

UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Electrotécnica

Relatório interno - Novembro de 1989

SENSORES DE TACTO

Rui Alexandre de Matos Araújo

## SENSORES DE TACTO

RESUMO: Apresentação de um apanhado sobre alguns métodos de construção de sensores de tacto.

### 1. INTRODUÇÃO.

Na robótica, pretende-se que os sistemas de tacto se integrem em sistemas mais amplos de sensores, por exemplo no complemento dos sistemas de visão que apesar de desempenharem um papel fundamental são insuficientes em muitas situações. Entre as funções dos sensores de tacto contam-se as seguintes:

- Reconhecimento de objectos, através da obtenção de informação adicional, quando tal não é possível unicamente com a visão.

- Desfazer ambiguidades quanto á orientação de objectos localizados visualmente, bem como obter informação acerca da orientação destes dentro do "gripper".

- Detecção do resvalamento do objecto no interior do "gripper".

São atributos desejáveis para um sensor de tacto:

- Uma resolução mínima de 5x10 pontos com espaçamento entre cada elemento do sensor (taxel, forcel) de 1 a 2 mm.

- Sensibilidade de 1 a 10 gf (gramas força).

- Gama dinâmica de 1000:1 (relação entre os máximo e o mínimo valores mesuráveis).

- Largura de banda de 100Hz a 1kHz.

- Histerese muito reduzida.

- Medição não só da força normal á superfície do sensor, mas também da tangencial.

- Pré-processamento local de dados.

É de notar que a não linearidade pode ser compensada por software.

Tem-se tentado a construção de sensores de vários tipos, nomeadamente capacitivos [1,14,15], ópticos, magnéticos, piezo-eléctricos [12,13] e piezo-resistivos. Nas secções seguintes falaremos de sensores de alguns destes tipos. A geometria mais usada é a planar embora também se tenham construído sensores em forma de dedo [4]. Seria vantajoso se o sensor detecta-se também a normal á superfície com que está em contacto.

## 2. SENSORES DE TACTO CAPACITIVOS.

Este tipo de sensores são normalmente construídos de um material elástico entalado entre dois conjuntos de placas condutoras situadas em planos paralelos entre si. No caso do sensor a que se refere a fig.1 [1] a distância entre taxels é de 1,9 mm. As placas que se encontram em lados opostos da almofada são perpendiculares entre si, formando assim em cada intersecção um condensador (fig.2(a)). Da pressão aplicada em cada taxel depende, por variação da espessura do dieléctrico, a capacidade do respectivo condensador. Traduzimos assim a força numa quantidade eléctrica.

O material entre as placas condutoras é muito importante pois forma simultaneamente o meio elástico e o dieléctrico do condensador. No caso de [1] este material é constituído de borracha de silício.

A medição da capacidade do condensador pode, por exemplo, ser feita aplicando-lhe uma tensão sinusoidal e medindo a

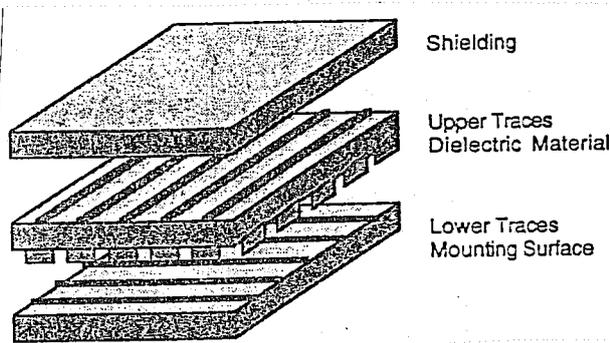


Figura 1: Vista em corte do sensor de tacto. De cima para baixo: placas condutoras de cima, material elastó-dieléctrico, placas condutoras de baixo. Todo o sensor é coberto com material para blindagem eléctrica.

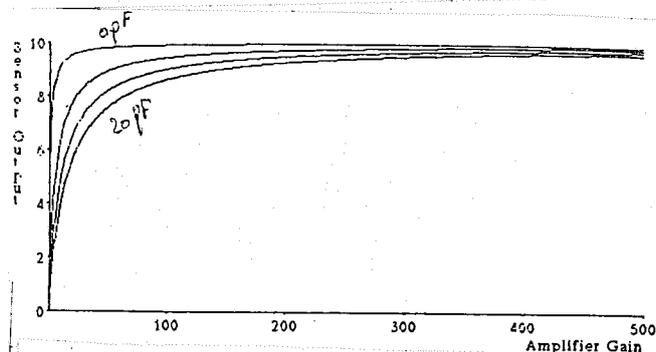


Figura 3: Gráfico da imunidade ao "crosstalk" em função do ganho do amplificador.  $C_u$  varia de 0 a 20pF.

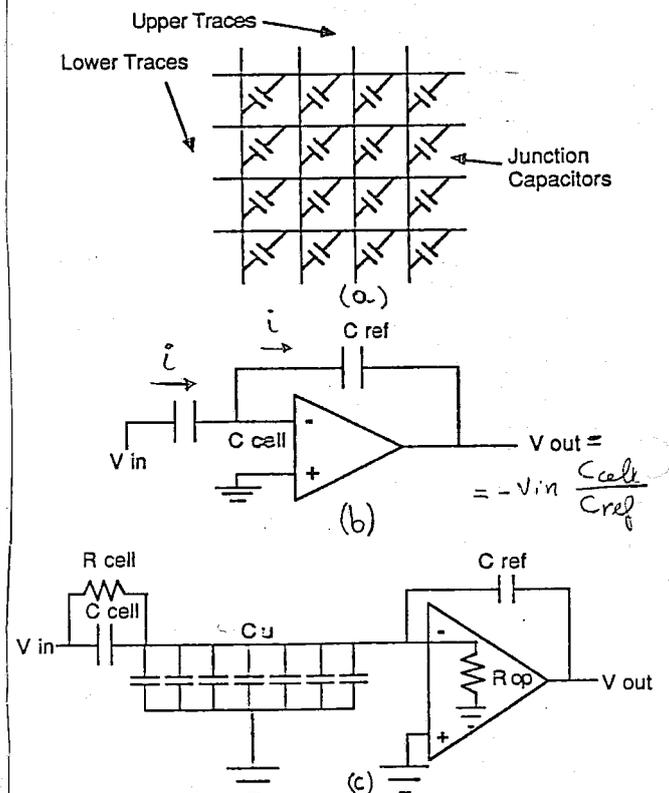


Figura 2: Diagramas da matriz de condensadores.

corrente que o atravessa (fig.2(b)). Como a carga do condensador varia continuamente, este método é menos sensível às perdas no condensador do que outras técnicas de medição.

Sendo a capacidade muito baixa, uma vez que a (grande) densidade de taxels requerida provoca que a área de cada condensador seja pequena, é necessário que a frequência da tensão aplicada seja elevada para obter uma corrente aceitável. No

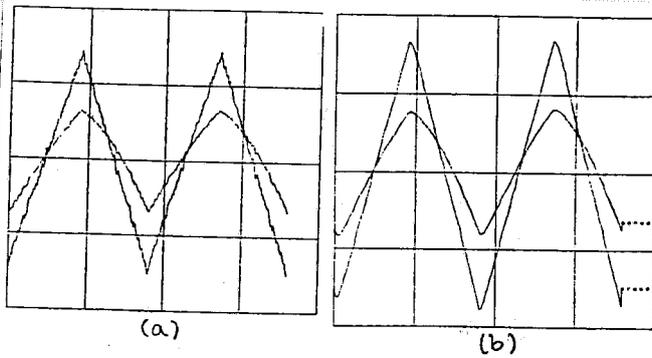


Figura 4: Esquerda: Saída do sensor sobreposta com a força aplicada. Direita: O mesmo após filtragem passa baixo.

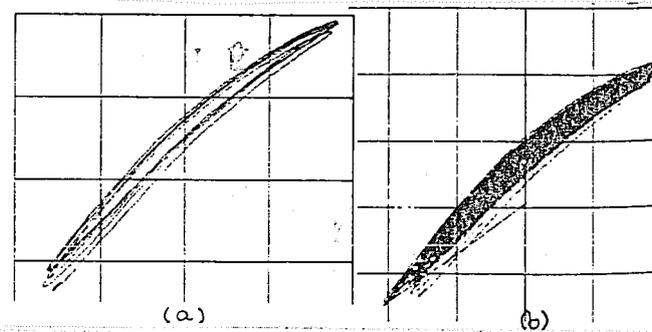


Figura 5: Esquerda: Diferença entre a saída do sensor quando a entrada está a aumentar e quando a entrada está a diminuir ao longo de 4 tentativas. Direita: O mesmo após muitas tentativas.

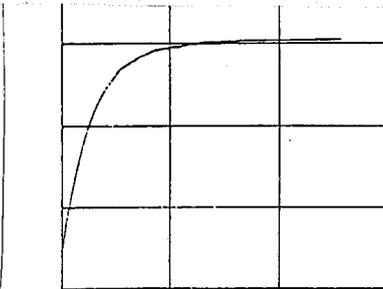


Figura 6: Deslocamento do sensor quando a entrada é constante (resposta a degrau).

