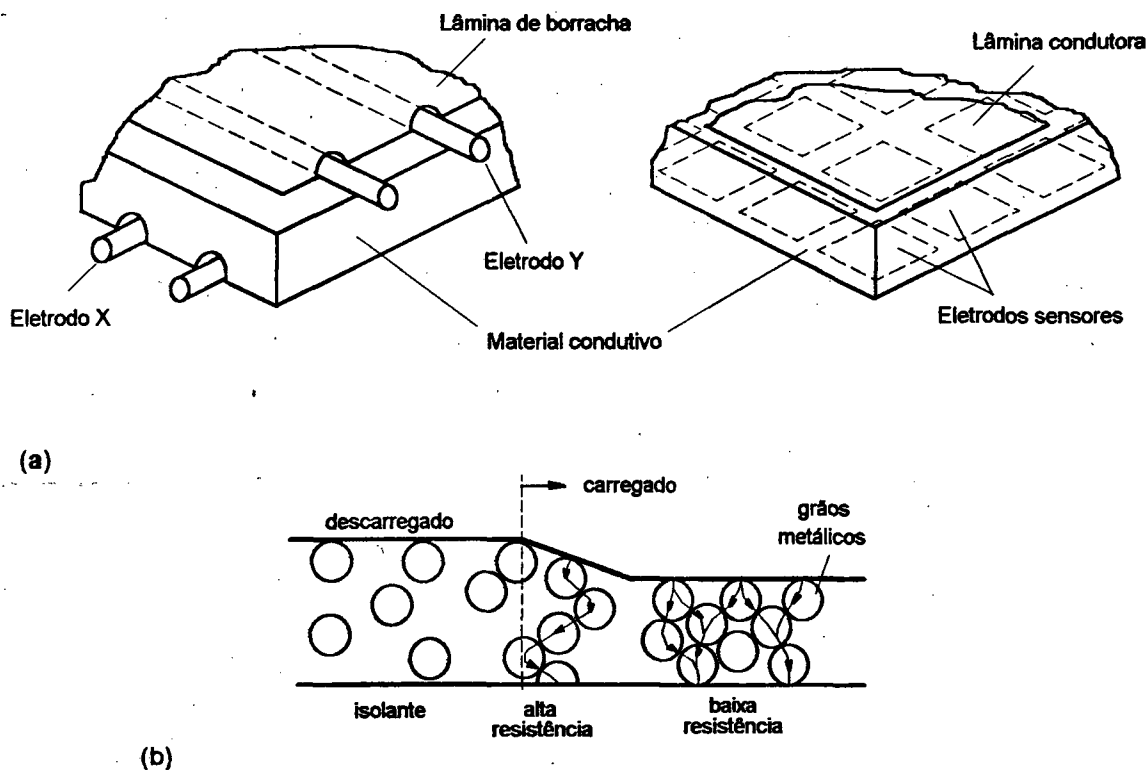


Figura A.3 - Sensores de força. (a) Formas construtivas da matriz de sensores de força [44]

(b) "Pele artificial" (material condutivo) [61]

Sensores individuais de força em geral respondem apenas à força em uma direção. Entretanto, combinações de dois ou mais sensores podem reportar forças bem como torques em duas ou mais direções.

A.2.3. SENSORES DE ESCORREGAMENTO

Os sensores discutidos até agora lidam com forças normais às suas superfícies. Um outro aspecto importante de sensoriamento é a medida do movimento tangencial, para se determinar o escorregamento.

Para um manuseio flexível, deve-se conseguir uma força estável de prensão de objetos que possuem uma variedade de formas, dimensões e superfícies. Assim, a força de prensão pode variar dependendo da aplicação, em particular no que se refere às mudanças nas respostas fornecidas pelos sensores.

Uma forma de manusear um material de uma forma estável e flexível é através da detecção de escorregamento. Deste modo, a força ótima de aperto pode ser determinada por um sistema sensor adaptativo para a sua medição.

Masuda *et al.* [64] descrevem um sensor de escorregamento em que um rolete é seguro junto a um dedo por uma mola de lâmina, de forma que fique ressaltado para fora da superfície do dedo em cerca de 1mm, quando o dedo está aberto, Figura A.4-(a). Quando os dedos se fecham para segurar uma peça, o rolete se retrai para a superfície do dedo, ajudando a segurar a peça. Se houver escorregamento desta, o ângulo de rotação do rolete é detectado, fornecendo uma medida quantitativa do escorregamento.

Bejczy [65] desenvolveu um sensor composto de uma esfera cheia de pequenas covas que movimenta uma agulha. Esta agulha está montada sobre o eixo de um pequeno disco, feito de material condutor. Sob o disco acham-se distribuídos 16 contatos elétricos, Figura A.4-(b). Quando uma peça segura pela garra escorrega, a rotação da esfera daí resultante causa a vibração do disco com uma frequência proporcional à sua velocidade. A direção de rotação da esfera permite determinar a direção média de escorregamento da peça.

Andeen [11] descreve um sensor térmico de escorregamento. Quando a garra se fecha sobre uma peça, um termistor começa a aquecer um ponto na sua superfície. Quando a peça se move em relação ao sensor, um material mais frio é trazido para o contato com o termistor, e mais energia é requerida para manter o termistor a uma temperatura constante. Esta mudança na potência indica a ocorrência de escorregamento. As propriedades térmicas da peça podem ser ainda utilizadas para sua identificação.

Uma desvantagem destes sensores é o aumento de volume dos dedos para poderem alojá-los, prejudicando, ou mesmo inviabilizando, sua utilização em ambientes com pouco espaço disponível em torno da peça.

