

4

Resultados e discussão

4.1

Análise das deformações dos ensaios de torção pura

4.1.1

Análise de Colmo 1

Foram feitos 5 ensaios de colmo 1: um com a seção fechada (sem fissuras, figura 4.7), e 4 com a seção aberta (fissurado 1 – colmo fissurado no meio entre as diafragmas (figura 4.9), fissurado 2 – a fissura foi prolongada até a próxima diafragma (figura 4.11), fissurado 3 e fissurado 4 (prolongação das fissuras até o colmo inteiro fique fissurado (figuras 4.13 e 4.15)). A distribuição dos Strain Gauges pelo colmo e as dimensões estão mostrados nas figuras 4.1 – 4.3.

Para eliminar ruído elétrico dos dados foi utilizado filtro digital *FIR* (anexo B) em MatLab.

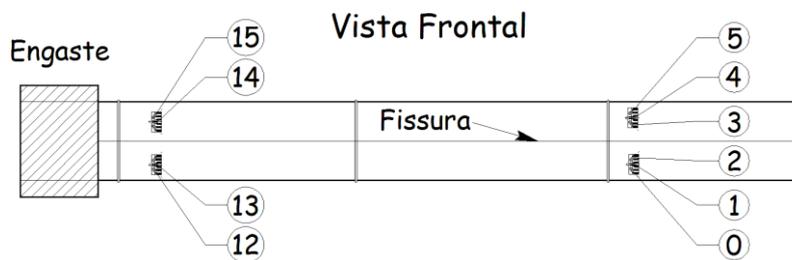


Figura 4.1 - Numeração dos Strain Gauges (Colmo 1, vista frontal)

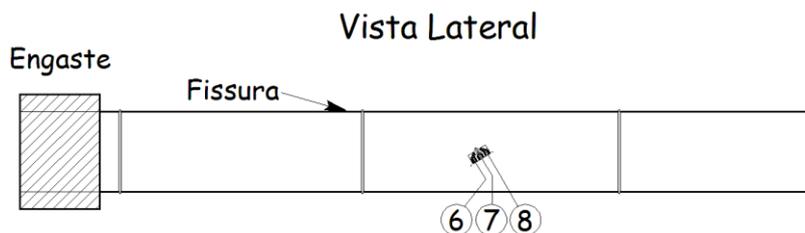


Figura 4.2 - Numeração dos Strain Gauges (Colmo 1, vista lateral)

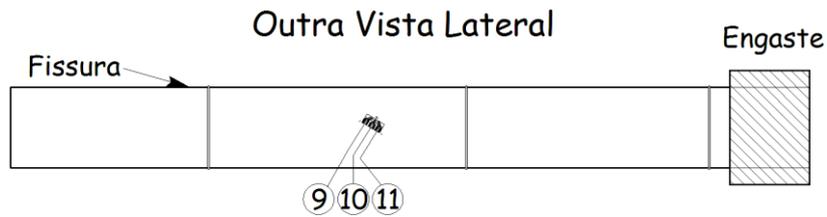


Figura 4.3 - Numeração dos Strain Gauges (Colmo 1, outra vista lateral)

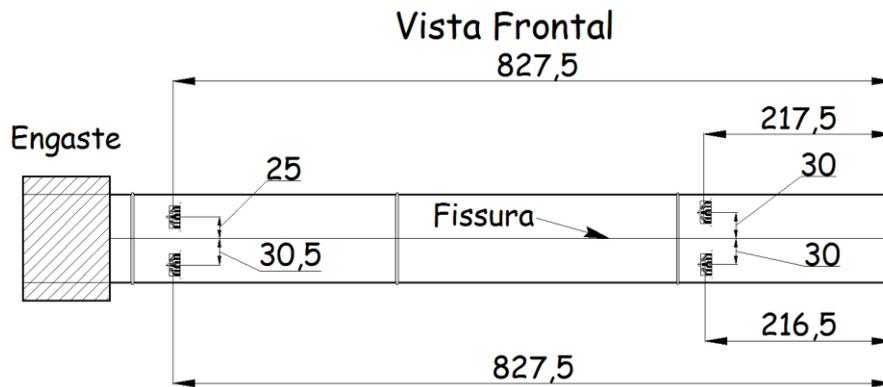


Figura 4.4 - Posição dos Strain Gauges (Colmo 1, vista frontal)