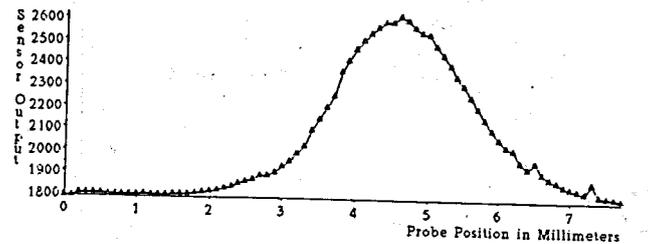
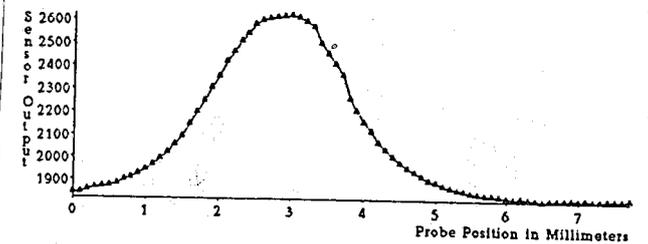
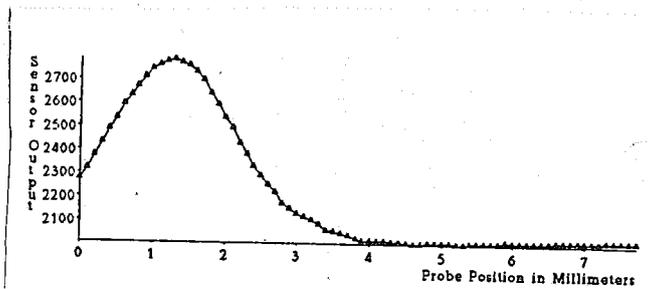


Figura 7: Selectividade espacial do sensor. Resposta de 3 taxels adjacentes quando uma força constante é aplicada a vários pontos situados na mesma recta e espaçados de 0,1mm.

entanto, e dependendo do circuito electrónico de varrimento, a frequência não pode, sem deteriorar o funcionamento do circuito, ser tão elevada quanto seria desejável. Para ilustrar isto, consideremos um circuito de varrimento em que o sinal sinusoidal seja, sequencialmente, aplicado a cada linha da matriz de taxels (estando todas as outras á massa) e retirado na coluna respectiva. O circuito equivalente de um tal esquema encontra-se na fig.2(c) - Cu é o paralelo de todos os condensadores da coluna do taxel excepto o da linha seleccionada. Através da análise deste circuito contruiu-se a fig.3, a partir da qual concluímos que o ganho do amplificador terá que ser limitado inferiormente se quisermos reduzir o "crosstalk" devido a Cu a um nível razoável. Sendo assim, o produto ganho largura de banda limita a frequência máxima utilizável.

Resultados experimentais obtidos por Siegel et al [1]:

- Para a mesma pressão (e o mesmo taxel), a resposta variava com a área a que a pressão era aplicada.
- Boa resposta linear (fig.4) - facilitando o tratamento dos dados.
- Verificou-se histerese (fig.5(a)) devido á diferença entre a velocidade de expansão e de contracção do dieléctrico quando sujeito á mesma força. No entanto, as variações de resposta devido á histerese estão dentro da gama de ruído do sistema - fig.5(b).
- O sensor é melhor na determinação de variações do que valores absolutos de pressão.
- Quanto á selectividade espacial do sensor, nota-se uma sobreposição de respostas em sensores adjacentes - fig.7. É de notar, nesta figura, que a distância entre os picos é aproximadamente 1,9 mm que é a distância entre taxels neste sensor.

Estes resultados têm a ver principalmente com o comportamento da parte mecânica do sensor.

Os sensores de tacto capacitivos necessitam de ser blindados das interferências electromagnéticas exteriores. A sensibilidade a estas interferências é a principal desvantagem deste tipo de sensores.

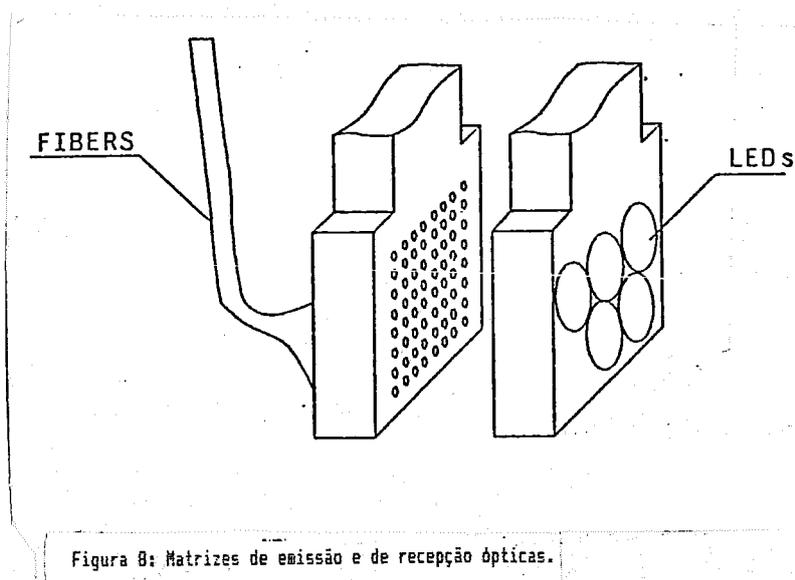
### 3. SENSORES DE TACTO ÓPTICOS

Os sensores de tacto ópticos usam a luz como meio de medir a força. As principais vantagens deste tipo de sensores são [5] :

- Insensibilidade ás interferências electromagnéticas.
- Segurança em ambientes explosivos.
- Bom isolamento eléctrico .
- Fonte de alimentação e circuitos electrónicos desnecessários no ponto onde se localiza o sensor.

Têm-se desenvolvido sensores ópticos, usando as mais variadas técnicas. Tentaremos de seguida apresentar brevemente algumas delas.

Yang e Siegel [2] apresentaram um sensor de tacto simples que consiste numa matriz de fibras ópticas destinadas a recolher a luz emitida por conjunto de diodos emissores de luz infravermelha situados em frente - fig.8. Este sensor permite a obtenção de uma imagem binária do objecto opáco. Tanto o diâmetro dos taxels como a distância entre eles é de 0,5 mm. a principal informação que se pode obter com este sensor é o perfil do objecto - o que , para efeitos de reconhecimento, é pouco.



Schoenwald et al [3] construíram um sensor constituído por dois conjuntos de fibras ópticas que, estando em planos paralelos, são ortogonais - formando assim uma matriz (fig.9). Entre os dois conjuntos há uma almofada de material, transparente apenas na intersecção entre as fibras. As fibras conseguem emitir e receber luz através de uma raspagem que se efectuou na sua superfície (fig.10). A força aplicada determina a compressão do material interior e assim a quantidade de luz que passa da fibra emissora para a receptora (fig.11). A resposta é não linear mas crescente (fig.12). Por este método parece ser possível construir sensores relativamente finos e de elevada densidade de taxels. As principais desvantagens deste sensor são o seu elevado tempo de resposta (0,4 s - talvez melhorável com a utilização de um material elástico mais adequado) e, possivelmente, a curta duração devido á quebra no local de raspagem provocada pela

fadiga induzida pela dobragem.

Begej [4], para além de um breve apanhado sobre vários tipos de sensores ópticos, apresenta dois sensores (um planar e outro

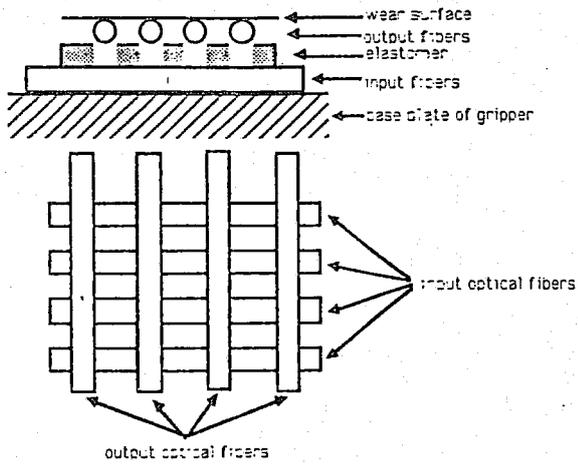


Figura 9: Configuração da camada elástica entalada entre as linhas e colunas (que são fibras ópticas) da matriz.

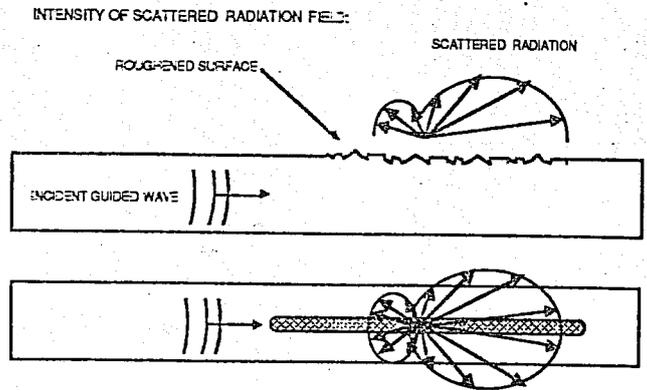


Figura 10: Ilustração do princípio de difusão da luz devido à rugosidade da superfície fronteira.