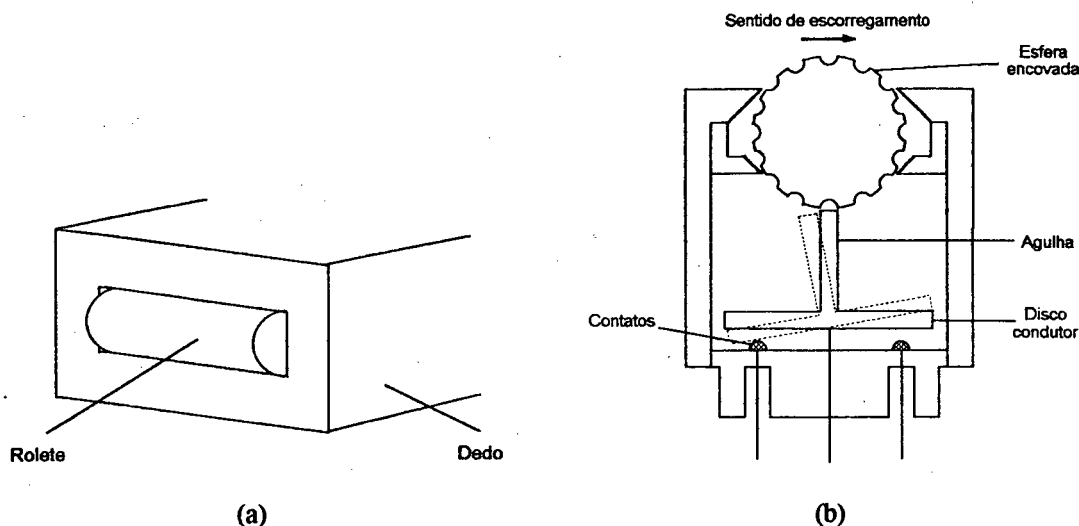


Fig. A.4 - Sensores de escorregamento. (a) Sensor de rolete [64] (b) Sensor de esfera [65]

A.2.4. SENSORES DE TORQUE

Uma das principais formas de sensoriamento de torque é através de sensores de pulso. Estes sensores são montados entre a ponta do braço do robô e o efetuator. Eles consistem de extensômetros elétricos (strain gages), que medem a deflexão da estrutura mecânica devido a forças externas.

O princípio de funcionamento destes sensores se baseia em que a resistência de um arame é diretamente proporcional ao seu comprimento e resistividade, e inversamente proporcional à sua área transversal. Se ele é esticado, sua resistência se altera. As tensões sobre o elemento sensor causam uma mudança no comprimento dos extensômetros, resultando numa mudança na resistência [6]. As componentes da força e do momento são determinadas através das voltagens de saída.

É importante que os movimentos no pulso gerados pelo sensor não afetem a precisão posicional do manipulador. Assim, este sensor deve apresentar alta rigidez, compacidade, e baixa histerese e atrito interno.

A.3. SENSORES DE PROXIMIDADE

Um sensor de proximidade é um dispositivo capaz de perceber quando a garra está próxima de um objeto.

A maioria dos sensores de proximidade tem uma saída binária, que apenas indica a presença ou a ausência de um objeto dentro de uma região especificada, mas alguns podem dar também alguma informação sobre a distância entre o sensor e o objeto.

Tipicamente, os sensores de proximidade são usados na robótica para atuação local em conexão com a preensão de um objeto ou o desvio de um obstáculo.

Uma combinação útil numa garra é um sensor de proximidade que trabalha em conjunto com um sensor de toque. O sensor de proximidade pode detectar a presença de um objeto ainda a uma certa distância, de forma que o controlador da estação de trabalho possa mover o efetuator rapidamente e com segurança em direção ao objeto, mesmo que sua posição precisa não seja conhecida. O sinal do sensor de proximidade dá ao controlador o aviso necessário para desacelerar-se e evitar uma colisão. O controlador passa então a monitorar o sensor tátil, enquanto move o efetuator devagar em direção ao objeto.

Estão descritos a seguir alguns tipos de sensores de proximidade de maior aplicação.

A.3.1. SENSORES INDUTIVOS

Estes sensores são baseados numa variação da indutância devida à presença de um objeto metálico, estando entre os sensores de proximidade mais utilizados industrialmente. O princípio de operação destes sensores pode ser explicado com o auxílio da Figura A.5. O sensor consiste de uma espira localizada próximo a um ímã colocado em uma carcaça blindada.

Sob condições estáticas as linhas de fluxo permanecem constantes, e assim, não há indução de corrente na espira. Entretanto, quando um objeto ferromagnético entra ou deixa o campo do ímã, é induzida uma mudança na posição das linhas de fluxo. A variação resultante nas linhas de fluxo induz um pulso de corrente, cuja amplitude e forma são proporcionais à taxa de variação no fluxo. Uma variação desta técnica é usar-se eletroímãs em lugar de ímãs permanentes.

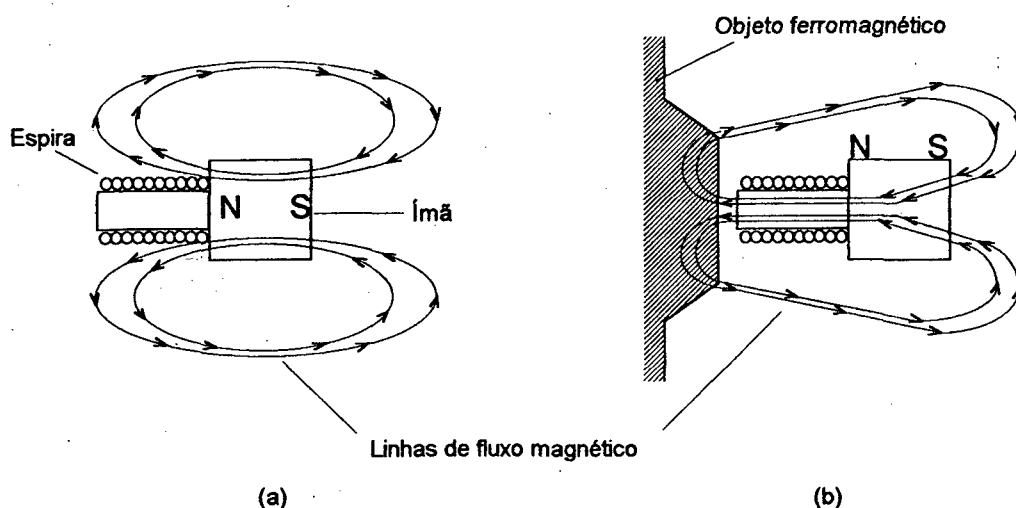


Fig. A.5 - Sensor indutivo. (a) Forma das linhas de fluxo na ausência de um corpo ferromagnético.
 (b) Forma das linhas de fluxo quando um corpo ferromagnético se aproxima do sensor [44]

A sensibilidade destes sensores cai rapidamente com o aumento da distância, e eles são adequados apenas para distâncias na faixa de até no máximo 1mm [5,44]. Formas complicadas de peças podem levar a assimetria do campo magnético, que podem ser mal-interpretadas pelo sistema sensor [66].

