

## 5 Análises dos resultados

Neste capítulo é apresentado o sensor de deslocamento. São discutidos os resultados dos testes para diferentes geometrias de TX na presença de um gradiente de campo, usando para isto dois tipos de extensômetros: rede de Bragg e strain gauge.

### 5.1. O sensor de deslocamento

Todos os testes e análises realizados para o sensor de deslocamento são para a situação onde desejamos monitorar pequenos deslocamentos de algum componente ou estrutura que deve permanecer fixa. O sensor de deslocamento tem duas partes como se ilustra na Fig. 5.1, a primeira é um ímã que fará o papel de cursor e que será colado no componente para o qual queremos medir o deslocamento. A segunda parte fixa consistirá do GMM e do extensômetro.

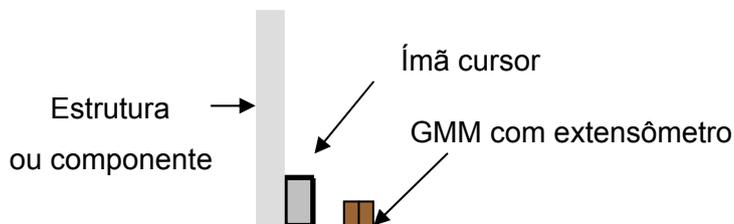


Figura 5.1: Sensor de deslocamento.

Na figura seguinte estão as possíveis situações em que se pode medir deslocamento com nosso sensor. Todos estes deslocamentos provocariam o deslocamento do ímã e a conseqüente variação no campo magnético na posição do GMM, portanto seriam passíveis de serem medidos. Entretanto, a montagem experimental só nos permitiu avaliar a translação horizontal ilustrada em (b). Note que o cursor não fará contacto com o elemento sensor.

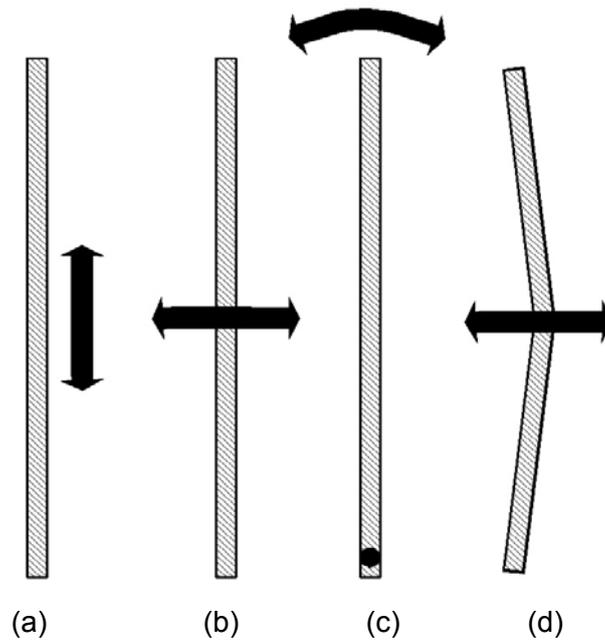


Figura 5.2: Deslocamentos que podem ser detectados com o sensor de deslocamento (a) translação vertical, (b) translação horizontal, (c) rotação e (d) flexão.

Como será detalhada adiante, a resposta do sensor de deslocamento varia conforme diversos parâmetros: geometria do GMM, polarização magnética, pressão, etc. Na figura seguinte está ilustrado a melhor e a pior resposta obtida, em termos de deformação máxima dos diferentes cubóides testados, isto para uma mesma variação do campo magnético na posição do GMM. Para a maior resposta que corresponde ao TX 2x2x10 mm a sensibilidade é de  $65 \mu\epsilon/\text{mm}$ , e para pior resposta que foi observada no cubóide de geometria 4x4x3 mm se tem uma sensibilidade de  $45 \mu\epsilon/\text{mm}$ .

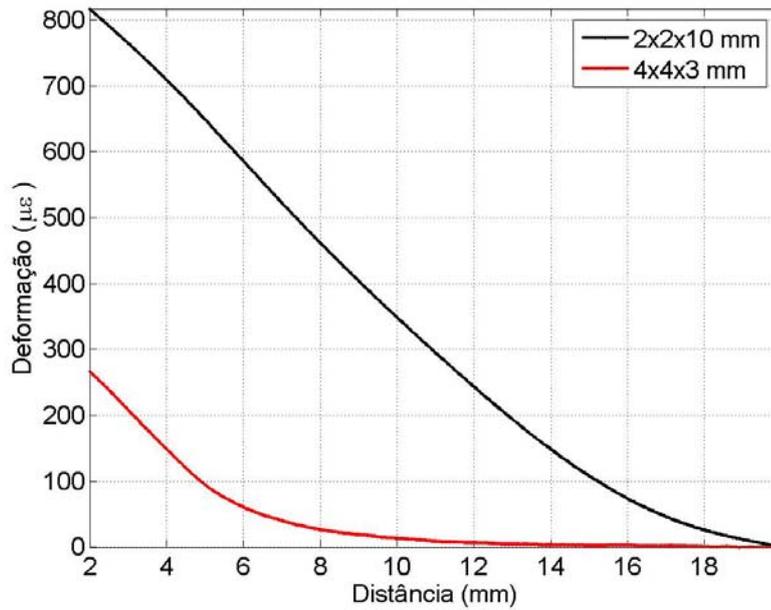


Figura 5.3: Cubóides de maior e menor resposta.

A resposta do sensor será analisada basicamente por dois parâmetros: sensibilidade e faixa dinâmica. A sensibilidade será a razão da deformação pelo deslocamento correspondente. Iremos definir a faixa dinâmica como a máxima distância entre o ímã cursor e o GMM para a qual a sensibilidade a 5 mm de distância entre o ímã e o cubóide varia de 10%. Para o cubóide 4x4x3 mm tem-se que a faixa dinâmica é de 1 mm, para o cubóide de 2x2x10 mm esta faixa é de 8 mm aproximadamente, ou seja, para este último, o mesmo sensor pode ser utilizado com aproximadamente a mesma sensibilidade para as distâncias de 2 mm até 10 mm do componente que se deseja medir o deslocamento.