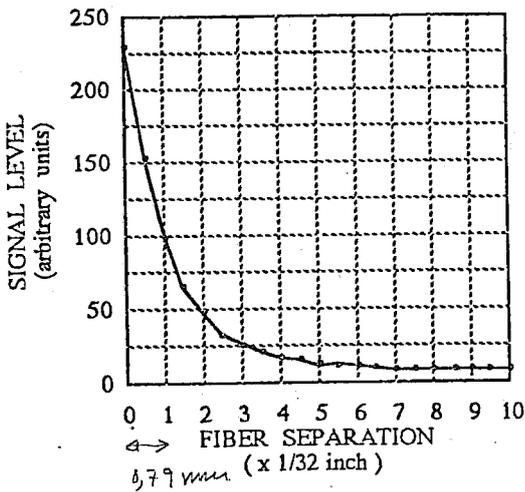


Figura 11: Sinal de resposta em função da separação entre as fibras (ortogonais).

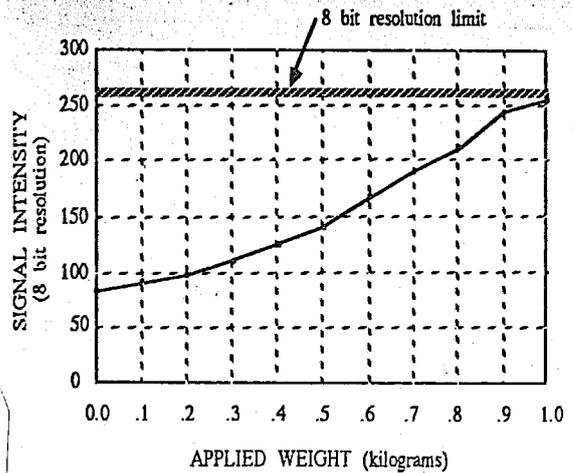
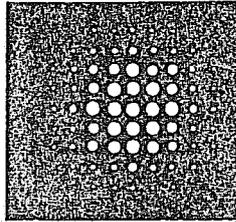
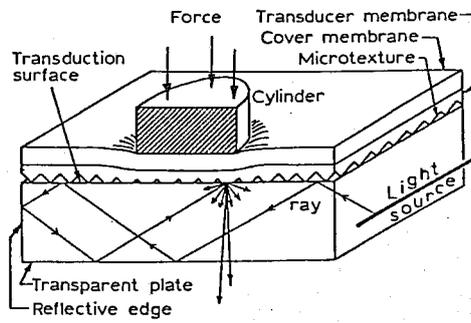


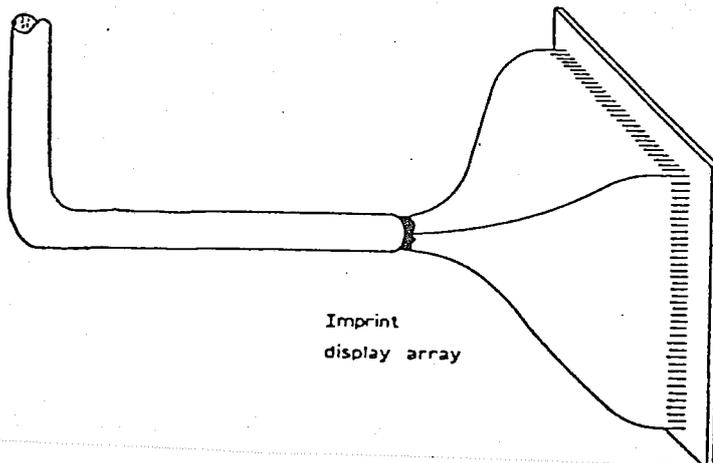
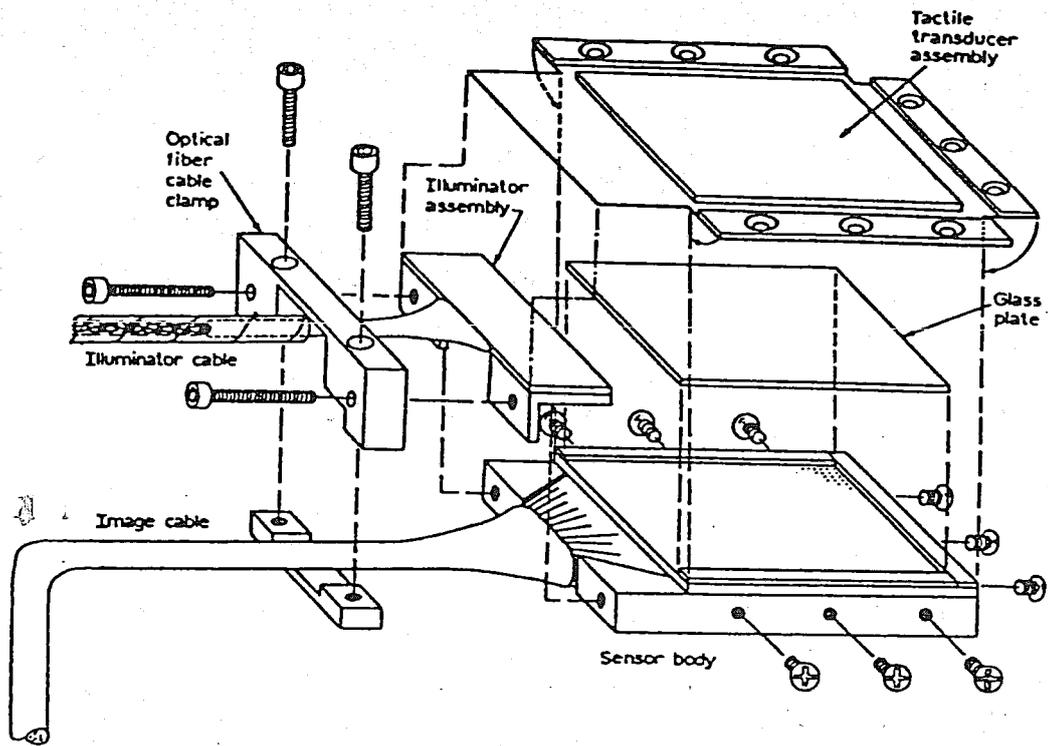
Figura 12: Sinal de resposta à força aplicada ao centro do forcel.

em forma de dedo) baseados na reflexão interna total (RIT). A RIT consiste na incidência de um raio luminoso, na superfície de separação de dois meios, com um ângulo de incidência



Appearance of imprint

Figura 13: Arranjo dos componentes para a transdução da distribuição de força no sensor por frustração da reflexão interna total. O diagrama de baixo ilustra como as áreas sujeitas a uma maior pressão aparecem como regiões de maior intensidade luminosa.



Imprint display array

Figura 14: Esquema de construção do sensor de tacto RIT planar.

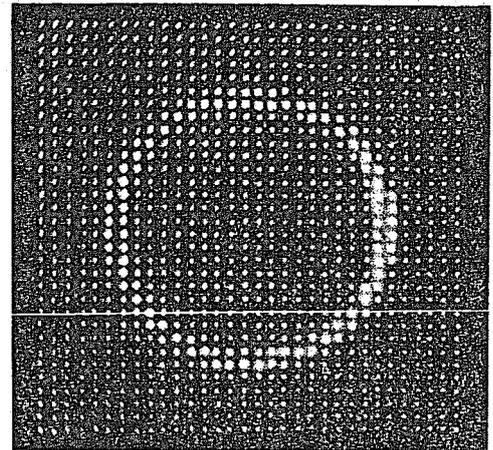
TABELA I  
CARACTERISTICAS DO SENSOR DE TACTO RIT PLANAR

Sensor size	length: 64 mm width: 44 mm thickness: 10 mm
Active area	32 × 32 mm
Number of taxels	1024
Taxel density	1 taxel/mm <sup>2</sup>
Taxel spacing	1 mm
Force range	0-0.4 N/taxel (1.5 oz)
Pressure range	0-0.4 MPa (60 psi)
Optical cable length	1.5 m
Frequency response	0 to 200 Hz

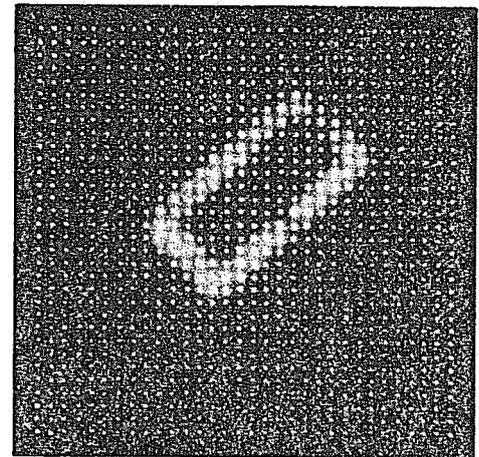
TABELA II  
CARACTERISTICAS DO SENSOR DE TACTO RIT EM FORMA DE DEDO

Size (sensor head)	21-mm diameter 31 mm long
Weight (sensor head)	20 g
Sensor mount	4.65-mm diameter 10 mm long
Taxel spacing	1 mm over fovea area (169 mm <sup>2</sup> ) 3.2 mm over remainder area (811 mm <sup>2</sup> )
Pressure range*	0-0.4 MPa
Force detection	normal (vertical) forces only; shear forces are not detectable
Force range*	0-0.4 N/taxel
Immunity to electrical interference	very high due to optical nature of sensor
Size of display array	case dimensions; 31 mm wide 31 mm high 20 mm deep image array dimensions, 19 mm wide 21 mm high
Image cable length	0.76 m
Illuminator cable length	0.87 m
Frequency response*	0 to 200 Hz

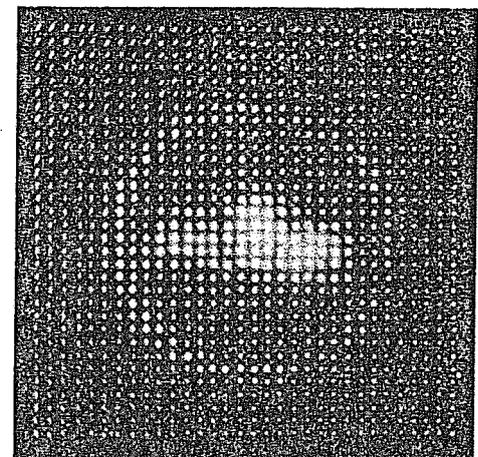
\* Measured on an earlier version of the optical sensor (Begej [27]).