A.3.2. SENSORES POR EFEITO HALL

O efeito Hall relaciona a voltagem entre dois pontos, em um material condutor ou semicondutor, a um campo magnético passando por este material. Os sensores por efeito Hall são empregados em conjunto com um ímã permanente. Na ausência de um metal ferromagnético nas proximidades, o sensor detecta um forte campo magnético. Quando um material ferromagnético é trazido para perto do sensor, o campo magnético no sensor enfraquece devido à curvatura das linhas de campo através do material, como mostrado na Figura A.6.

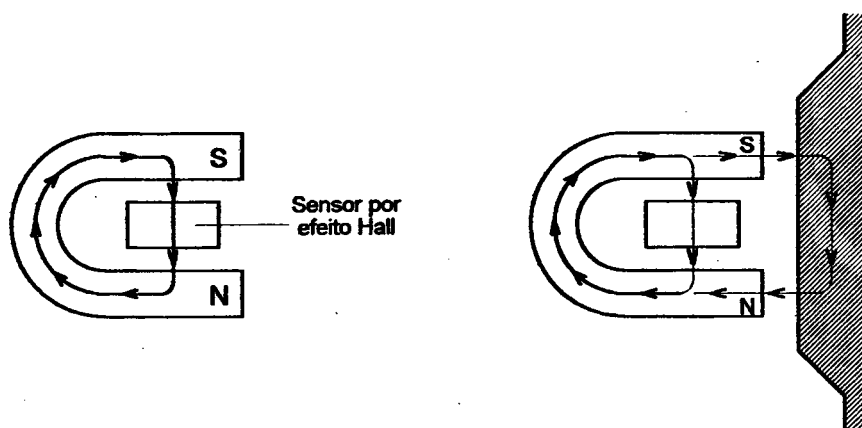


Fig. A.6 - Sensor por efeito Hall [44]

A.3.3. SENSORES CAPACITIVOS

Diferentemente dos sensores indutivos e por efeito Hall, que só detectam materiais ferromagnéticos, os sensores capacitivos são potencialmente capazes de detectar todos os materiais líquidos e sólidos. Estes sensores são baseados na detecção de uma mudança na capacitância, induzida por uma superfície que é trazida para perto do elemento sensor. O elemento sensor é um capacitor composto de um eletrodo sensível e um eletrodo de referência.

Sensores capacitivos de proximidade fornecem uma medida acurada da distância. A sensibilidade é dependente do material do objeto, e decresce rapidamente com a distância, sendo sua faixa de aplicação de no máximo 5mm [11]. Estes sensores também podem ser usados para detecção de arestas, contornos superficiais, localização de centros de furos e alinhamento entre a superfície do efetuador e a da peça [67].

Estes sensores são tipicamente operados em modo binário, de forma que uma variação na capacitância maior que um valor limite indica a presença do objeto, enquanto variações abaixo deste valor acusam ausência de objeto.

A.3.4. SENSORES ULTRASSÔNICOS

A resposta de todos os sensores de proximidade discutidos nas seções anteriores depende fortemente do material sendo detectado. Esta dependência pode ser consideravelmente reduzida usando-se sensores ultrassônicos.

O elemento básico deste sensor é um transdutor eletroacústico, em geral uma cerâmica piezoelétrica. O sensor transmite um pulso de energia ultrassônica, que é refletido de volta em direção ao receptor por qualquer objeto que atinja. A distância em relação a um objeto pode ser diretamente medida pelo intervalo transcorrido entre o envio e a recepção do pulso.

Estes sensores são mais eficazes para distâncias entre 10mm e 10m [11]. Para a detecção de objetos muito próximos, é necessário um rápido amortecimento da energia acústica, já que o mesmo transdutor é geralmente utilizado para emissão e recepção [44].

A.3.5. SENSORES ÓTICOS

Os sensores óticos são similares aos ultrassônicos por detectarem a proximidade de um objeto pela sua influência sobre uma onda propagante que vai de um transmissor para um receptor.

Um método usado para detecção por meios óticos é pelo efeito fotoelétrico mostrado na Figura A.7. Um diodo emite luz infravermelha, que é recebida por um fotodiodo. Os cones de luz infravermelha, formados pela focagem do emissor e do receptor no mesmo plano, formam um volume sensitivo, o qual define o campo de operação do sensor. Uma superfície localizada em qualquer ponto dentro deste volume produzirá uma leitura [11,44].

As desvantagens destes sensores são baixa sensibilidade e problemas associados com reflexão, detecção de perfis curvos e objetos que obstruem a linha de visão. Na maioria de suas aplicações, os sensores fotoelétricos são instalados na garra, em tarefas simples de manipulação [54].

Foram construídas garras de dois dedos utilizando estes sensores como indicadores da presença de uma peça [17,68]. Um emissor de raios infravermelhos está montado em um dos

dedos, e no outro encontra-se uma matriz de fotodiodos. A presença de uma peça entre os dedos é então detectada quando o feixe de luz é interrompido.

Em um outro conceito de sistema ótico, desenvolvido por Koren & Shoham [49], o efetuador possui um receptor ótico que detecta um feixe de laser. Os movimentos exigidos para a realização da tarefa são programados como movimentos do feixe de laser. O sensor detecta estes movimentos, e o controlador do robô passa a dirigir o efetuador para seguir o feixe.