A Fig. 5.4 mostra a resposta para variações do cursor ( $\pm 500\mu\text{m}$ ) em torno de uma distância inicial de 5 mm entre o cursor e o GMM. Para esta distância inicial, o valor do campo magnético aplicado na face do cubóide corresponde a 190 mT, e o gradiente corresponde a 22 mT/mm. Para cada passo de 50  $\mu\text{m}$  se obteve um erro médio quadrático de 0.14  $\mu\epsilon$ . O cubóide utilizado para este caso foi o TX 2x2x10 mm.

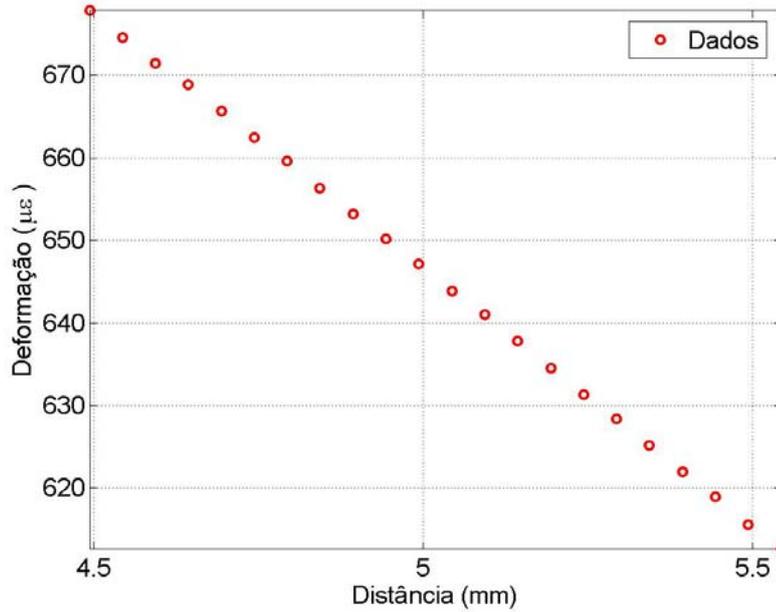


Figura 5.4: Resposta do TX 2x2x10 mm, em torno de uma distância de 5mm.

Para a obtenção da curva de calibração do sensor de deslocamento, trocamos os eixos com mostrado na Fig. 5.5 onde temos o gráfico do deslocamento em função da deformação, a seguir ajustamos a curva de calibração.

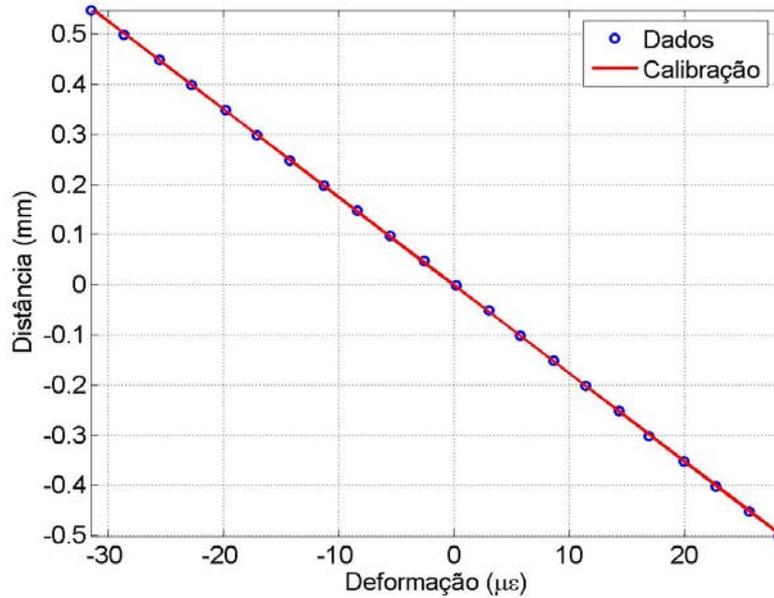


Figura 5.5: Curva de calibração do sensor de deslocamento.

O ajuste, linear para este caso, nos permite obter o deslocamento em função da deformação medida.

$$d(e) = -0.0175 e \quad (5.1)$$

Onde  $e$  é a deformação em  $\mu\epsilon$  medida pelo extensômetro e  $d$  é o deslocamento em milímetros que desejamos determinar. A incerteza média da curva de calibração é de aproximadamente  $3.3 \mu\text{m}$ , calculada pela expressão [28]:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N [d_i - d(\Delta l/l)]^2} \quad (5.2)$$

onde  $N$  é o número de medidas, que neste caso é de 22.

## 5.2. Comparação dos extensômetros

Inicialmente testou-se cada TX medindo a sua deformação ao aplicar um gradiente de campo provocado pelo ímã descrito no capítulo anterior. A distância máxima utilizada entre as faces do ímã e do cubóide foi de 20 mm, e a distância mínima foi de 2 mm, devido à restrições na montagem experimental.

As medidas foram feitas com strain gauge e com FBG observando uma semelhança nas medições como se apresenta na referência [25]. Tanto a rede como o strain gauge foram colados num mesmo cubóide a uma distância com relação a face que está mais próxima ao ímã de aproximadamente 4 mm. Comparou-se estas medidas e observou-se que as respostas eram praticamente as mesmas, como pode ser visto na Fig. 5.6 a medição com strain gauge foi feita utilizando uma média com 10 pontos e a medida com FBG foi feita com uma média de 3 pontos. Nestas condições a medida com strain gauge apresentou-se menos ruidosa que a medida utilizando a FBG.

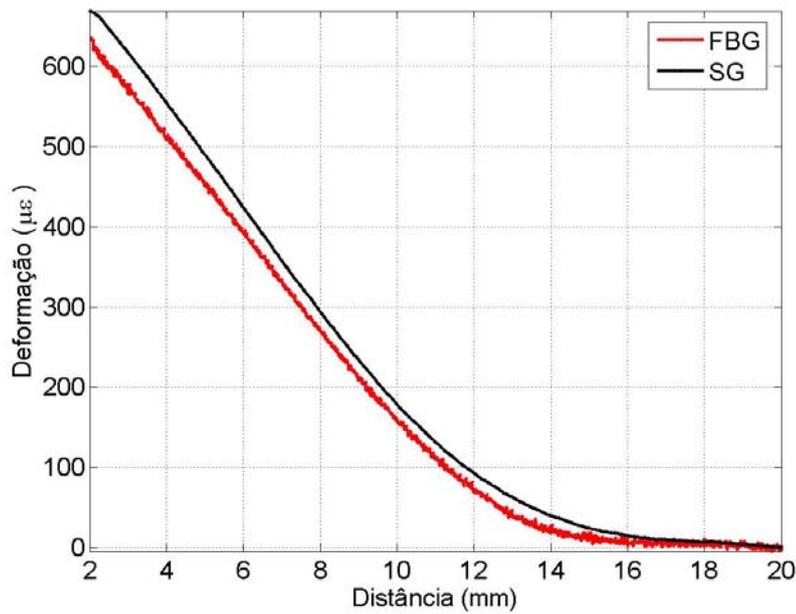


Figura 5.6: Rede de Bragg e Strain gauge coladas no cubóide 4x4x20 mm.