(a)



(b)



(c)

Figura 15: Fotografias do "display array" (fig.14) mostrando as impressões tácteis dos vários objectos. O "display array" dispõe de 32x32 fibras ópticas espaçadas de 1mm. (a) Anel. (b) Bloco de plástico escavado. (c) Moeda de 5 centimos (E.U.A.).

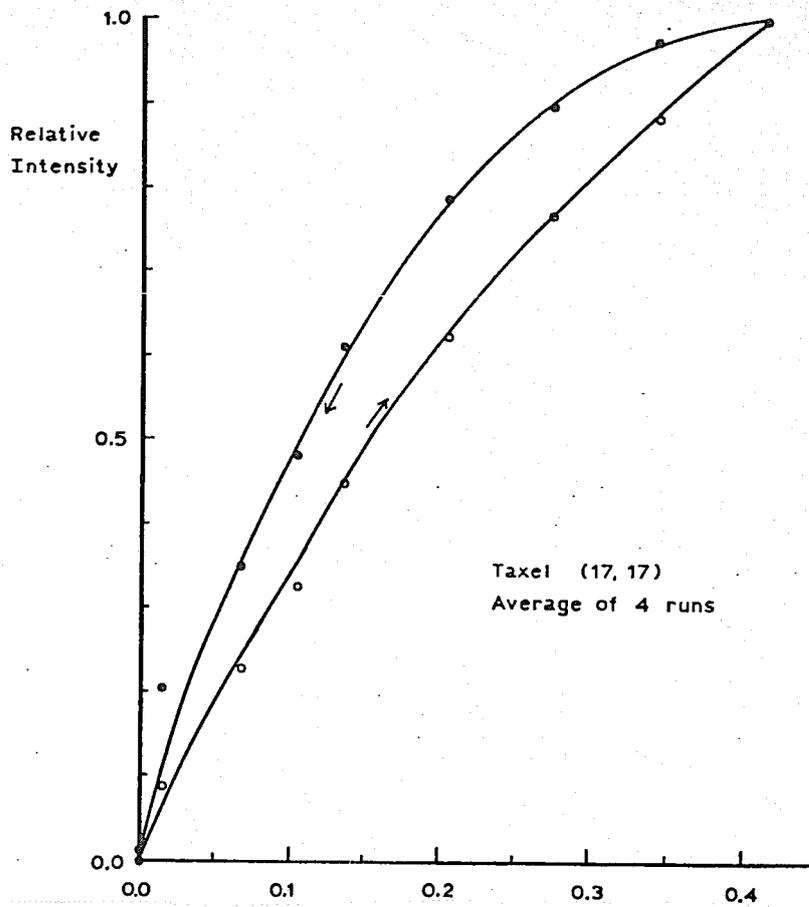


Figura 16: Resposta à força aplicada a um taxel do sensor de tacto planar. Foi usado um aplicador pneumático de pressão cobrindo toda a superfície do sensor.

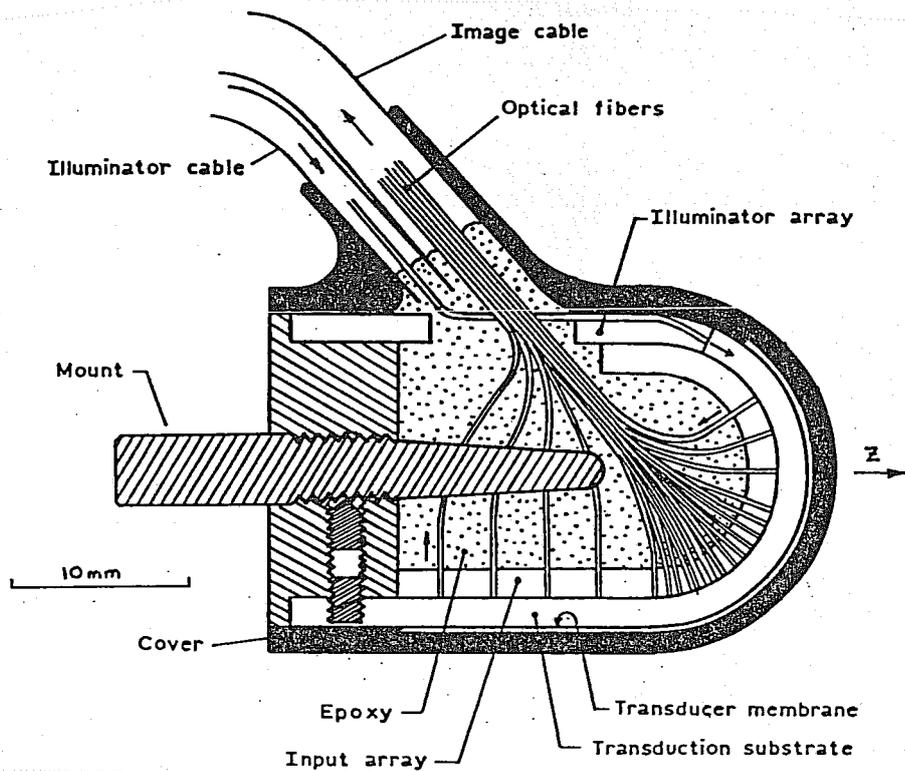


Figura 17: Vista em corte do sensor de tacto RIT em forma de dedo.

(relativamente á normal) superior ao ângulo crítico  $\arcsen(n_1/n_2)$ , onde  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração dos meios. Podemos deste modo confinar ao interior de um material a propagação da luz (fig.13). Se o arranjo do sensor for tal que a aplicação de forças provoque a alteração do índice de refração de um dos meios então podemos frustrar a RIT. A luz difundida para trás nos locais onde a RIT foi frustrada já não obedece á condição angular atrás referida podendo ser detectada (por um CCD por exemplo) fora do guia de onda dentro do qual a luz estava inicialmente confinada.

O esquema de construção do sensor planar encontra-se na fig.14. As características principais deste sensor estão na tabela I. Foi usado com este sensor um módulo de pré-processamento que realiza algumas operações sobre os dados recolhidos. Na fig.15 encontram-se fotografias tiradas ao "display array" (fig.14) quando sobre o sensor se encontravam objectos (estas fotos são uma representação gráfica dos dados que estariam na memória). A fig.16 apresenta a resposta de um taxel á pressão aplicada. Como se nota, a resposta é não linear e apresenta histerese. O módulo de pré-processamento é capaz de processar dados a uma velocidade de 2 a 10 imagens por segundo (dependendo da complexidade da operação realizada).

Na fig.17 encontra-se um esquema do sensor de tacto em forma de dedo. Neste sensor é essencial que a espessura do guia de onda seja pequena quando comparada com raio de curvatura da superfície. Devido á sua geometria o sensor pode obter maior informação sobre a direcção das forças aplicadas. Na tabela II figuram as principais características técnicas (é de notar que a densidade de taxels não é constante).

Ristic et al [5] apresentam um sensor de tacto em que a força aplicada a cada taxel faz variar a distância de uma superfície reflectora a um par de fibras ópticas (fig.18). Como desta distância depende a quantidade de luz que passa da fibra emissora para a receptora pode-se assim medir a força aplicada.

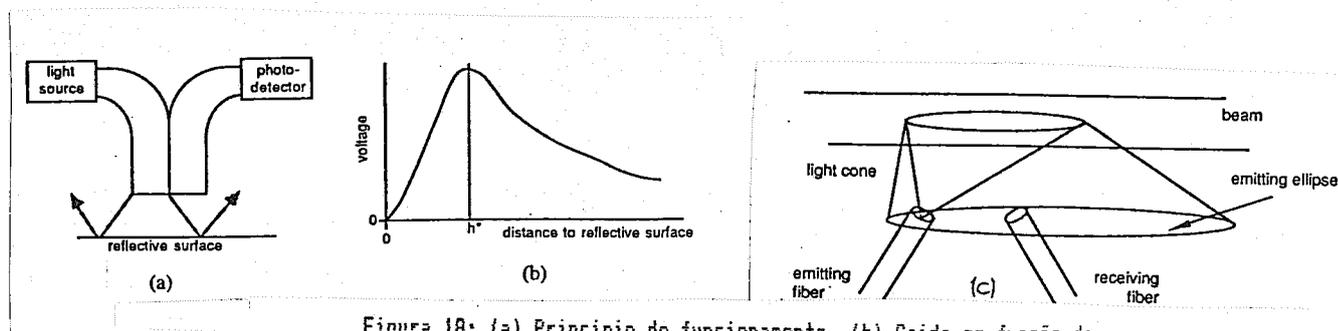


Figura 18: (a) Princípio de funcionamento. (b) Saída em função da distância á superfície reflectora. (c) Esquema da trajetória da luz no interior do sensor.