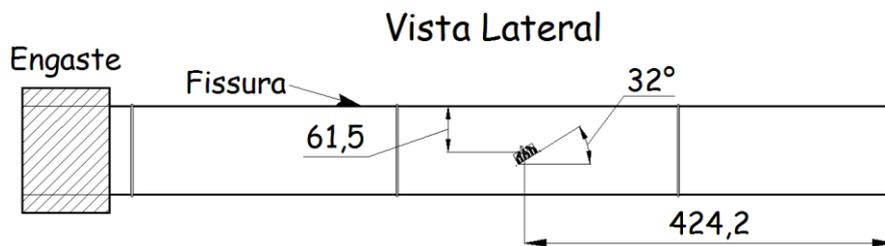


Figura 4.5 - Posição dos Strain Gauges (Colmo 1, vista lateral)

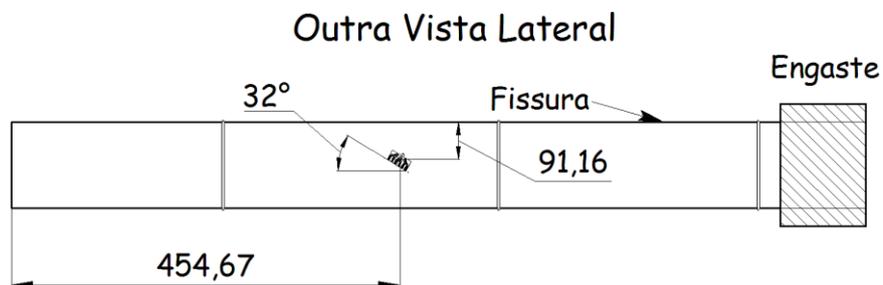


Figura 4.6 - Posição dos Strain Gauges (Colmo 1, outra vista lateral)

Seguem os gráficos de torque versus deformação para os 5 casos.



Figura 4.7 - Abertura de fissura (Colmo 1, seção fechada)