### 5.3. Desmagnetização prévia

Ao iniciar a medida o TX era desmagnetizado observando qual era a resposta. Notou-se uma variação do valor máximo da deformação nas mesmas condições de medida, para quando o procedimento de desmagnetização era repetido, isto acontecia ao utilizarmos um desmagnetizador do tipo usado para fitas cassete. Utilizou-se, depois um outro desmagnetizador que gerava um campo máximo de 0.03 T rms na região do cubóide, com o qual se constatou uma melhor reprodução das medições.

Explorou-se também o que acontecia com a deformação máxima sem desmagnetizar o cubóide, como está ilustrado na Fig. 5.7 para as situações de desmagnetizado (D) e sem desmagnetizar (SD). Observou-se que o valor máximo da deformação e a faixa linear diminuíam para o segundo caso. Contudo, pode ser notado também que a inclinação da parte linear, ou seja, a sensibilidade do sensor nos dois casos é semelhante.

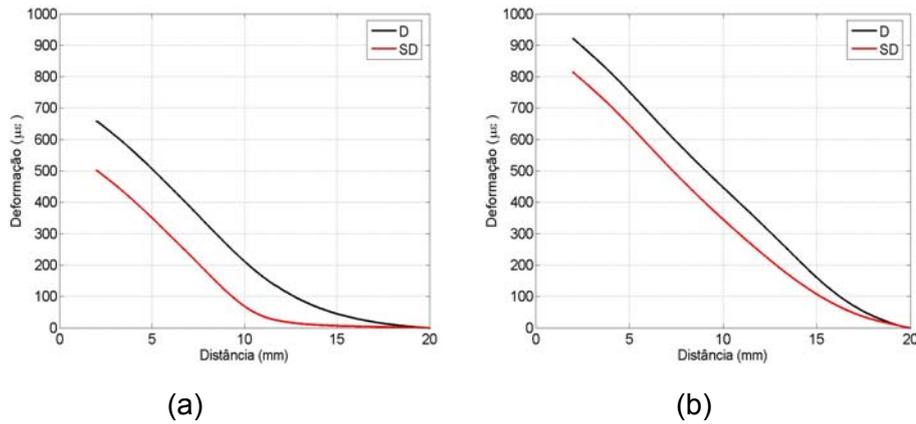


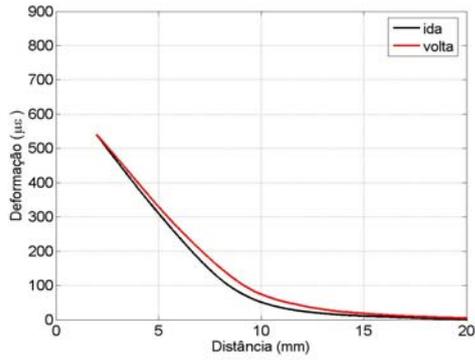
Figura 5.7: Cubóides desmagnetizados(D), e sem desmagnetizar (S.D). (a) TX de geometria 4x4x10, (b) TX de geometria 2x2x10.

No caso do TX 4x4x10 mm desmagnetizado a sensibilidade é de  $57.4 \mu\text{e}/\text{mm}$  e sem desmagnetizar de  $57.0 \mu\text{e}/\text{mm}$ . Note que a diferença entre as sensibilidades é mínima. No caso do TX de geometria 2x2x10 mm sem desmagnetizar a sensibilidade é  $63.0 \mu\text{e}/\text{mm}$ , no caso desmagnetizado a sensibilidade é de  $62.1 \mu\text{e}/\text{mm}$ . Optou-se, portanto em não desmagnetizar os cubóides antes de cada medida. A não utilização deste procedimento simplificaria em muito a utilização em campo do sensor.

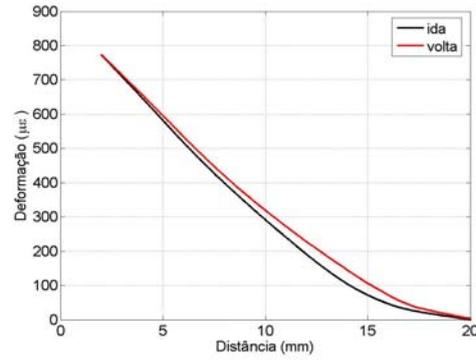
#### 5.4. Histerese

Devido às características ferromagnéticas do GMM ele apresenta uma histerese na sua deformação para quando o cursor se aproxima e quando ele se afasta do cubóide. Denominou-se ida para o trajeto quando o ímã se aproxima do cubóide, e volta para quando o ímã se afasta deste. Nestas duas situações verificou-se uma variação da sensibilidade, como exemplo o caso do TX 4x4x10 mm a sensibilidade diminuiu 5% para a volta com relação ao percurso de ida. Ou seja, com este cubóide o sensor é um pouco mais sensível para um deslocamento que leva a uma aproximação do que para um deslocamento que resulta em um afastamento.

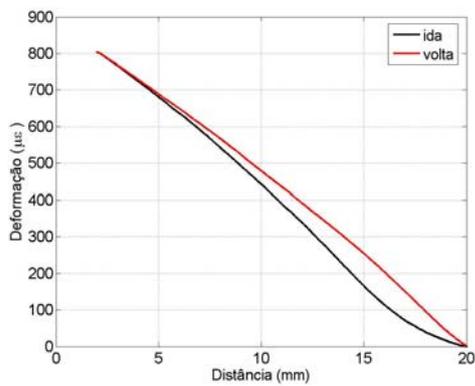
A Fig. 5.8 apresenta o comportamento dos percursos de ida e volta para distintos cubóides de diferente geometria, nos quais encontrou-se uma diferença no maior de 10% na sensibilidade no percurso de volta com relação á trajetória de ida.