Foi construído um protótipo com um único taxel cujo esquema se encontra na fig.19. Com este protótipo acharam-se experimentalmente os valores óptimos para os parâmetros  $\theta$ ,  $d$  e  $h$  (fig.19). Foi construído um modelo experimental com quatro taxels (fig.20). A maior gama de forças obtida foi de 0 a 70g (a esta gama correspondia a pior sensibilidade - 500mg). Com "beam sheets" (fig.20) mais grossos, esta gama pode ser aumentada. Neste modelo experimental a distância entre os taxels era maior que 2mm.

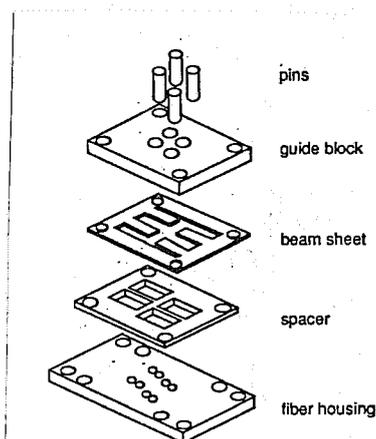
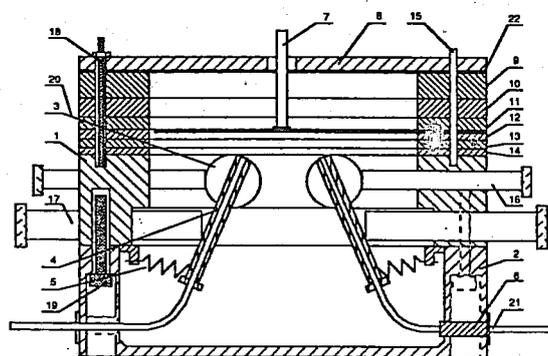
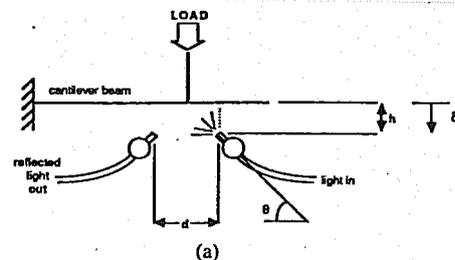


Figura 20: Esquema do sensor de tacto com 4 taxels.



- |                           |                             |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1 Top                     | 12 Spacer 4                 |
| 2 Base                    | 13 Spacer 5                 |
| 3 Insert                  | 14 Plate 1                  |
| 4 Fibre Assembly          | 15 Dowel Pin                |
| 5 Spring                  | 16 Lead screw to vary d     |
| 6 Rubber Tube             | 17 Lead screw to vary theta |
| 7 Beam Assembly           | 18 Threaded Dowel Pin       |
| 8 Pressure Plate Assembly | 19 Socket Head Screw        |
| 9 Spacer 1                | 20 Set Screw                |
| 10 Spacer 2               | 21 Optical Fibre            |
| 11 Spacer 3               | 22 Rubber Pad               |

(b)

Figura 19: Esquemas de principio (a) e pratico (b) do protótipo de sensor de força.

## 8. SENSORES DE TACTO PIÉZORESISTIVOS

Os sensores piézoresistivos baseiam-se na variação da resistência com a força aplicada.

Russel [6] descreve um sensor constituído por várias faixas paralelas (de 0,5mm de largura) de um material sensível ao esticamento da superfície exterior do sensor á qual estão agarrados - fig.21. Esta superfície é suportada por uma almofada interior. Na fig.22 encontra-se esquematizado o circuito eléctrico do sensor. Como se percebe, a tomada de tensão nos extremos de cada sensor permite a obtenção das resistências. Em dois protótipos realizados, o espaçamento entre taxels foi de 6mm o que é bastante elevado. Os resultados obtidos com a aplicação no sensor de alguns objectos estão representados na fig.23. Este sensor tem boas sensibilidade, e resistência ao desgaste, esta ultima devido ao amortecimento provocado pela almofada interior.

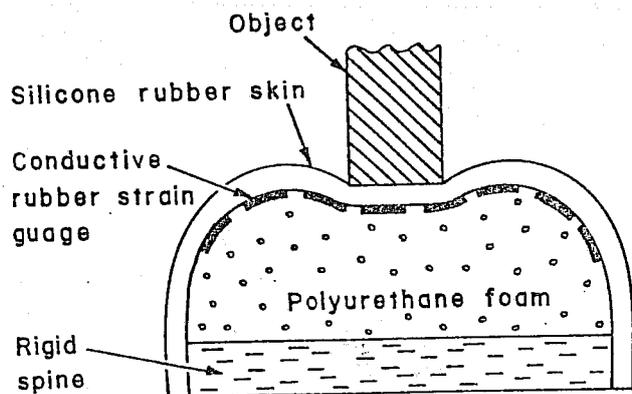


Figura 21: Diagrama em corte do sensor de tacto.

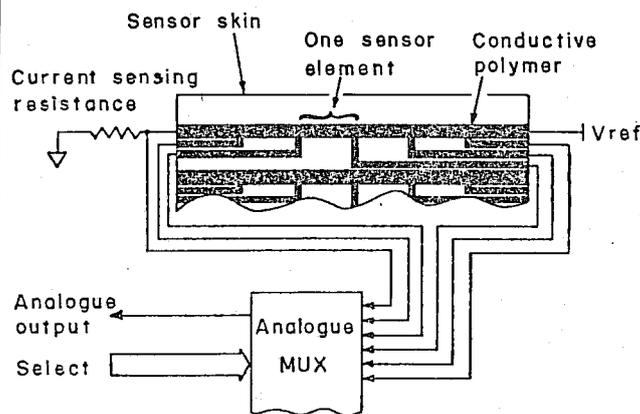
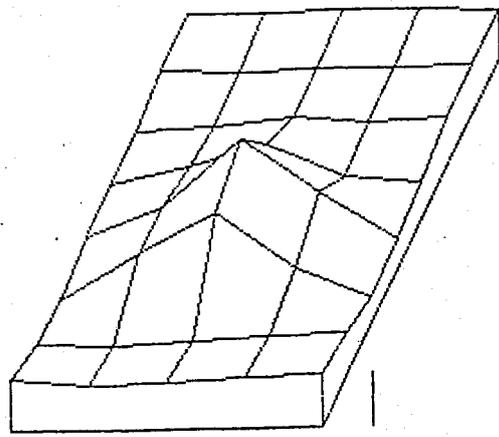


Figura 22: Circuito eléctrico do sensor.

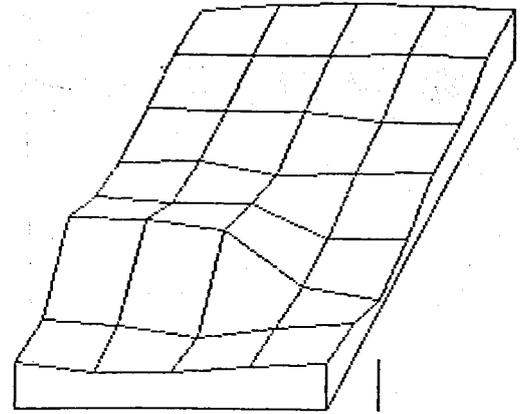
Lauber et al [7] tendo feito experiências com vários tipos de sensores, sustentam que os sensores piézoresistivos são os mais convenientes. Propoem também duas formas para construção de sensores deste tipo. Na primeira, a força é aplicada, através de pinos, a discos piézoresistivos - fig.24. Na segunda, uma camada de material piézoresistivo assenta sobre vários conjuntos (taxels) de coroas circulares (de material condutor) concêntricas que constituem os terminais das varias resistências (uma por taxel) - fig.25.

O programa ESPRIT 278 [8,9] tinha como principal objectivo a elaboração de um sistema robótico guiado por vários sensores e capaz de manipular objectos dispostos aleatoriamente e colocá-los precisamente numa dada posição e orientação. Dentro desta lógica, desenvolveram-se dois sensores de tacto planares. Um deles é incorporado num "gripper" e usa um princípio semelhante ao que Begej (ver secção 3) utilizou. O outro é piézoresistivo com uma matriz de 32x32 taxels distânciados de 1,27mm. Cada taxel é formado pela intersecção de uma linha e de uma coluna. As colunas são pistas de cobre paralelas num circuito impresso. Cada linha é formada por um tubo de material piézoresistivo dentro do qual



(a)

REF



(b)

REF

Figura 23: Respostas do sensor à aplicação de um objecto aguçado (a) e de um bordo de uma placa (b).

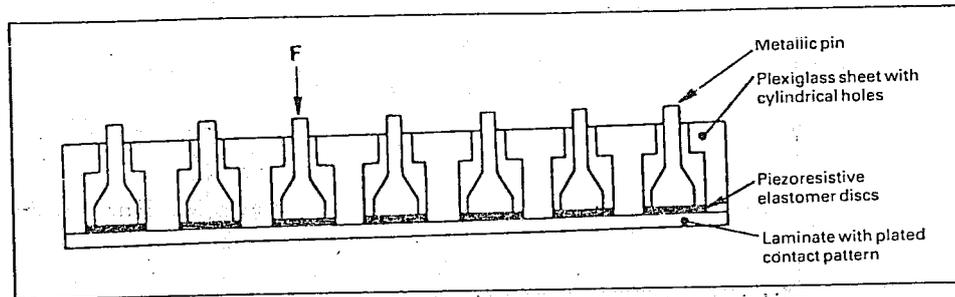


Figura 24: Esquema em corte do sensor de tacto piézo-resistivo. Os padrões de contacto são os mesmos dos da fig.25.