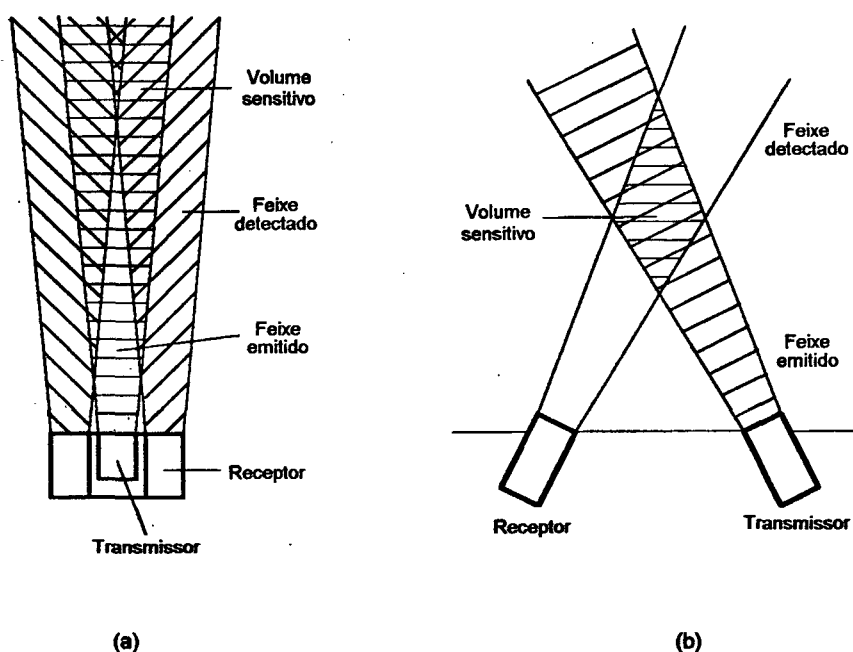


Fig. A.7 - Sensor ótico [11]

A.3.6. SENSORES PNEUMÁTICOS

Detectores pneumáticos de proximidade, à base de pressão ou vácuo, operam pela contrapressão criada quando a presença de um objeto bloqueia um orifício de saída.

O efetuador do robô é dotado de uma série de pequenos orifícios, que são alimentados com ar a uma pressão e fluxo relativamente baixos. Se a superfície toca uma peça de modo que o orifício seja bloqueado, a pressão do ar nele aumentará. Um sensor de pressão localizado atrás do orifício pode então ser usado para indicar a presença do objeto.

Estes dispositivos podem fornecer indicações bastante precisas de folgas extremamente

pequenas entre a sonda e o objeto, e são de fato rotineiramente utilizados como sensores em calibração automática sem contato e em equipamentos de inspeção. Apesar das desvantagens de necessitar de ar pressurizado e de um sensor de pressão relativamente caro, este é provavelmente o mais robusto dos sensores de proximidade [5,11,12].

A.4. SENSORES DE DISTÂNCIA

O termo sensor de distância indica um dispositivo que pode fornecer uma medida precisa da distância de um ponto de referência, em geral no próprio sensor, a um objeto situado dentro do campo de atuação do sensor.

Para aplicações industriais, o sensor de distância deveria ser capaz de medir distâncias na faixa de 0,3 a 3m, com uma resolução de pelo menos uma parte em 300, e de preferência de uma parte em 1000 [5]. Tal dispositivo seria útil para localizar objetos dentro do espaço de trabalho e para controlar um manipulador. Se, além disso, o dispositivo exigir apenas uma fração de segundo para medir uma distância, seria útil também para o rastreamento de objetos móveis, como peças sobre uma correia transportadora, e para aplicações onde se deve seguir uma linha, por exemplo na soldagem.

Para se conseguir medir a distância industrialmente pode-se usar uma das técnicas descritas a seguir.

A.4.1. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE DISTÂNCIA

a. *Triangulação*: é um dos métodos mais simples para a medida de distância. A base do triângulo é formada pela separação entre o emissor e o receptor, e seus lados pelas linhas de visão em direção ao objeto. O ápice está no ponto do objeto cuja distância está sendo determinada.

O maior problema com os métodos de triangulação é a oclusão: algum objeto no campo

visual pode interceptar uma das linhas de visão ou feixes de luz, e bloquear a visão da câmera ou projetar uma sombra sobre o objeto.

- b. *Estadimetria*: é o processo de se inferir a distância a um objeto com base em seu tamanho aparente na imagem. Isto exige que o sistema visual localize o objeto no campo de visão e o identifique unicamente entre outros objetos na cena. Para facilitar este processo, deve-se medir as distâncias entre duas faixas, pontos ou furos no objeto.
- c. *Iluminação estruturada*: consiste em se projetar um feixe plano de luz sobre um conjunto de objetos e usar a distorção deste feixe para calcular a distância. O padrão deste feixe é facilmente analisado por um computador para obter a informação sobre distância. Por exemplo, uma inflexão indica uma mudança de superfície, e uma interrupção corresponde a um espaço entre as superfícies.
- d. *Tempo de percurso*: aqui, a estimativa da distância é baseada no tempo decorrido entre a transmissão e o retorno de um pulso.

Pode-se utilizar um laser fazendo-se a medida do tempo que leva um pulso de luz emitido para retornar coaxialmente de uma superfície refletora. Uma alternativa à luz pulsante é utilizar-se um feixe contínuo de laser e medir-se o retardo, isto é, a mudança de fase, entre os feixes emitido e recebido.

Um sensor de distância ultrassônico é outro grande expoente do conceito de tempo de percurso. A idéia básica é a mesma da usada com um laser pulsante. Um sinal ultrassônico é transmitido por um pequeno período de tempo e, como a velocidade do som é conhecida para um dado meio, um simples cálculo envolvendo o intervalo de tempo entre a saída do pulso e o retorno do eco fornece uma estimativa da distância à superfície refletora. Os sistemas ultrassônicos têm a vantagem de serem mais baratos e detectarem praticamente qualquer material [44].

A.4.2. SENSORES VISUAIS

Enquanto os sensores de proximidade, toque e força têm um papel bastante

significativo na melhoria da performance do robô, a visão é reconhecida como a mais poderosa das suas capacidades sensitivas. Contudo, os sensores, o software e o hardware associados ao processamento de informações visuais são bem mais complexos que os discutidos nas seções anteriores [11,43,44].

O objetivo de um sistema de visão robótica é fornecer informações que descrevem o ambiente de trabalho, para se controlar o movimento necessário do robô na execução de determinada tarefa.

a. Aquisição de imagens

Os sensores visuais convertem a informação visual em sinais elétricos. Quando amostrados espacialmente e quantificados em amplitude, estes sinais fornecem uma imagem digital.

Os principais equipamentos utilizados para a visão do robô são câmeras de televisão, constituídas ou por um tubo ou por um sensor de imagens de rastreamento, mais os equipamentos eletrônicos associados.

Dois modos distintos de aquisição visual de imagens são o modo de ponto e o modo de acompanhamento de linha [5]. No modo de ponto, o apoio visual é utilizado para se trazer o efetuator a uma localização específica, por exemplo, inserir um pino em um furo. No modo de acompanhamento de linha, o objetivo é seguir um caminho a uma velocidade específica - por exemplo, em tarefas de de selagem, colagem ou acompanhamento da junta de solda.