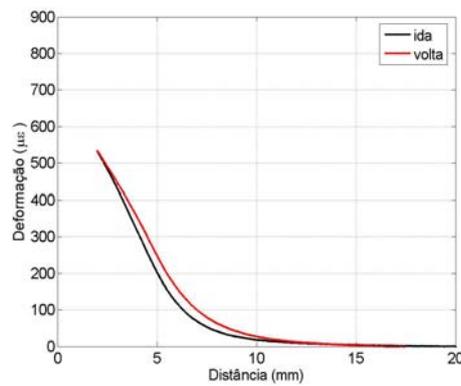
(a)



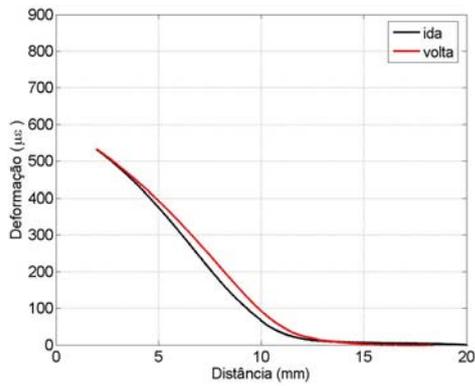
(b)



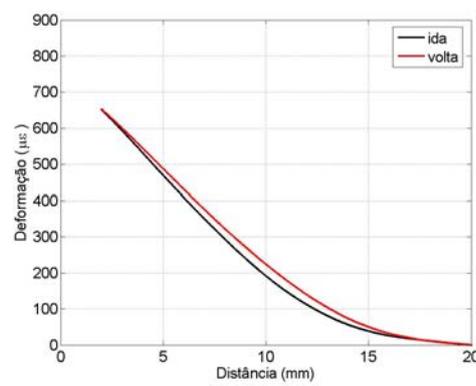
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.8: (a) TX de geometria 2x2x3 mm, (b) 2x2x6 mm, (c) 2x2x10 mm, (d) 4x4x mm, (e) 4x4x10 mm, (f) 4x4x20 mm.

Tendo em conta a finalidade do sensor foi analisada a histerese para o cubóide 2x2x10 mm na faixa de 1 mm em torno da distância de 5 mm com passo de 50 µm como se apresenta na figura 5.9; no percurso de ida a sensibilidade é

de  $57.0 \mu\epsilon/\text{mm}$  e na volta a sensibilidade é de  $57.2 \mu\epsilon/\text{mm}$  e resolução por  $\mu\epsilon$  de  $17.4 \mu\text{m}$ .

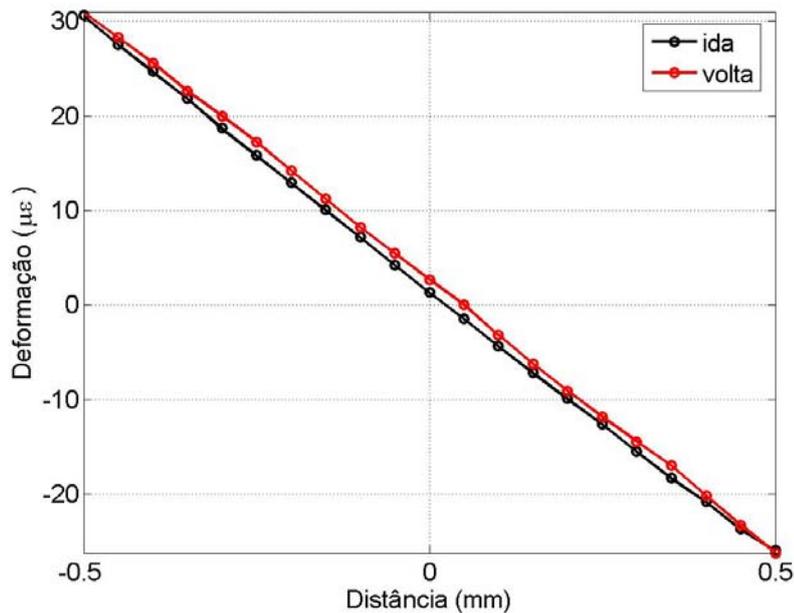


Figura 5.9: Histerese na faixa de 1mm para o cubóide 2x2x10 mm.

## 5.5. Polarização

Em algumas situações pode ser vantajosa a colocação de um segundo ímã menor, junto ao cubóide fixo com o fim de deslocar o ponto de operação do sensor para uma posição de maior sensibilidade para a mesma distância ao elemento cursor [21]. A colocação deste ímã foi chamada de polarização. Como se observa na Fig. 5.10 o ímã que produz o gradiente de campo move-se com relação ao conjunto do GMM e o ímã de polarização; cada ímã foi colocado no eixo central com relação ao cubóide. Para observar o efeito da polarização em cada cubóide testou-se com dois ímãs permanentes cilíndricos de NdFeB, o primeiro com diâmetro de 3.3 mm e comprimento de 1.6 mm que produz um campo de 100 mT na sua face, o segundo ímã de 3.1 mm de diâmetro e 2.5 mm de comprimento com um campo de 90 mT na sua face.

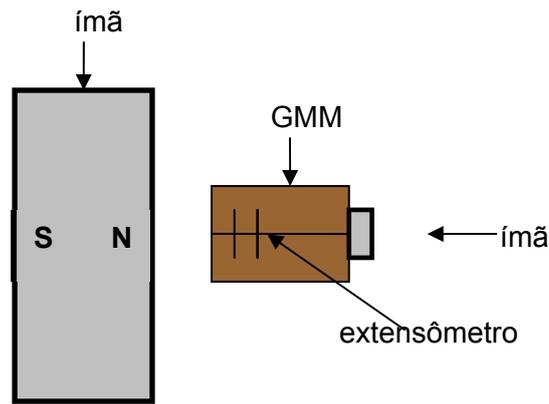


Figura 5.10: Representação esquemática da polarização.

Para a geometria de TX 4x4x10 mm na Fig. 5.11, o primeiro ímã produz uma polarização P1 obtendo-se uma sensibilidade de 61.5  $\mu\epsilon/\text{mm}$ . O segundo ímã aplicou a polarização P2 levando a uma sensibilidade igual a 68.0  $\mu\epsilon/\text{mm}$ . Nota-se que a colocação dos dois ímãs de polarização causam uma variação no valor da deformação máxima e na sensibilidade em relação à medida sem polarizar. A sensibilidade teve um aumento de cerca de 10% para P1 e 20% para P2, mas a faixa dinâmica ficou a mesma, aproximadamente 4 mm nos três casos.