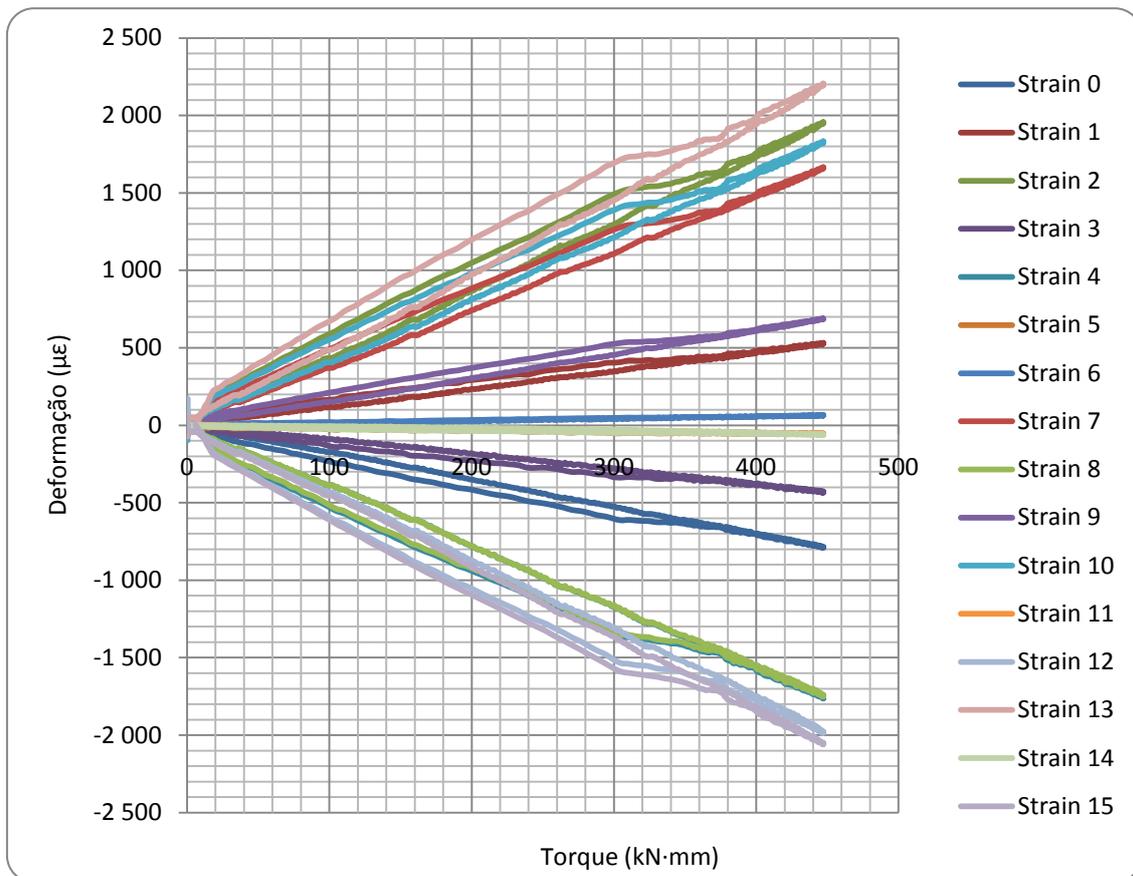


Figura 4.8 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 1, seção fechada)

Analisando o gráfico de torque versus deformação do colmo sem fissuras nota-se que os Strain Gauges mais deformados (deformações entre 2000-2200 $\mu\epsilon$) são os que ficam mais perto do engaste na direção paralela às fibras (Strain Gauges 13 (tracionado (+)), e Strain Gauges 15, que fica do outro lado do colmo inclinado à 45 graus da direção das fibras (comprimido (-)).

A maioria dos Strain Gauges menos deformados ficam na outra extremidade do colmo e nos lados laterais do colmo (Strain Gauges 0,1,3,5,6,9,11).

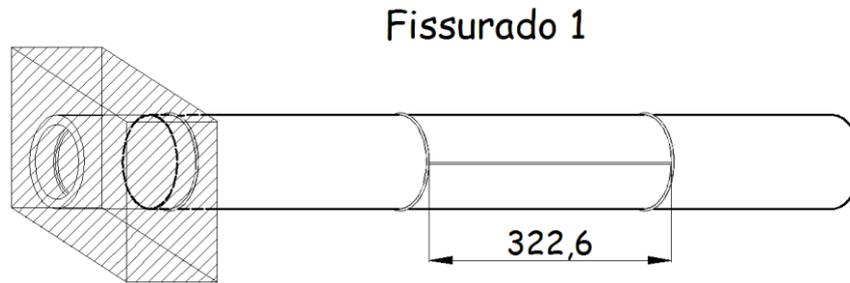


Figura 4.9 - Abertura de fissura (Colmo1, seção aberta 1)