Sistemas de controle visual evitam a necessidade de programação ponto-a-ponto do manipulador para seguir uma linha. Mesmo que o robô possa seguir precisamente a trajetória nominal estabelecida, podem surgir problemas devido a erros de fabricação. Por exemplo, um cordão de solda pode variar até 5mm em relação à trajetória nominal [69].

b. Posicionamento das câmeras

Vários métodos foram desenvolvidos para a utilização de sistemas de visão com robôs [12]. Estes métodos incluem:

- b.1.** Uma única câmera sobre-cabeça, usada para localizar o objeto e guiar o sistema de controle do robô para encontrá-lo. Este método é relativamente rápido, já que a câmera pode ver uma área relativamente grande da mesa de trabalho. Entretanto, ele é inacurado, pois a garra ou o braço do robô podem obstruir a visão da câmera.
- b.2.** Duas ou mais câmeras produzem uma imagem tridimensional do espaço de trabalho. Este método envolve a utilização de algoritmos ainda mais complicados e ainda não está totalmente aperfeiçoado. Entretanto ele tem a vantagem de que pode superar os erros de medição de distância e de paralaxe que ocorrem quando uma única câmera é utilizada. Contudo, se se está interessado apenas em uma parte da área de trabalho, não é possível ampliar a imagem daquela área com resolução aumentada [70].
- b.3.** O posicionamento da câmera no efetuador é provavelmente o mais importante, do ponto de vista do ferramental. Isto envolve a instalação de uma ou mais câmeras em miniatura na garra. A vantagem disto é que a câmera pode 'ver' o objeto durante todo o tempo de operação, desta forma possibilitando ao robô a fazer os ajustes na posição e orientação quando necessário.

Luo & Mullen [70] usaram um sistema conjugado em uma garra de dois dedos projetada para pegar peças aleatoriamente orientadas em uma correia transportadora. Um dos dedos aloja o sensor visual, enquanto no outro foi instalado uma fonte de luz por fibra ótica e um sensor de distância ultrassônico. O sensor ultrassônico fornece medida de profundidade adicional à imagem bidimensional da câmera. A câmera é usada para se posicionar a garra sobre a peça, de modo que não haja velocidade relativa entre elas, e, com o auxílio do sensor ultrassônico, executa-se o movimento descendente.

Atualmente os sistemas visuais são caros e têm uso limitado. Além disso, a maioria das câmeras não são suficientemente pequenas para permitir integração física com a garra. Entretanto, espera-se que eles se tornem cada vez mais populares no futuro, particularmente na montagem automatizada [12].

APÊNDICE B

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

B.1. INTRODUÇÃO

Este manual serve como referência ao usuário do programa de apoio ao processo de seleção de garras de robôs.

O funcionamento do programa será descrito utilizando como exemplo a peça mostrada na Figura B.1, de dimensões $A=30\text{mm}$, $B=C=50\text{mm}$ correspondente ao 2º teste do Capítulo 5.

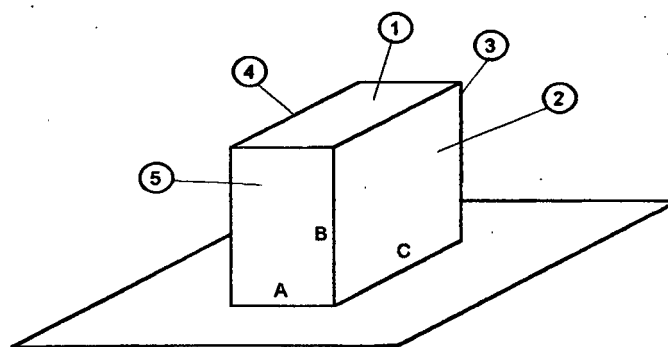


Fig. B.1 - Exemplo de aplicação

Para entrar no programa, vá ao subdiretório onde está o arquivo executável e digite OBJTJ.

Quando o programa é carregado, surge na tela do microcomputador o menu principal mostrado na Figura B.2. O menu principal é composto das seguintes opções:

- Arquivo
- Ediçar
- Analisar
- Imprimir
- Encerrar

Qualquer das opções disponíveis neste menu é selecionada da seguinte forma:

- posicione o cursor sobre a opção desejada,
- aperte ou o botão esquerdo do "mouse" ou a tecla ENTER.

Para sair do menu, aperte o botão direito do "mouse" ou a tecla ESC.

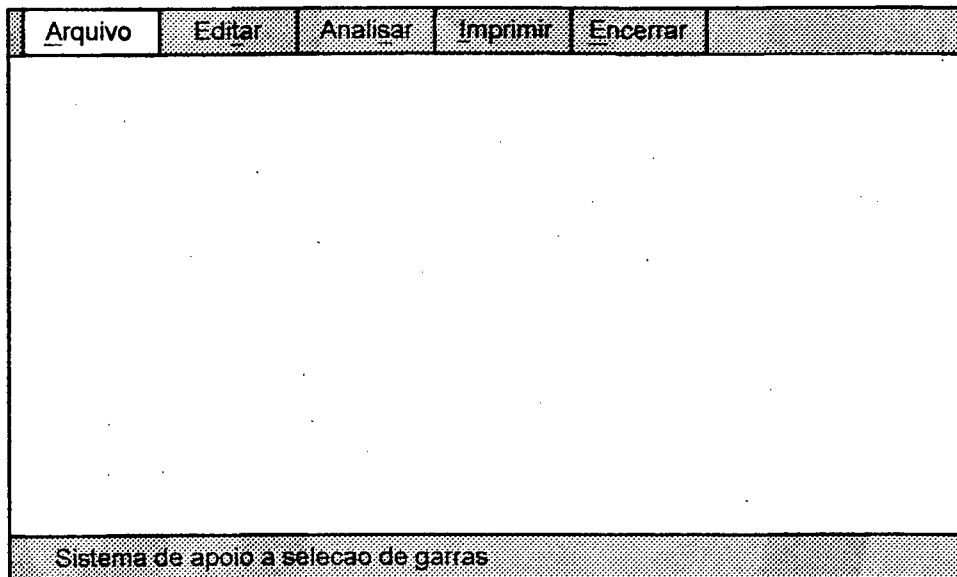


Fig. B.2 -Menu principal

Para iniciar o trabalho, selecione a opção Arquivo.