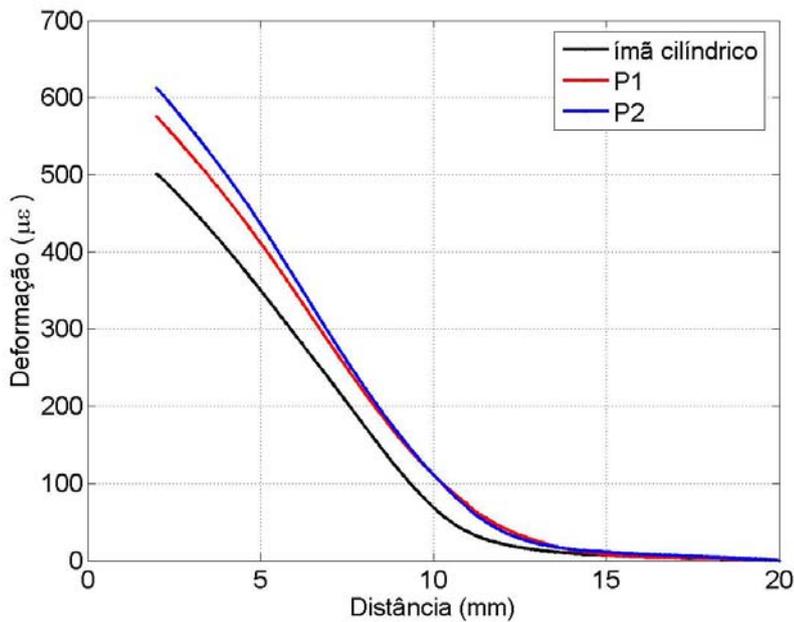


Figura 5.11: Cubóide com duas polarizações diferentes.

Para a otimização do valor do campo de polarização teríamos que colocar um ímã maior e com uma distância variável ao cubóide que seria ajustada conforme cada caso.

## 5.6. Tensão compressiva

Aplicou-se também uma pressão de tensão compressiva no cubóide 4x4x10 mm. A pressão compressiva foi aplicada ao longo da sua direção longitudinal. Para este caso o cubóide foi desmagnetizado antes de aplicar a pressão. A mola utilizada tem 37 mm de comprimento a qual quando comprimida de 3.8 mm produz uma força no cubóide de aproximadamente 13 N, realizando uma pressão de aproximadamente 0.8 MPa. A Fig. 5.12 ilustra a montagem utilizada neste teste, no qual o cubóide e a mola estão presos entre duas laminas de acrílico.

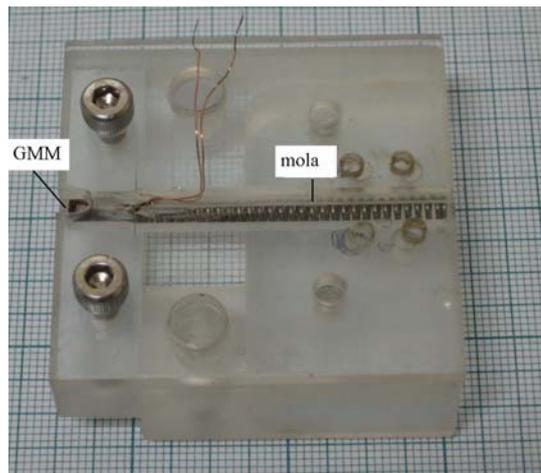


Figura 5.12. tensão compressiva sobre um cubóide de GMM.

Na Fig. 5.13 pode-se notar que ao aplicar a pressão compressora temos um aumento na deformação máxima, estes resultados são observados igualmente em [25,26]. A sensibilidade também aumentou de  $57 \mu\epsilon/\text{mm}$  para  $97 \mu\epsilon/\text{mm}$ , quer dizer um incremento de 70% com relação a sensibilidade sem pressão; a faixa dinâmica somente foi aumentada de aproximadamente 5%.

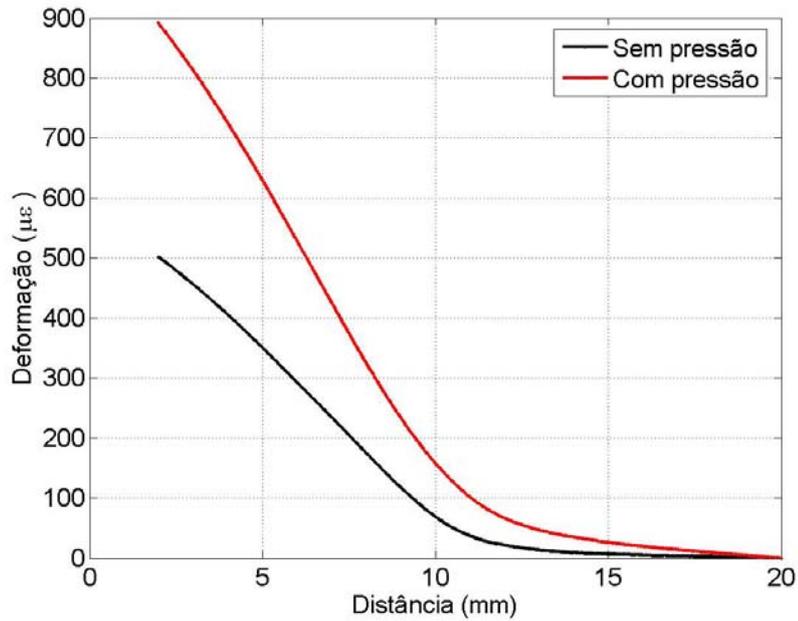


Figura 5.13: TX 4x4x10 mm no qual se aplica uma pressão compressiva.

### 5.7. Variação da geometria do ímã

Testou-se a mesma montagem colocando um outro ímã permanente de NdFeB de forma retangular com dimensões 40x20x10 mm, que produz um campo de 0.3 T na sua face. A Fig. 5.14 apresenta o comportamento deste ímã com relação ao ímã cilíndrico. Para a distância de 5 mm os gradientes de campo gerados pelos ímãs cilíndrico e retangular são semelhantes, tendo uma variação mais acentuada quanto a distância aumenta. Assim a 20 mm de distância o gradiente de campo gerado pelo ímã cilíndrico é de 35 mT/mm enquanto o gerado pela ímã retangular é de 50 mT/mm. Note que estes gradientes se dão entre valores de campos diferentes, ou seja o sensor vai estar num ponto de operação diferente.