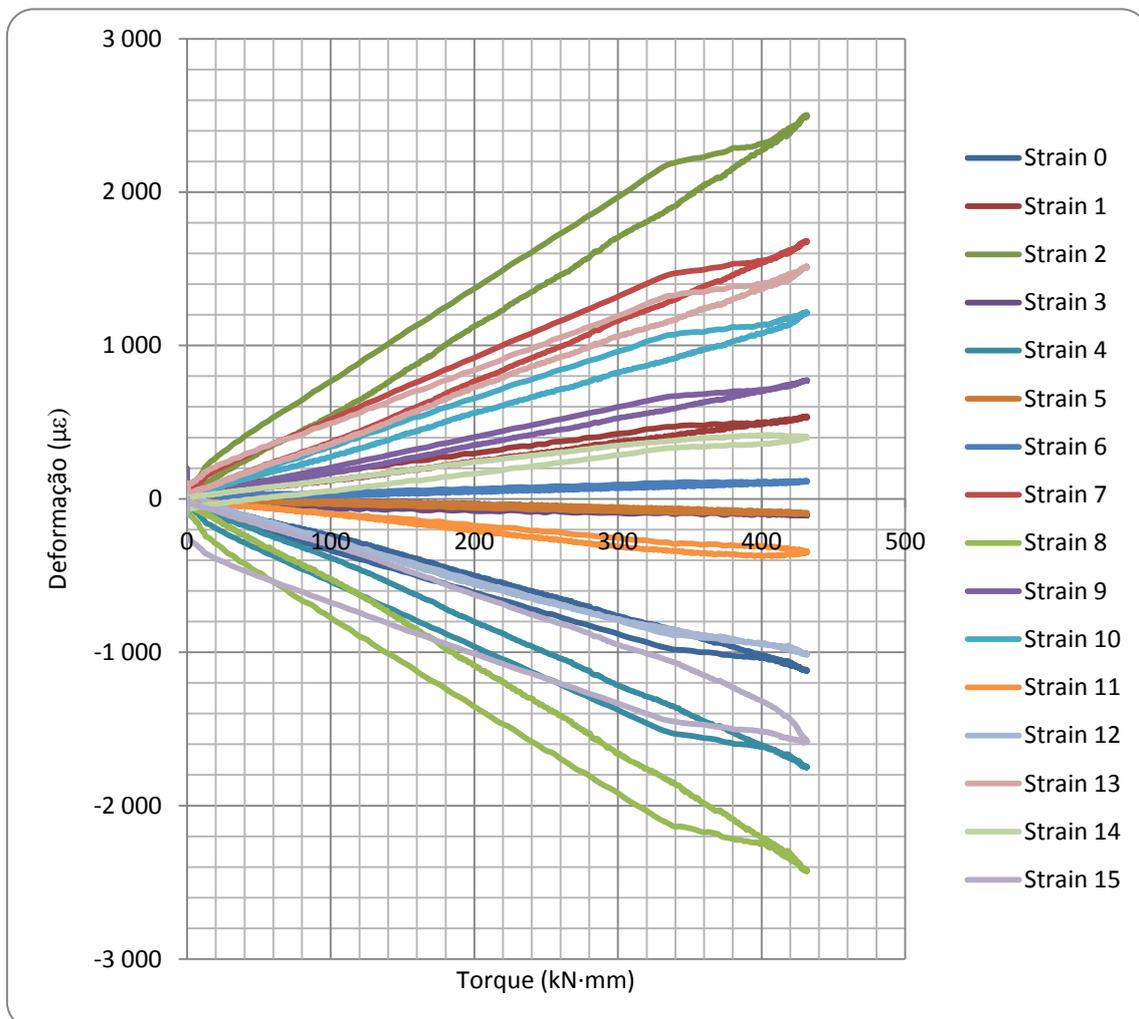


Figura 4.10 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 1, seção aberta 1)

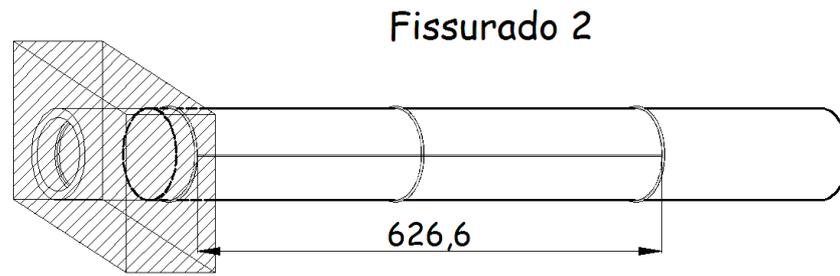


Figura 4.11 - Abertura de fissura (Colmo 1, seção aberta 2)