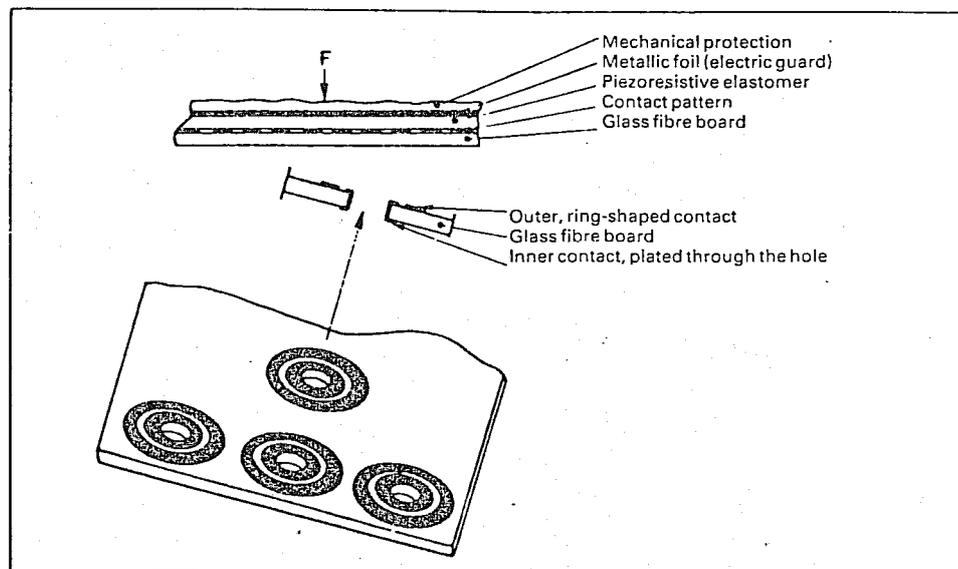


Figura 25: Diagrama do sensor de tacto piézo-resistivo. Cima: corte. Baixo: Padrões de contacto.

existe um fio de cobre flexível - fig.26. As linhas são limitadas por um lado pelo circuito impresso e por outro por uma camada de borracha de silício que constitui a superfície de contacto com os objectos. Os tubos piézoresistivos estão disponíveis comercialmente. Também aqui se usou um módulo de pré-processamento (neste caso incorporado no sensor que tem 2cm de espessura) capaz de transmitir a informação serie a uma velocidade de 1 Mbits/seg por sensor. A um nível mais elevado existe um processador de informação táctil constituído por um MC68000 e um processador de sinal TMS-32010. O sensor categoriza a resistência num de oito níveis (equivalente a uma resolução de três bits) o que parece ser pouco.

Para reduzir o "cross talk" entre os taxels foi usada uma técnica para manter todas as colunas não seleccionadas ao mesmo potencial - tentando desta forma eliminar caminhos indesejáveis para a corrente eléctrica.

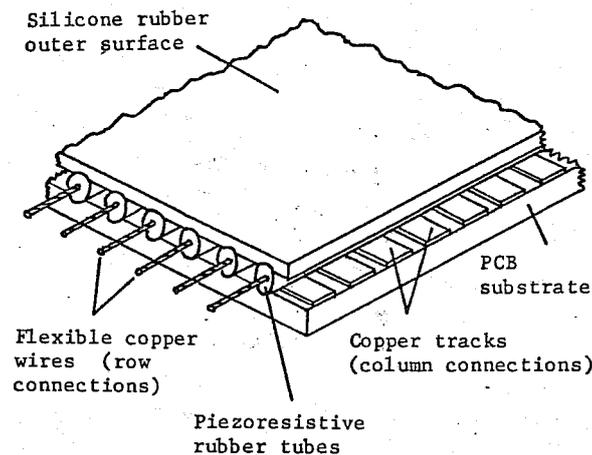


Figura 26: Constituição do sensor de piézo-resistivo.

Al-Mohammad et al [16] construíram um sensor de tacto com 16x16 taxels espaçados de 1,1 mm e muito semelhante ao anterior. O sensor é composto por uma placa de circuito impresso flexível onde se imprimiram finos condutores paralelos. Por baixo e na perpendicular encontram-se varias faixas de material sensível á pressão que assentam uma a uma em pistas de um circuito impresso rígido (fig.27). Novamente, usaram-se aqui técnicas para reduzir o "cross talk". O sensor dispõe de um processador local (fig.28), constituído por um Intel 8086, que tem como funções a aquisição, filtragem e transmissão dos dados, através de uma porta série, para um computador.

O sensor de tacto apresentado por Brussel et al [17] é constituído por uma camada de material piézoresistivo que abrange toda a área do sensor e assenta sobre um circuito impresso de

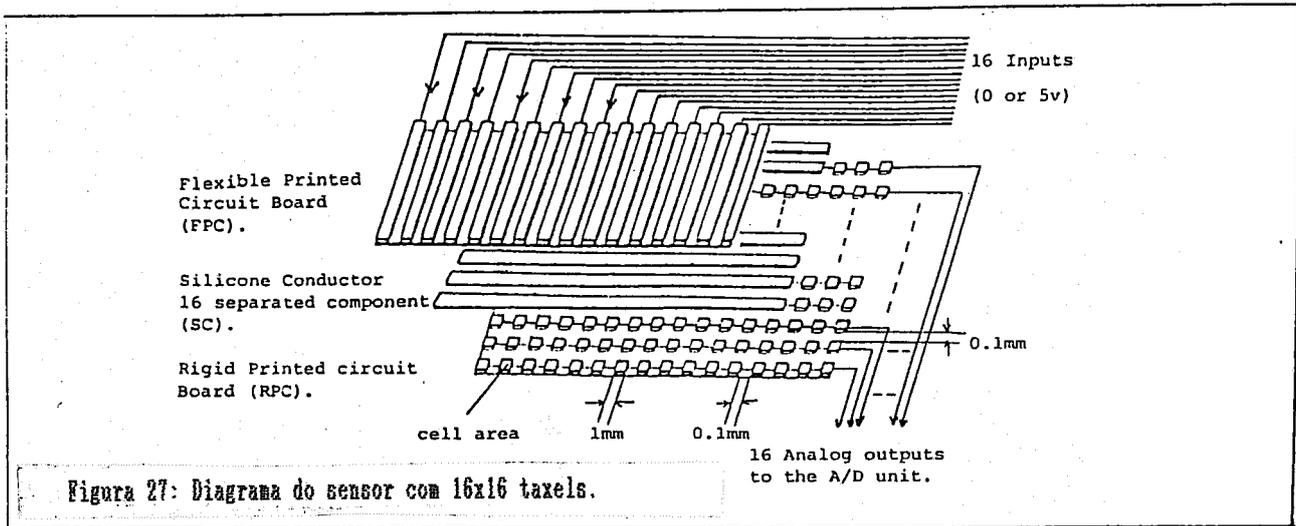


Figura 27: Diagrama do sensor com 16x16 taxels.

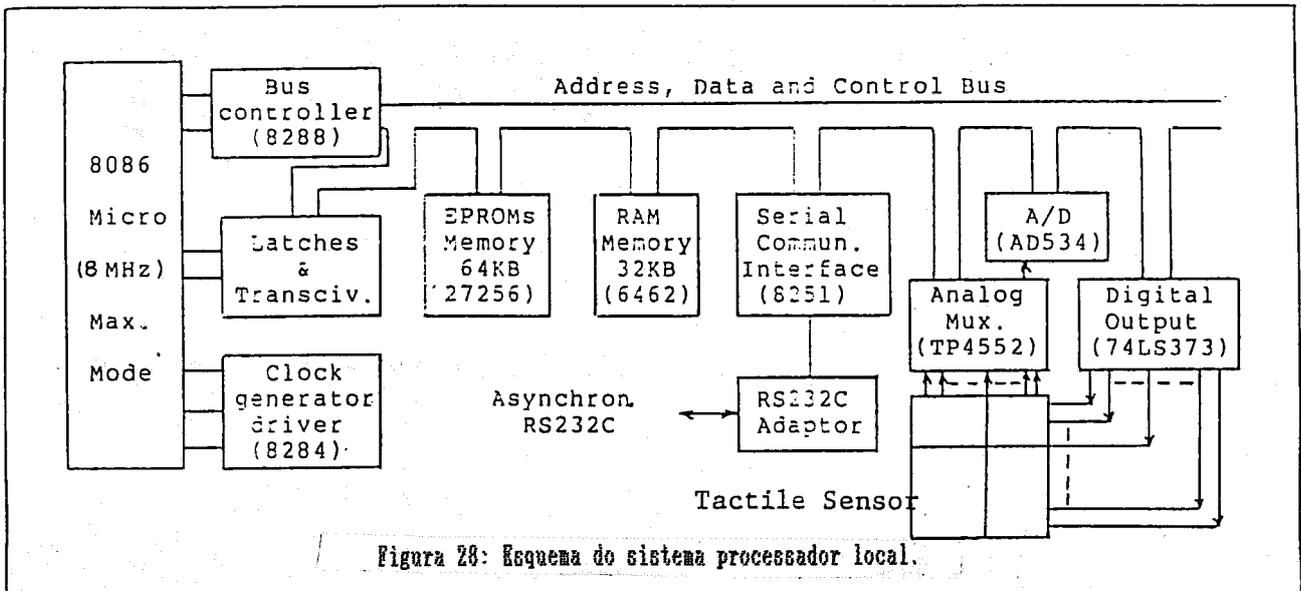


Figura 28: Esquema do sistema processador local.

dupla face (figs. 29 e 30). Ao contrário do ultimo sensor de tacto que descrevemos, neste sensor, ambos os terminais da resistência que existe em cada taxel estão do mesmo lado do material piézoresistivo. Este material é a borracha CS57-7RSC da Yokohama Rubber Company. As principais características desta borracha são descritas na ref.17.