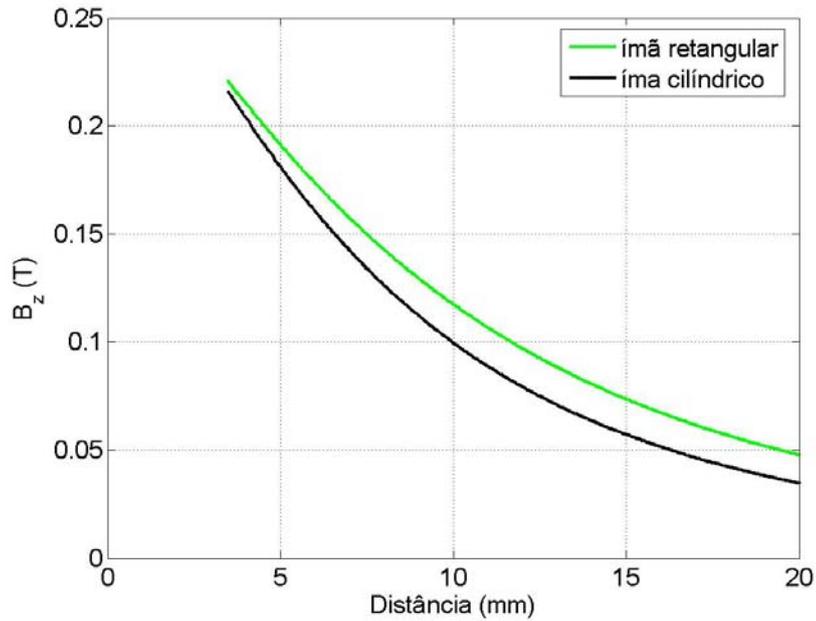


Figura 5.14: Em verde campo gerado pelo ímã retangular, em preto campo gerado pelo ímã cilíndrico.

Fazendo o teste com o ímã retangular, para o caso do TX 4x4x10 mm a sensibilidade medida foi de  $72.6 \mu\epsilon/\text{mm}$ . Com esta geometria se obtém um aumento na sensibilidade de aproximadamente 30%. O valor da deformação máxima aumentou em  $370 \mu\epsilon$  como pode se ver na Fig. 5.15. A faixa dinâmica aumentou-se de 4 mm para 8 mm, ou seja com esta geometria a faixa dinâmica aumenta 50% com relação a o ímã cilíndrico.

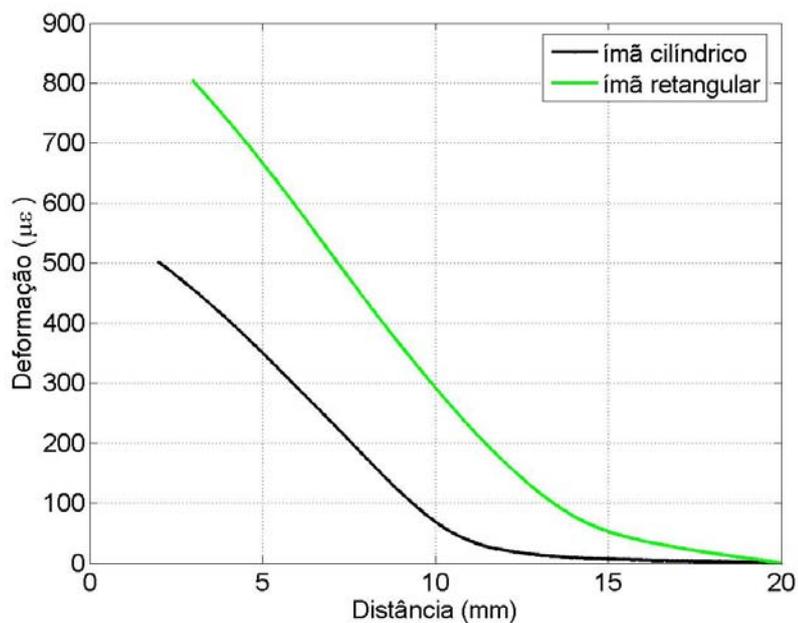


Figura 5.15: Variação da deformação com a distancia para um gradiente de campo produzido por um ímã retangular.

A Figura 5.16 apresenta para o mesmo cubóide com as mesmas condições, o que acontece para o TX 4x4x10 mm, quando a geometria do ímã cursor é alterada, quando foi aplicada polarização e pressão. Em termos de sensibilidade o maior efeito está na aplicação de pressão no GMM, embora o efeito do gradiente e da polarização tenham se mostrado interessantes. A aplicação da pressão tem a desvantagem da necessidade uma montagem mais complexa e mais robusta para o cubóide GMM.

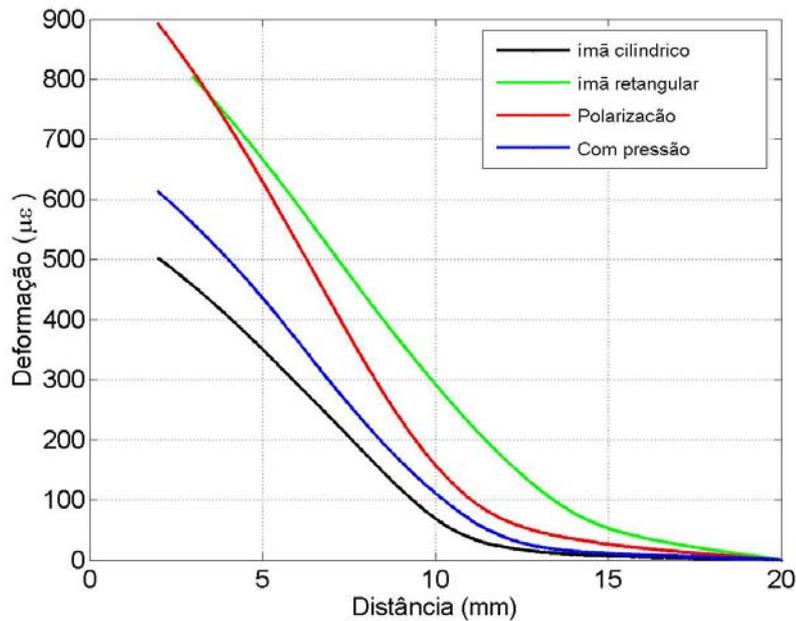


Figura 5.16: Variações do comportamento do cubóide com relação a polarização, gradiente de campo e pressão.