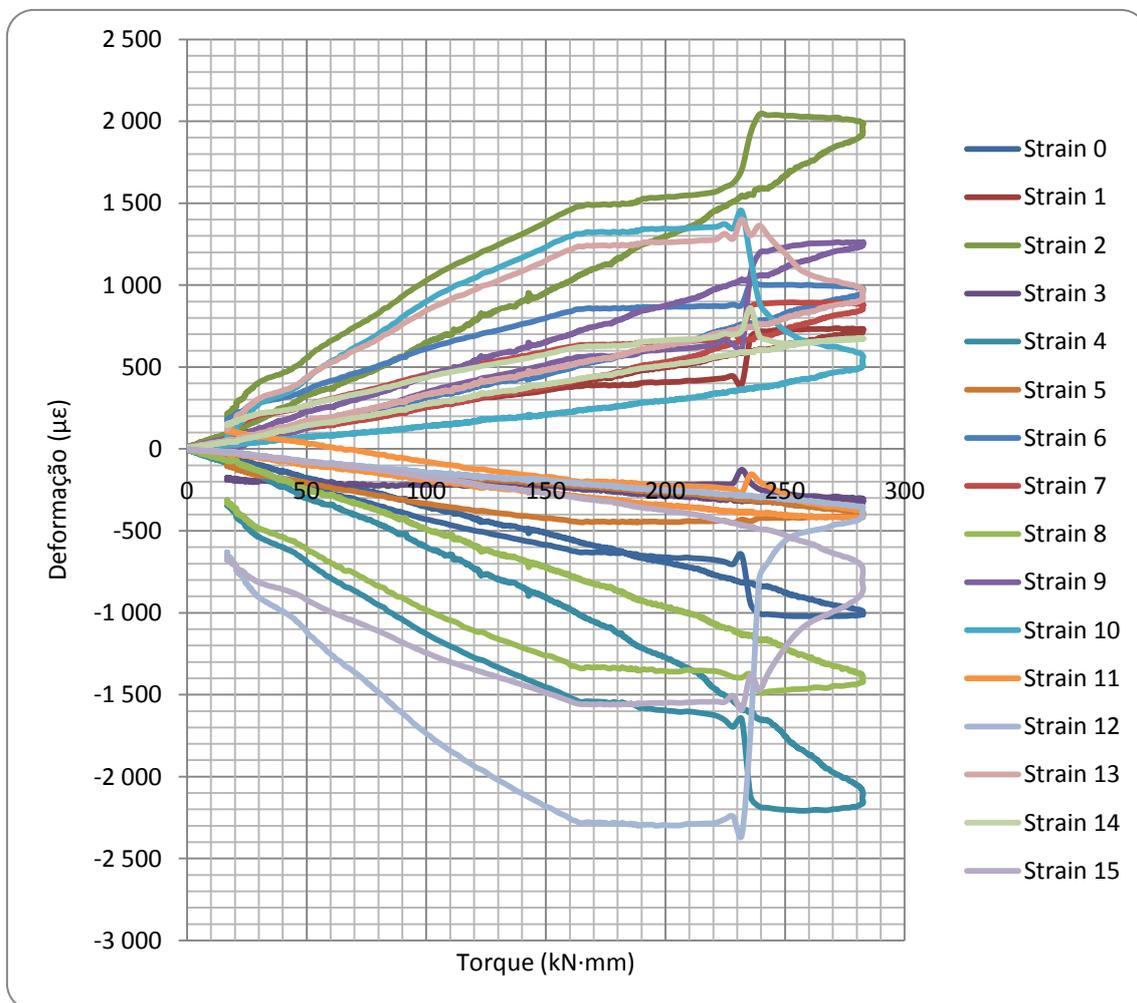


Figura 4.12 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 1, seção aberta 2)

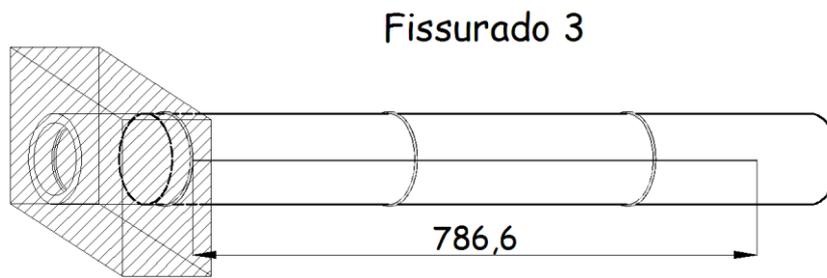


Figura 4.13 - Abertura de fissura (Colmo 1, seção aberta 3)