A fig. 29 esquematiza o circuito impresso. As linhas e as colunas são pistas de cobre perpendiculares situadas em faces opostas deste circuito. Entre cada par de linhas existe uma série de contactos (também imprimidos) que são um dos terminais das várias resistências. Estes contactos são ligados ás várias

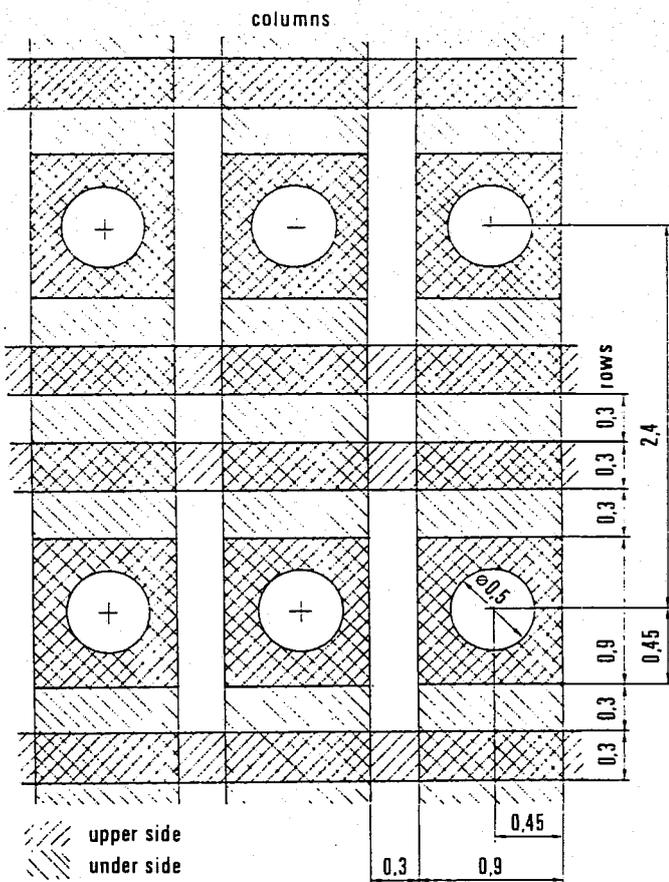


Figura 29: Representação do circuito impresso de dupla face que faz parte do sensor.

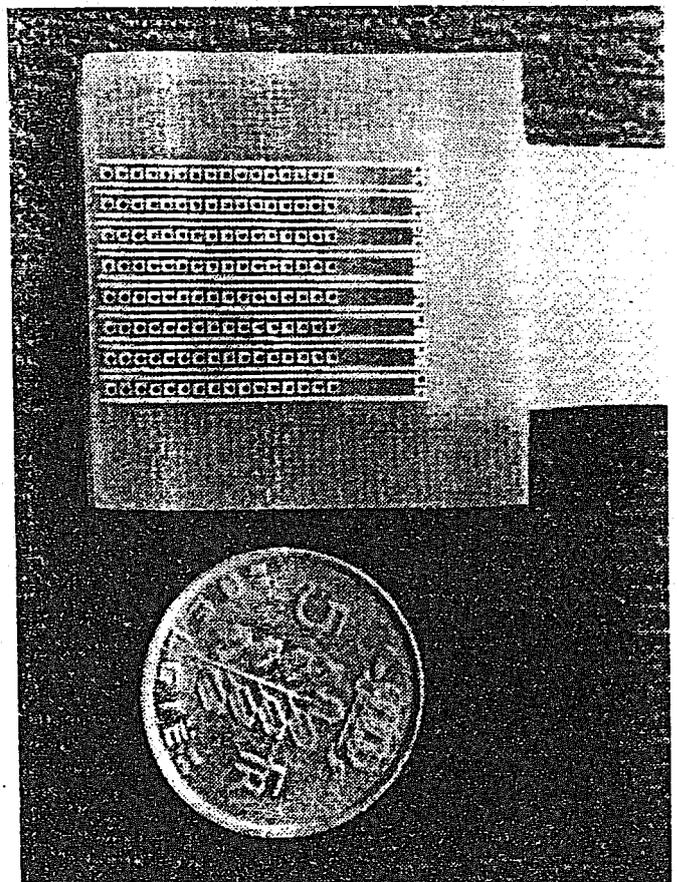


Figura 30: Fotografia do circuito impresso de dupla face.

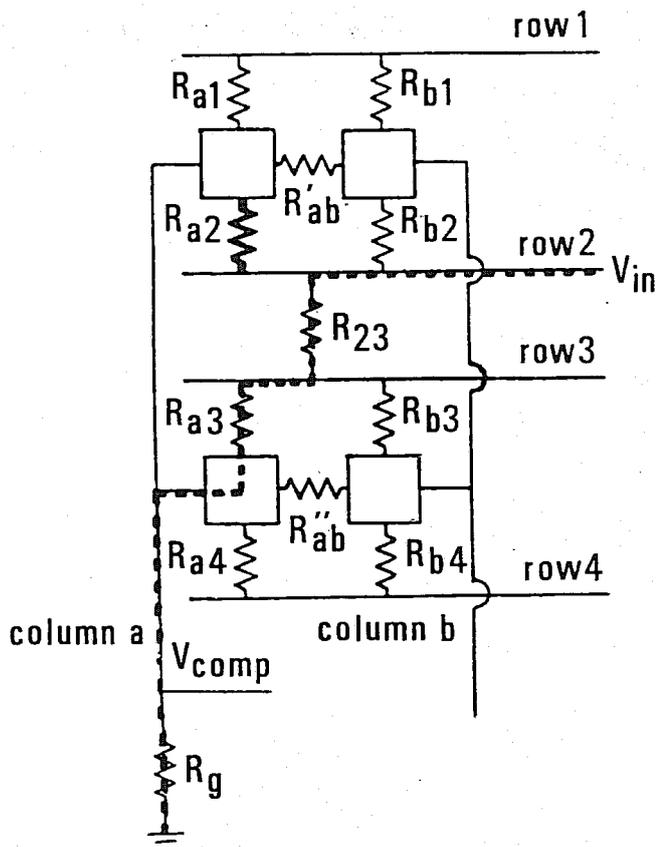


Figura 31: Exemplo de uma trajectória indesejável (a tracejado) para a corrente eléctrica (quando está seleccionada a cela da linha 2 e coluna a).

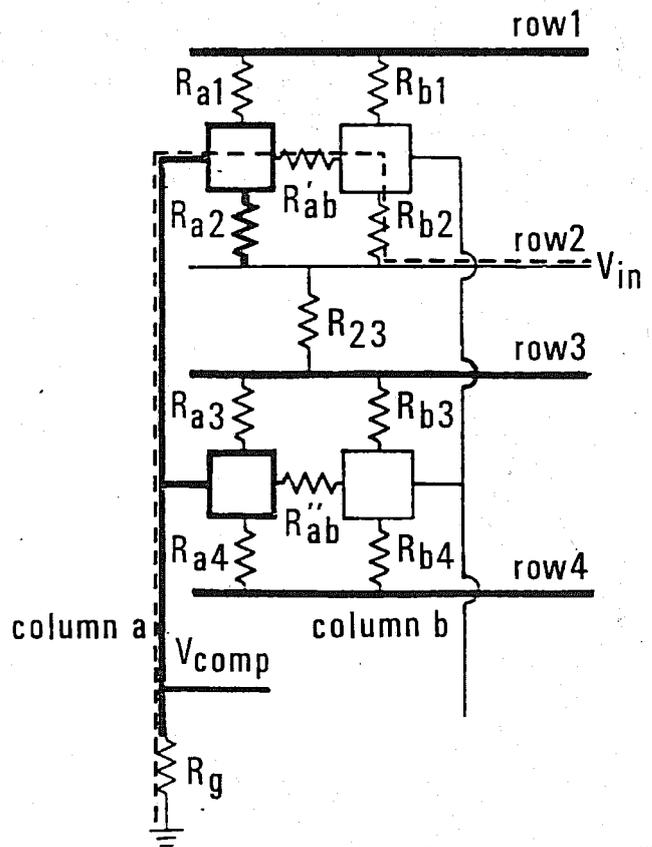


Figura 32: Trajectória indesejável (quando está seleccionada a cela da linha 2 e coluna a) para a corrente eléctrica mesmo após todas as linhas não seleccionadas estarem ao potencial  $V_{comp}$ . Para evitar isto, todas as colunas são também ligadas ao potencial  $V_{comp}$ .

colunas por metalização dos furos da placa que existem no seu centro.

A electrónica de varrimento é feita de modo a que a resistência do taxel seleccionado, forme com  $R_g$  (figs. 31 e 32) um divisor de tensão o que permite traduzir a pressão aplicada na tensão  $V_{comp}$ .