B.2. ARQUIVO

Esta opção permite a manipulação dos arquivos. Quando selecionada, aparecem na tela três opções: Ler, Salvar e Novo (Figura B.3).

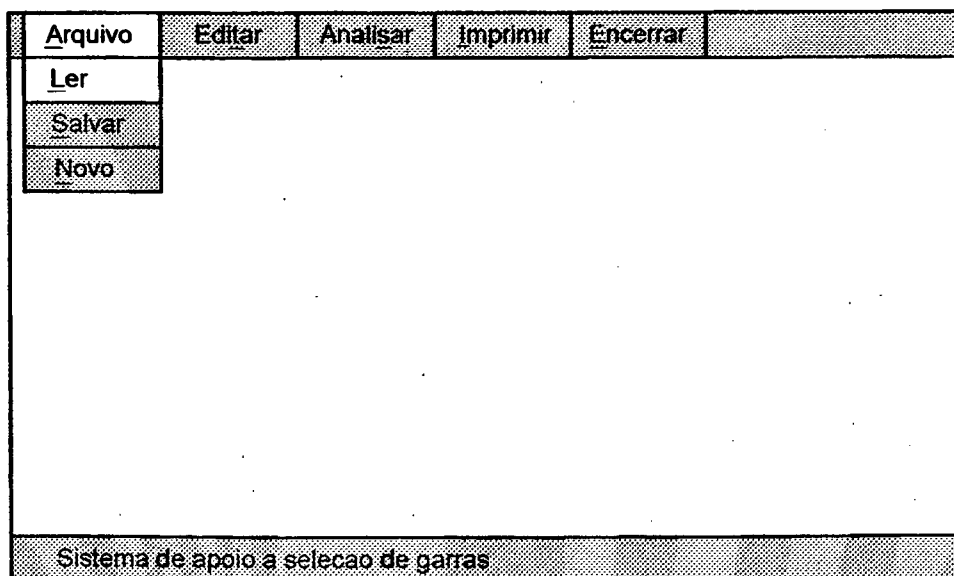


Fig. B.3 Opção arquivo do menu principal

B.2.1. Ler: usando-se a opção Ler, poderá ser utilizado um arquivo já existente, Figura B.4. O arquivo é selecionado colocando sobre ele o cursor e apertando duas vezes o botão esquerdo do "mouse" ou a tecla ENTER.

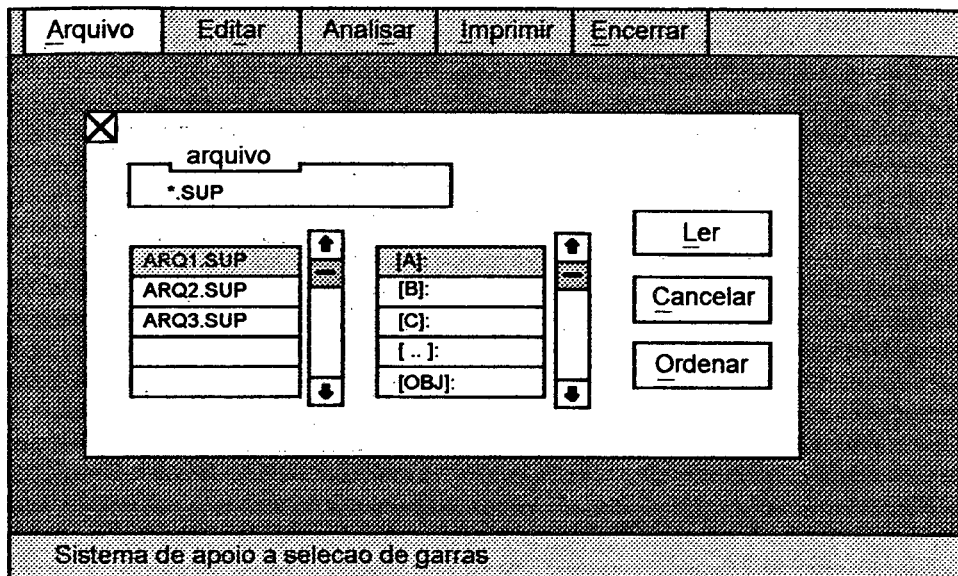


Figura B.4 - Menu de arquivos

Para ter acesso a todos os arquivos, utilize as setas ou o botão que se encontram à direita da janela.

A outra janela permite a seleção do diretório onde se encontram os arquivos. Para selecioná-lo, posicione sobre ele o cursor e aperte duas vezes o botão esquerdo do "mouse".

O arquivo selecionado é lido pelo microcomputador e poderá receber novos dados por meio da opção Editar.

B.2.2. Salvar: permite que o arquivo que está sendo utilizado seja gravado. Caso o arquivo a ser gravado seja um arquivo recém-criado, deve receber um nome. Para isto, basta digitar o nome do arquivo pelo teclado. A extensão .SUP é criada automaticamente.

B.2.3. Novo: permite que se inicie a edição de um novo arquivo para a peça. Para tanto, basta selecionar esta opção e entrar com os dados da nova peça, como explicado a seguir no item B.3.

B.3. EDITAR

Através dos menus de edição, pode-se entrar com novos dados para as peças, os materiais e algumas condições operacionais. Os dados podem ser entrados tanto para novos materiais, que ainda não constem da memória do programa, quanto para novas peças, Figura B.5.