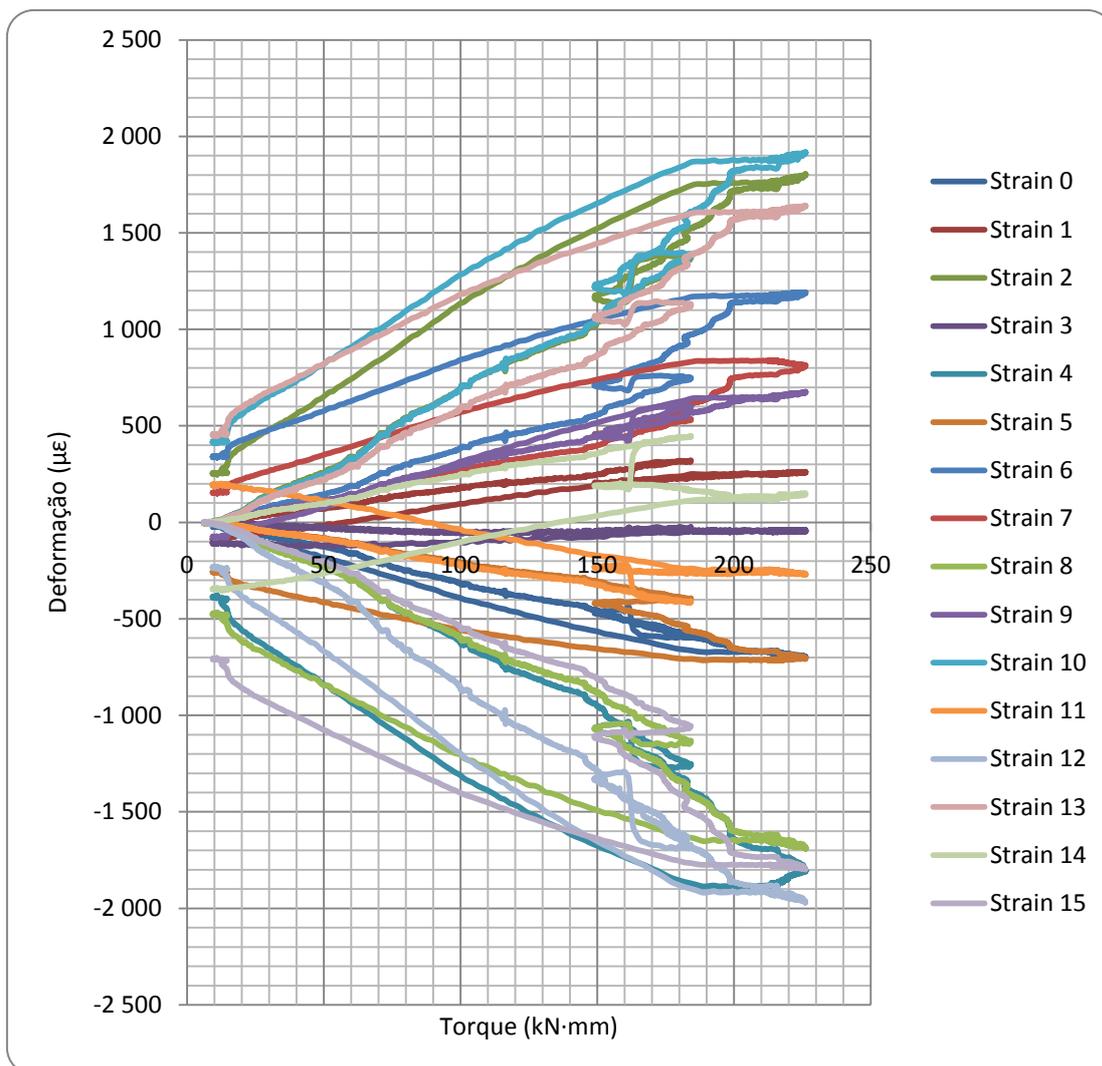


Figura 4.14 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 1, seção aberta 3)

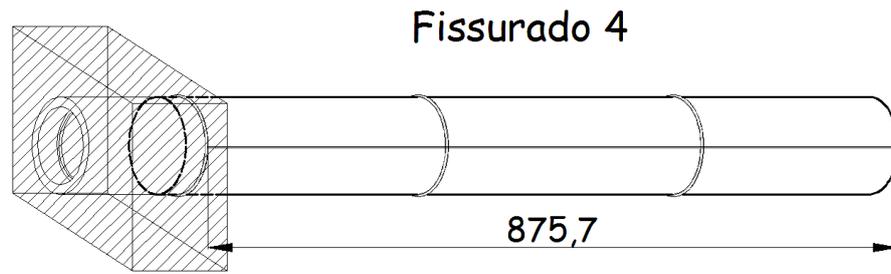


Figura 4.15 - Abertura de fissura (Colmo 1, seção aberta 4)