Como o material transdutor de pressão assenta sobre todos os terminais das resistências, para eliminar o "cross talk", também aqui, é essencial que a corrente não circule por caminhos indesejáveis (figs. 31 e 32). Para conseguir este objectivo tomam-se duas precauções. Primeiro colocam-se, com o auxílio do circuito electrónico ilustrado na fig.33, todas as linhas não seleccionadas e todas as colunas ao potencial  $V_{comp}$  (figs. 31 e 32). Em segundo lugar cobre-se a camada piézoresistiva com uma camada isoladora para evitar trajectórias de perda que passem por objectos conductores em contacto com o sensor.

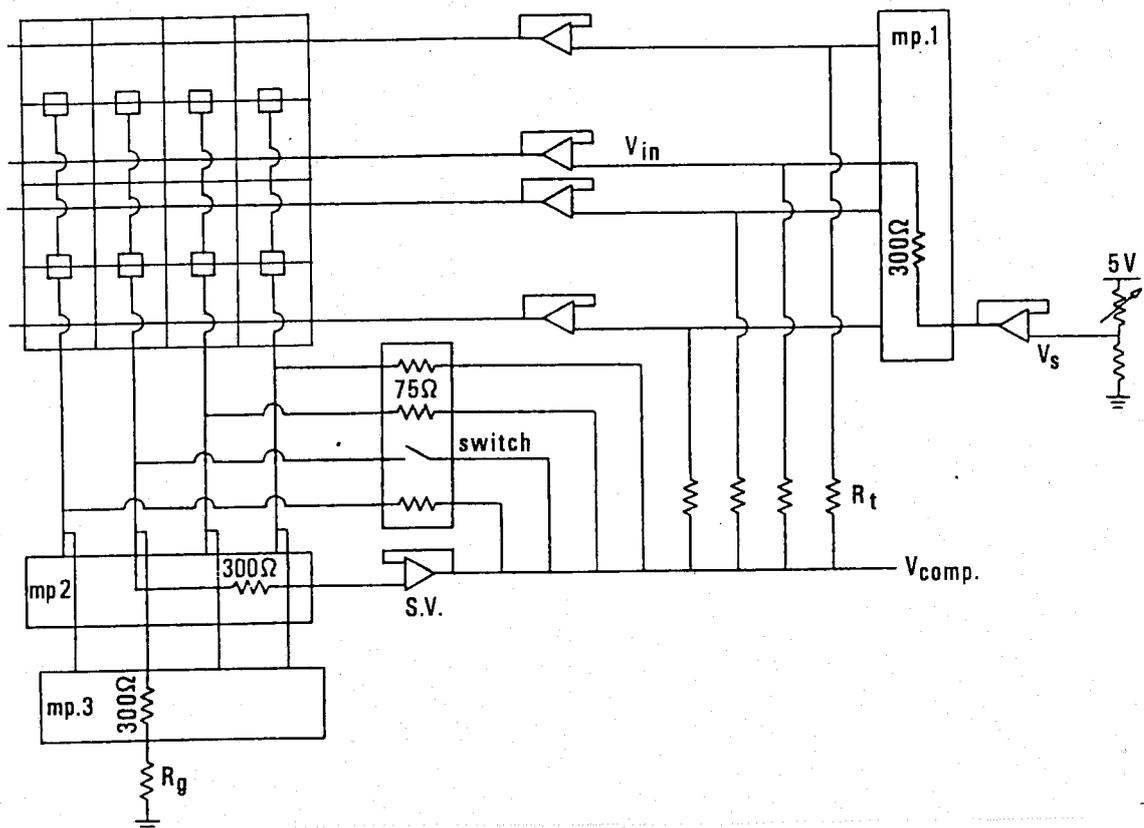


Figura 33: Circuito de realimentação simplificado para o caso de um sensor com 4x4 taxels.

Brussel et al usavam a tensão  $V_{comp}$  de duas maneiras. A

primeira era obter uma imagem binária do objecto pela comparação de  $V_{comp}$  com uma tensão fixa. A segunda era converter  $V_{comp}$  para uma forma digital de 8 bits. Neste ultimo caso o tempo de um varrimento completo do sensor era de 75 ms.

Através da variação da resistência  $R_g$  (fig.33) podem-se escolher várias gamas de força. Este tipo de sensores pode também ser feito com outras geometrias desde que o suporte tenha a forma requerida. O sensor poderia até ser flexível se o suporte dos contactos o fosse e estivesse bem ligado á borracha piezoresistiva, podendo assim adaptar-se aos objectos agarrados se tal fosse necessário.

A simplicidade de construção deste sensor, que é basicamente uma camada de borracha sobreposta a um circuito impresso, torna-o bastante robusto, compacto e fiável. No entanto, se a constituição mecânica deste sensor é bastante mais simples que a dos dois ultimos que apresentamos, por outro a rede resistiva equivalente é mais complexa o que também torna o circuito electrónico destinado a evitar o "cross talk" mais complicado.

A borracha de silício [10] é um material elástico e facilmente moldavel, foi usado, com as mais variadas funções, em grande parte dos sensores de tacto apresentados na literatura. Estas funções vão desde simultaneamente meio elástico e dieléctrico em sensores capacitivos [1] até material de encapsulamento e outras. Este material está disponível numa forma de alta viscosidade, e com aplicador, o que o torna indicado para o enchimento de pequenos moldes.

## 5. CONCLUSÃO

Com este estudo não pretendemos ser exaustivos, mas antes, tentaram-se abordar as principais técnicas com as quais se se têm tentado construir sensores de tacto.

Os sensores de tacto capacitivos são de construção problemática mormente na protecção a interferências electromagnéticas exteriores, ás quais são bastante sensíveis.

Os sensores ópticos são os mais imunes ás interferências electromagnéticas e poder-se-ão possivelmente atingir com eles boas densidades de taxels, são no entanto de difícil construção.

Os sensores de tacto piezoresistivos são de fácil construção.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Segue-se uma lista de bibliografia relativa a sensores de tacto. Muita desta literatura trás bibliografia adicional.

[1] D. M. Siegel, S. M. Drucker, I. Garabieta; "Performance Analysis of a Tactile Sensor"; Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (Raleigh, NC, Mar. 1987); pp.1493-1499.

[2] R. Q. Yang, M. W. Siegel; "A Sorting System Using a Very High Resolution Optical Sensor Array in Robot Fingertips"; Carnegie-Mellon University; 1986

[3] J. B. Schoenwald, A. W. Thiele, D. E. Gjellum; "A Novel Fiber Optic Tactile Array Sensor"; Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation" (Raleigh, NC, Mar. 1987); pp. 1792-1797.

[4] S. Begaj; "Planar and Finger-Shaped Optical Tactile Sensors for Robotics Application"; IEEE Journal of Robotics and Automation; vol.4, no.5, Oct.1988; pp.472-484.

[5] R. Ristic, B. Benhabib, A. A. Goldenberg; " Analysis and Design of a Modular Electrooptical Tactile Sensor"; IEEE Trans. on Robotics and Automation; vol.5, no.3, Jun. 1989; pp. 362-368.

[6] R. A. Russel; "Compliant-Skin Tactile Sensor"; Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation" (Raleigh, NC, Mar. 1987); pp. 1645-1648.

[7] A. Lauber, B. Sandell, P. Holmbom, O. Pedersen; "Tactile Sensors for Industrial Robots"; Sensor Review, 8(2), Abr. 1988; pp. 84-88.

[8] N. Ghani, Z. G. Rzepczynsky; "A Tactile Sensing System for Robotics"; Int. Conf. on Intelligent Autonomous Systems, Amsterdão 1986; pp. 241-245.

[9] N. Ghani; "Visual and Tactile Senses in Collaboration"; Sensor Review, 8(4), Oct. 1988; pp. 210-215.

[10] J. B. C. Davies; NATO ASI Series, vol. F52, Sensor Devices and Systems for Robotics, Springer-Verlag, 1989.

(\*)[11] L. D. Harmon; "Automated Tactile Sensing"; Int. J. Robotics Research; vol.1, no.2, verão de 1982; pp.3.32.

(\*)[12] P. Dario, A. Bicchi, F. Vivaldi, P. C. Pinotti; "Tendon Actuated Exploratory Finger With Polimeric Skin-like Tactile Sensor"; Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (St.Louis, MO, 1985); pp. 701-706.

(\*)[13] P. Dario, M. Bergamasco, D. Femi, A. Fiorillo, A. Vaccarelli; "Tactile Perception in Unstructured Environments: A Case Study for Rehabilitative Robotic Applications"; Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation" (Raleigh, NC, Mar. 1987); pp. 2047-2054.

(\*)[14] R. S. Fearing, A. Rise, T. O. Binford; "A Tactile Sensing Finger Tip for a Dexterous Robot"; Proc. Intelligent

Robots and Computer Vision Conf. (Cambridge, MA, Oct. 1986); pp.378-387.

(\*)[15] R. S. Fearing; "Some Experiments With Tactile Sensing During Grasping"; Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation" (Raleigh, NC, Mar. 1987); pp. 1637-1643.

[16] H. A. Al-Mohammad e M. Al-Mouhamed; "Identification of Object Faces by a Tactile Sensor"; Proc. 8th Int. Conf. on Automated Inspection and Product Control, 1987; IFS Publications, UK; pp. 97-108.

[17] H. van Brussel e H. Belien; "A High Resolution Tactile Sensor for Part Recognition"; Proc. 6th Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls: RoViSeC 6, Paris, França, 1986; IFS Publications, UK; pp.49-59.

(\*) Literatura não revista - mas possivelmente com interesse.