## 5.8. Comportamento das geometrias do TX

Ao fazer os testes com vários cubóides da mesma geometria observou-se que o valor da deformação máxima e a sensibilidade variavam. A Fig. 5.17 mostra a deformação de 10 cubóides de geometria 2x2x6 mm onde o valor máximo da deformação varia numa faixa de 593  $\mu\epsilon$  até 946  $\mu\epsilon$  e a sensibilidade varia de 55  $\mu\epsilon/\text{mm}$  até 69  $\mu\epsilon/\text{mm}$ .

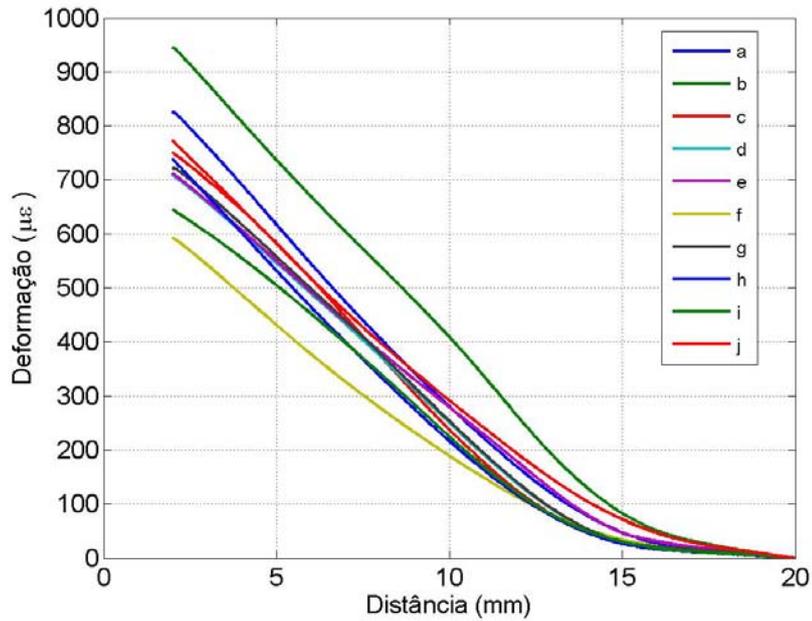


Figura 5.17: Comportamento de diferentes cubóides da geometria 2x2x6 mm.

Como se observa na figura anterior as 10 curvas apresentam respostas bem variadas. Contudo, a faixa dinâmica do sensor para os cubóides testados tem uma variação de 3 mm aproximadamente.

Na tabela 5.1 está resumido o comportamento das diferentes geometrias de cada cubóide aplicando o gradiente de campo com o ímã cilíndrico. O melhor caso de acordo com a caracterização significa que o cubóide apresentou o maior valor da deformação máxima. Na tabela 5.2 é mostrado o comportamento para o pior caso, de acordo com o critério anterior.

Tabela 5.1: Comportamento do melhor caso para cada geometria de GMM de acordo com a caracterização.

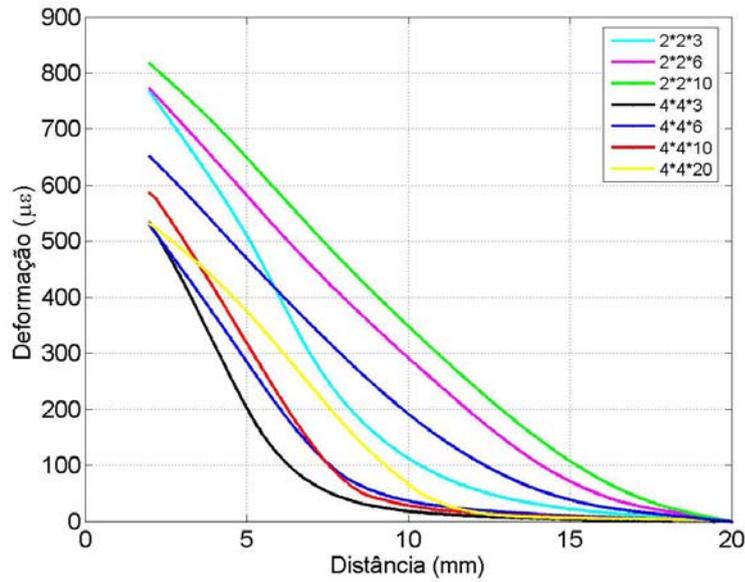
<b>Geometria</b>	<b>Sensibilidade (<math>\mu\epsilon/\text{mm}</math>)</b>	<b>Faixa dinâmica (mm)</b>	<b>Resolução (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
2x2x3	100	3.0-6.0	10
2x2x6	65	2.5-9.0	15
2x2x10	62	3.0-10	16
4x4x3	103	4.5-5.5	9
4x4x6	95	2.5-6.0	10
4x4x10	62	4.0-7.0	16
4x4x20	58	3.0-8.0	17

Tabela 5.2: Comportamento do pior caso para cada geometria de GMM de acordo com a caracterização.

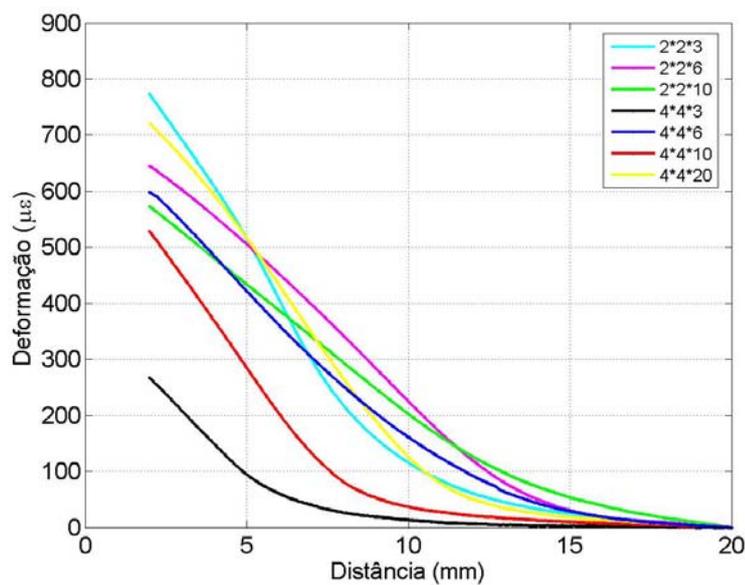
<b>Geometria</b>	<b>Sensibilidade (<math>\mu\epsilon/\text{mm}</math>)</b>	<b>Faixa dinâmica (mm)</b>	<b>Resolução (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
2x2x3	76	3.0-6.0	13
2x2x6	50	2.5-9.0	20
2x2x10	47	3.0-10	25
4x4x3	45	4.5-5.5	20
4x4x6	82	2.5-6.0	12
4x4x10	86	4.0-7.0	11
4x4x20	62	3.0-8.0	16