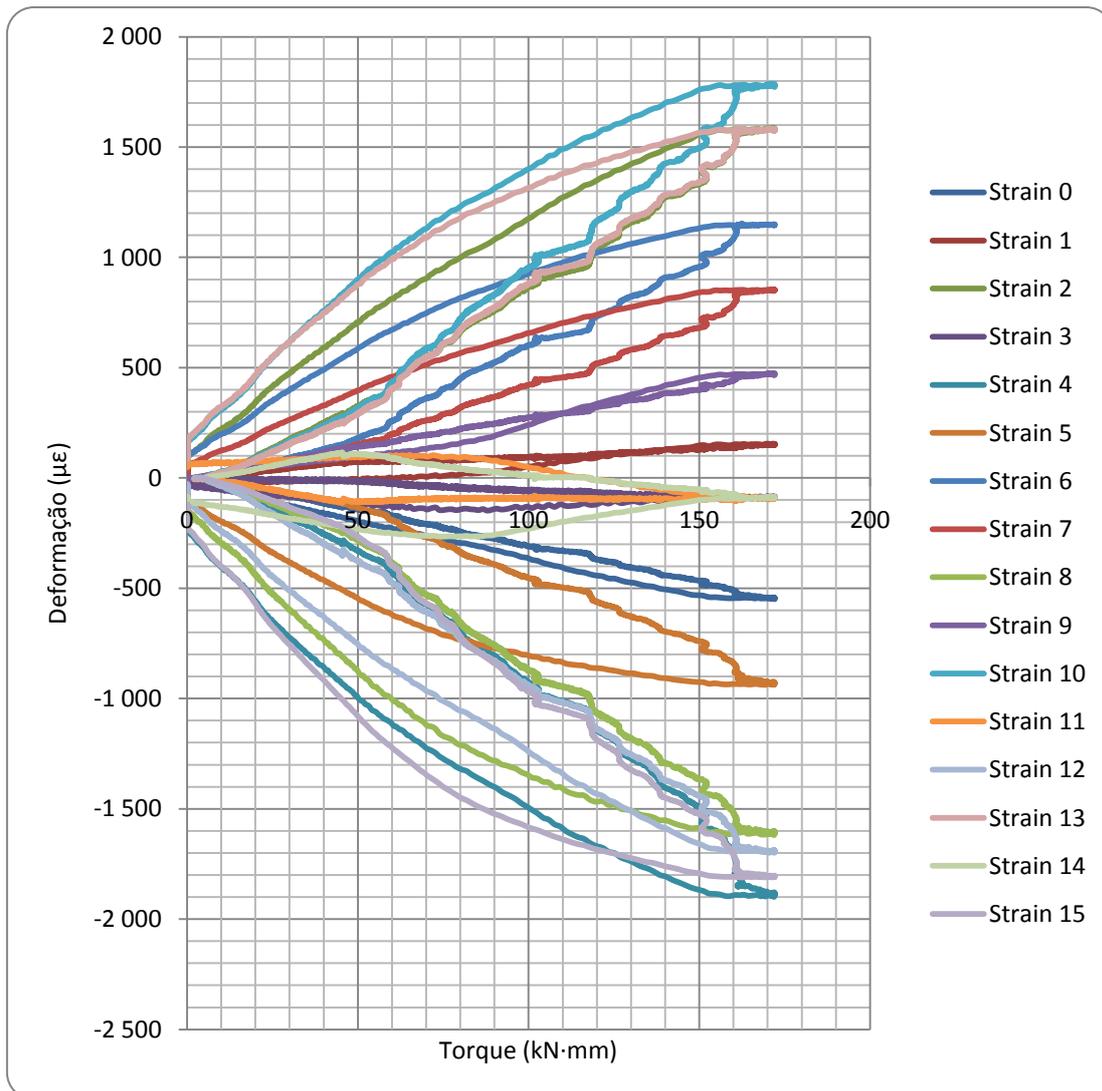


Figura 4.16 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 1, seção aberta 4)