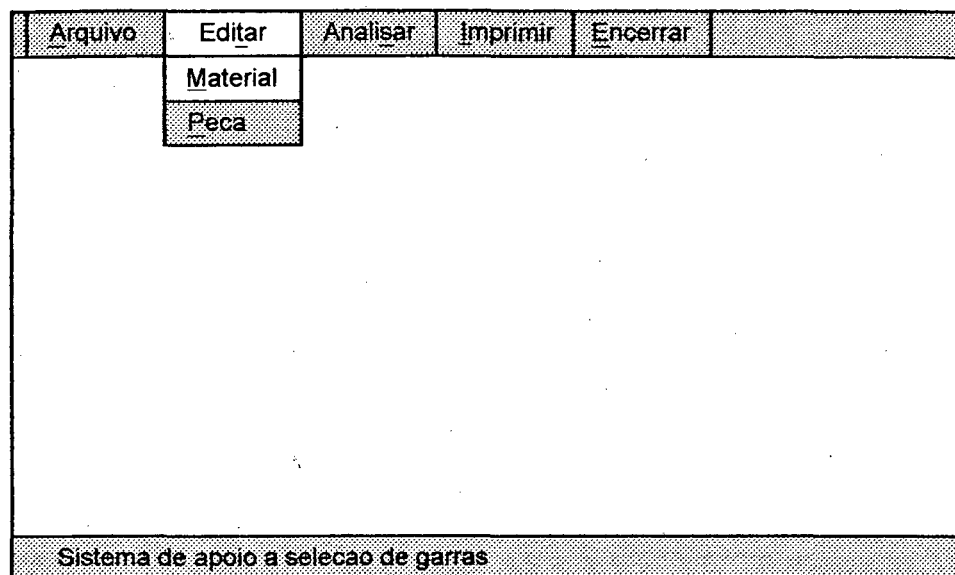


Fig. B.5 - Opção editar do menu principal

B.3.1. Material: permite a inclusão de novos materiais na memória, ou alterações dos materiais já existentes, Figura B.6.

Para editar o material, coloque o cursor no quadro correspondente e aperte o botão esquerdo do "mouse". No quadro selecionado surge um traço, que indica que o sistema está esperando a inclusão do dado. Ao apertar-se a tecla ENTER, o cursor vai automaticamente para o quadro seguinte.

Os dados a serem informados são:

- o nome do material
- seu módulo de elasticidade E, em MPa
- sua densidade, em kg/m³
- o seu coeficiente de atrito com o aço
- se é magnético ou não, e se é frágil ou não.

Figura B.6 - Menu de edição de materiais

As opções de edição, nos seis botões da parte inferior da tela são:

- Procura: quando se informa o nome do material, permite a busca dos dados relativos a este.
- Cancelar: cancela a edição em curso e volta ao menu principal.
- Grava: armazena os dados do material na memória.
- Apagar: retira o material de memória.
- Próxima: permite a edição de outro material.
- Anterior: permite trazer o material anteriormente editado para a tela de edição.

B.3.2. Peça: permite a edição dos dados relativos às superfícies de uma peça, Figura B.7. Esta edição pode ser tanto relativa a uma nova peça, quanto à alteração dos dados em uma peça já existente.

B.3.2.1. Superfícies: para a edição das informações correspondentes às superfícies da peça, os dados são colocados nos quadros correspondentes na tela. Estes dados são:

- Número: informe o número da superfície considerada, conforme o tenha definido.
- Área: informe a área da superfície, em mm².
- Distância: informe a distância entre a superfície e o centro de massa da peça.

Arquivo Editar Analisar Imprimir Encerrar

Numero Angulo horizontal [graus]

Area [mm²] Distancia MD

Distancia [mm]

Ler Arq Grava Mem

Grava Arq Pares sup

Proxima Anterior

Polida?

Nao

Sim

Tipo

Plana

Cilindrica

Esferica

Sistema de apoio a selecao de garras

Fig. B.7 - Menu de edição de superficiess

- Ângulo horizontal: informe o ângulo da superfície com o plano horizontal, em graus.
- Distância MD: informe a distância entre o centróide da superfície e o vetor peso unitário que passa pelo centro de massa, em mm.

Neste menu também se entra com informações sobre a forma da superfície considerada, se plana, cilíndrica ou esférica, e o seu acabamento superficial, se é polida ou não. Isto é feito escolhendo a opção conveniente no menu.

Para a peça considerada, o menu de edição para as superfícies (1) e (2) é o mostrado, respectivamente, nas Figuras B.8 e B.9.

Após o término da edição de cada superfície, deve-se selecionar o botão "Grava Mem", que permita armazenar os dados desta superfície na memória e editar os de uma nova superfície.

Os outros botões são:

- Ler Arquivo: permite que se leia um arquivo já existente na memória.
- Grava Arquivo: permite que o arquivo, após o término da edição, seja armazenado na memória.
- Próxima e anterior: permitem que os dados sobre outras superfícies sejam vistos na tela.
- Pares de superfícies: após o término da edição dos dados das superfícies individuais, parte-se para a edição dos pares de superfícies, conforme explicado no item a seguir.

Arquivo	Editar	Analisar	Imprimir	Encerrar
---------	--------	----------	----------	----------

Numero 1	Angulo horizontal [graus] 0.000
Area [mm2] 1500.000	Distancia MD 0.000
Distancia [mm] 25.000	

<input type="button" value="Ler Arq"/>	<input type="button" value="Grava Mem"/>	<input type="radio"/> Polida?	<input checked="" type="radio"/> Plana
<input type="button" value="Grava Arq"/>	<input type="button" value="Pares sup"/>	<input checked="" type="radio"/> Nao	<input type="radio"/> Cilindrica
<input type="button" value="Proxima"/>	<input type="button" value="Anterior"/>	<input type="radio"/> Sim	<input type="radio"/> Esferica

Sistema de apoio a selecao de garras

Fig. B.8 - Edição da superfície (1)

Arquivo	Editar	Analisar	Imprimir	Encerrar
---------	--------	----------	----------	----------

Numero 2	Angulo horizontal [graus] 90.000
Area [mm2] 2500.000	Distancia MD 15.000
Distancia [mm] 15.000	

<input type="button" value="Ler Arq"/>	<input type="button" value="Grava Mem"/>	<input type="radio"/> Polida?	<input checked="" type="radio"/> Plana
<input type="button" value="Grava Arq"/>	<input type="button" value="Pares sup"/>	<input checked="" type="radio"/> Nao	<input type="radio"/> Cilindrica
<input type="button" value="Proxima"/>	<input type="button" value="Anterior"/>	<input type="radio"/> Sim	<input type="radio"/> Esferica

Sistema de apoio a selecao de garras

Fig. B.9 - Edição da superfície (2)

B.3.2.2 Pares de superfícies: após a entrada de dados relativos às superfícies individuais da peça, passa-se para a edição dos pares de superfícies opostas, selecionando o botão correspondente na tela da Figura B.7.

O programa gera automaticamente as combinações de superfícies, e as informa na parte superior do menu. Para superfícies com ângulo maior que 5° , basta informar isto, e partir para a edição apenas das superfícies opostas.