As Figuras 5.18 (a) e (b) mostram as curvas das diferentes geometrias mostradas nas tabelas anteriores para o melhor e o pior caso. Observa-se que

cada cubóide diferente, apresenta uma faixa de baixa deformação o mesmo acontece para a sensibilidade e deformação máxima. Não foi usada compressão, polarização e o ímã utilizado foi o cilíndrico.



(a)



(b)

Figura 5.18: Curvas dos cubóides de diferentes geometrias para: (a) caso de maior resposta, (b) caso de menor resposta.

Na Fig. 5.18 (a) note que os cubóides de menor comprimento tem as maiores sensibilidades ( $100 \mu\epsilon/\text{mm}$ ), mas as menores faixas dinâmicas, significando só podem ser utilizados nestas condições a até aproximadamente 5 mm do cursor; já os cubóides mais longos tem a sensibilidade reduzida mas podem ser utilizados à distancias maiores.

## 5.9 Magnetostrição localizada

Finalmente, para se determinar o efeito do gradiente do campo no cubóide foram colados extensômetros em diferentes regiões. Não se sabia se o cubóide experimentava como um todo uma deformação média ou se cada região do cubóide ao longo do gradiente de campo se deformava localmente. Neste teste foi colada uma única fibra óptica com 3 redes de Bragg nas distancias de 4 mm, 10 mm e 16 mm com relação à face do cubóide mais perto do ímã sensor. Os cubóides utilizados foram de geometrias 4x4x20 mm e 2x2x20 mm. A figura 5.19 mostra o espectro das 3 FBGs coladas no cubóide de 4x4x20 mm.

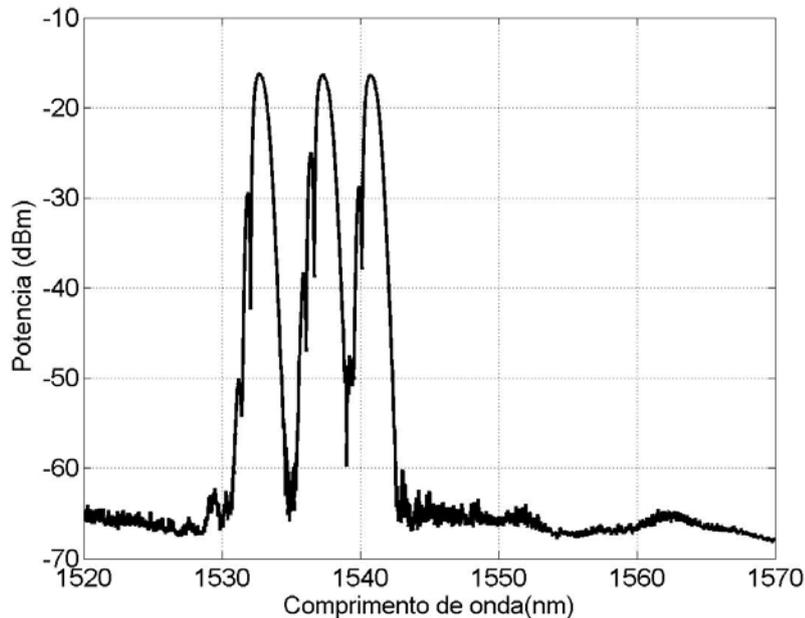


Figura 5.19: Espectro de três redes coladas no cubóide de 4x4x20 mm.

Nas figuras 5.20 (a) e (b) podemos observar que o comportamento nas diferentes regiões do cubóide é similar, apresentam uma queda abrupta na curva entre 12 e 14 mm aproximadamente nas três regiões. Entretanto, a sensibilidade

e a deformação máxima variam de forma importante, mostrando que o gradiente de campo tem um efeito localizado em cada região do cubóide.

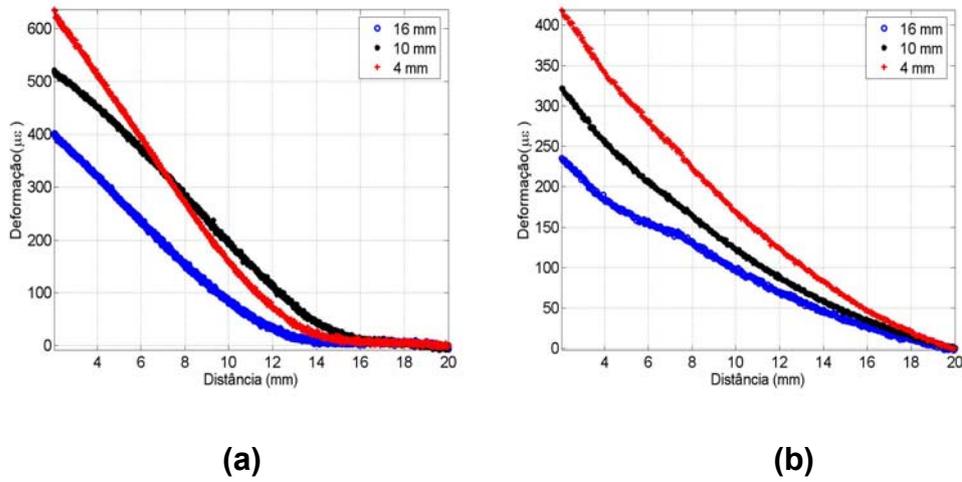


Figura 5.20: Redes coladas a diferentes distancias para (a) TX 2x2x20 mm, (b) 4x4x20 mm.

Note que o cubóide mais fino tem uma região de baixa deformação muito menor que o outro.