Neste menu, entra-se com os dados relativos aos pares de superfícies.

- Ângulo: é o ângulo entre as duas superfícies, em graus.
- Área de projeção: é a área projetada de uma superfície na outra, em mm^2 .
- Distância: informe a distância entre os centróides das superfícies, em mm.
- Distância DT: informe a distância perpendicular entre o centro de massa da peça e o eixo de prensão das superfícies.
- Distância DI: informe a distância do centro de massa da peça ao ponto P.

Deve-se informar ainda se as superfícies de prensão são internas ou externas.

Para os pares (2,4) e (3,5) as informações estão mostradas nas Figuras B.10 e B.11, respectivamente.

Arquivo Editar Analisar Imprimir Encerrar

Superfícies 2 e 4

Angulo [graus] 0.000

Area projecao [mm2] 2500.000

Distancia (centroides) [mm] 30.000

Distancia DT [mm] 0.000

Distancia DI [mm] 0.000

Internas?

Nao

Sim

Proxima Anterior OK

Sistema de apoio a selecao de garras

Fig. B.10 - Menu de edição do par de superfícies (2,4)

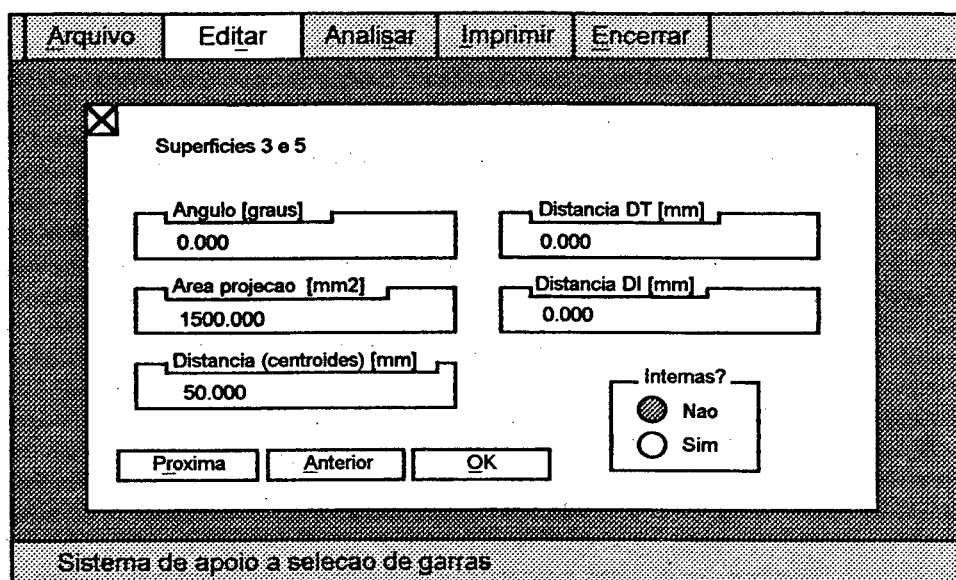


Fig. B.11 - Menu de edição do par de superfícies (3,5)

Por meio dos botões "Próxima" e "Anterior" os outros pares de superfícies podem ser trazidos à tela de edição.

B.4. Analisar: após a entrada dos dados relativos às superfícies, entra-se no menu de análise, Figura B.12. O programa faz então algumas perguntas ao usuário, relativas a parâmetros operacionais, como temperatura de operação e contaminação superficial da peça, ou se a garra manipulará materiais radioativos. Após todas elas terem sido respondidas, fornece a ordem de preferência das superfícies e dos respectivos tipos de garras, e apresenta algumas observações relativas à seleção e projeto da garra, com base nas respostas fornecidas pelo usuário.

Nesta função os comandos são aceitos via teclado ou seja deve-se digitar o comando seguido pela tecla ENTER.

Alguns comandos aceitos pela função:

- SAIR,MENU,FIM : retornam ao menu principal
- IMPRIMIR : Idem ao imprimir do menu principal, imprime as observações e a ordem de preferência das garras e superfícies.

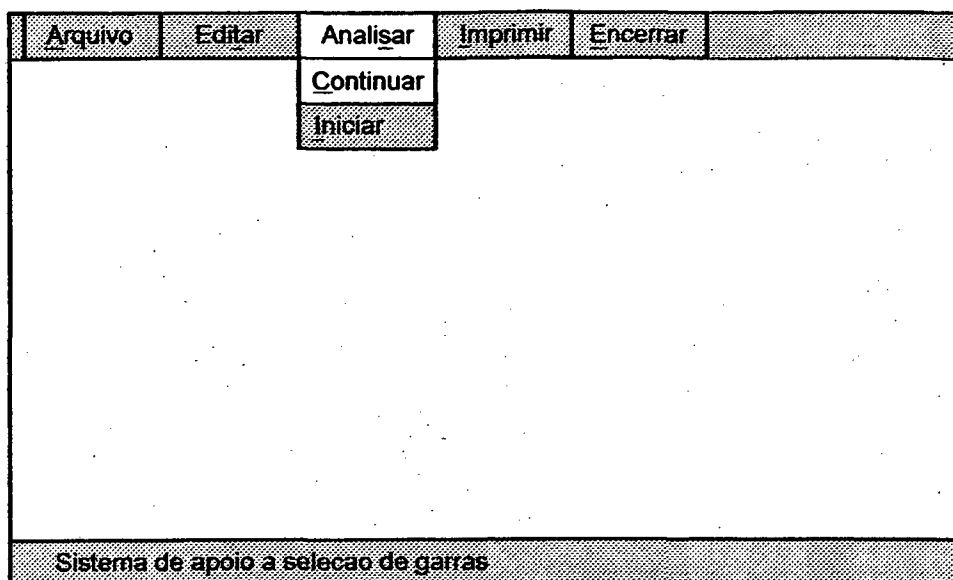


Fig. B.12 - Opção analisar do menu principal

O programa pode também ser questionado sobre a ordem de preferência entre as superfícies, perguntando-se porque um par de superfícies é preferido a outro, ou porque um par de superfícies, que por exemplo tenha um ângulo de desvio superior a 5° , não foi considerado. O programa então retorna a resposta adequada.

A opção "Imprimir" permite a impressão dos resultados e recomendações.

Para encerrar a sessão de trabalho, escolhe-se a opção "Encerrar" no menu principal.