Vista frontal

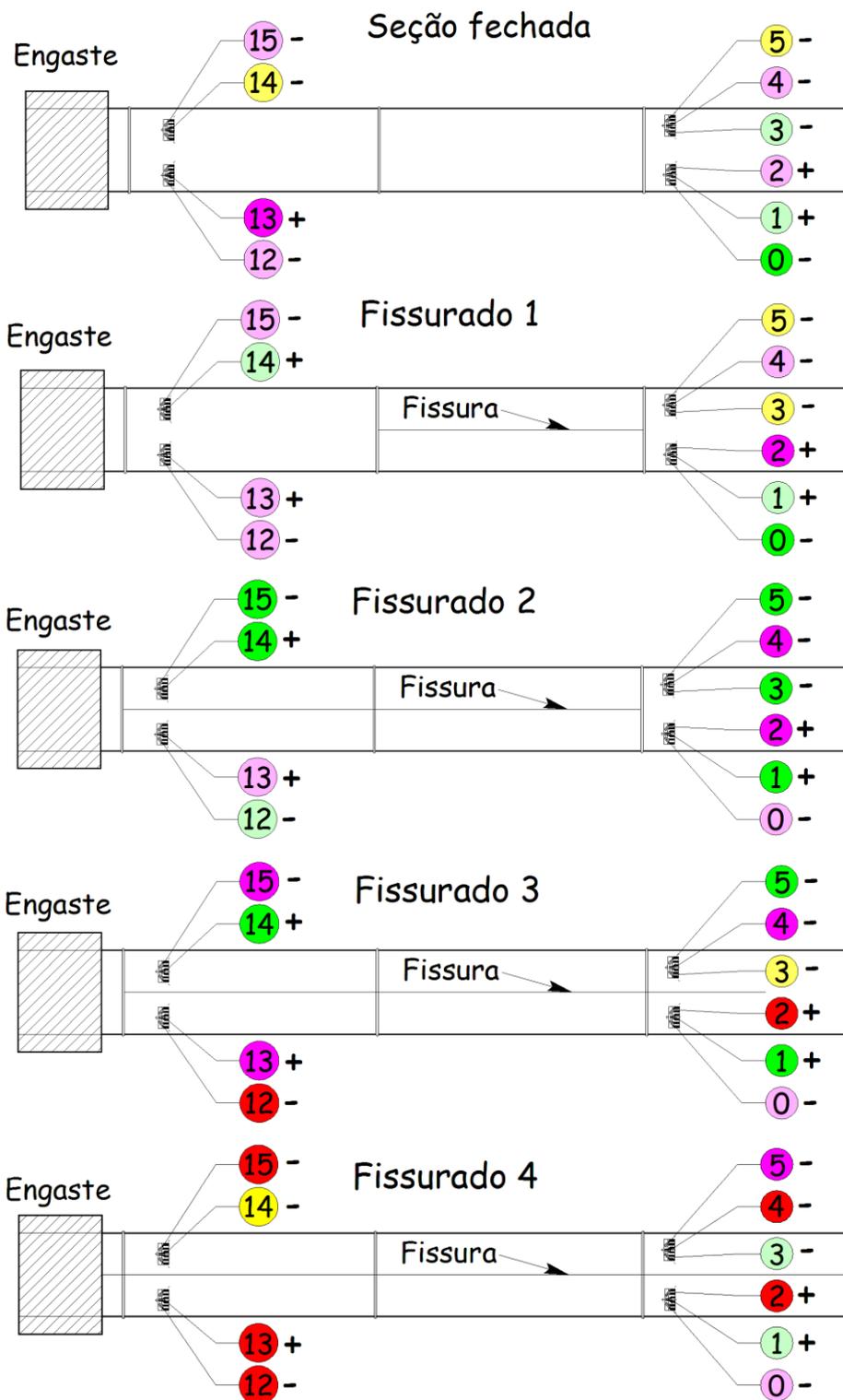


Figura 4.17 - Alterações das deformações em todas as faces de ensaio de colmo 1 no processo de carga (de colmo inteiro até fissurado 4 com torque de 150 kN·mm) (vista frontal)

- - deformações entre 1000 - 1600 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 700 - 1000 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 400 - 700 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 200 - 400 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 100 - 200 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 50 - 100 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 0 - 50 $\mu\epsilon$
- + - tracionado
- - comprimido

Figura 4-18. Significado das cores

Na figura 4.17 estão mostrados as alterações das deformações do como 1 no processo de carga desde inteiro até aberto com torque aplicado de 150 kN·mm. Na figura nota-se que a parte mais deformada do colmo é a parte próxima do engaste onde as deformações variam entre 700 e 1000 $\mu\epsilon$ (Strain Gauges posicionado paralelamente a direção das fibras) e até 700 $\mu\epsilon$ (Strain Gauges posicionados à 45 graus com as fibras) logo no primeiro ensaio (seção fechada). Na extremidade livre do colmo os Strain Gauges mais deformados são opostos geometricamente aos Strain Gauges do engaste.

No segundo ensaio, do colmo fissurado no meio entre as diafragmas, as deformações permanecem praticamente as mesmas, exceto as deformações máximas que mudam de Strain Gauge 13 para Strain Gauge 2. No terceiro ensaio a parte próxima do engaste fica menos tencionada que é uma consequência de aumento de fissura é as maiores deformações mudam para a extremidade livre (Strain Gauges 2 e 4). No quarto ensaio (o colmo fica fissurado quase de uma extremidade a outra) a parte próxima do engaste volta a ser tencionada junto com a extremidade livre, deformações dos Strain Gauges posicionados à 45 graus às fibras variam entre 1000 e 1600 $\mu\epsilon$ (Strain Gauges 12 e 2). No último ensaio as deformações chegam até os valores máximos (1600 $\mu\epsilon$) nos vários pontos do colmo, principalmente nos pontos que se demonstraram maiores deformações desde o início (13, 15, 2 e 4). A maioria dos Strain Gauges da parte de cima ficam comprimidos e da parte de baixo tracionados devido a aplicação da carga (o lado direito para baixo e o lado esquerdo para cima) (figura 4.17).

Vista lateral

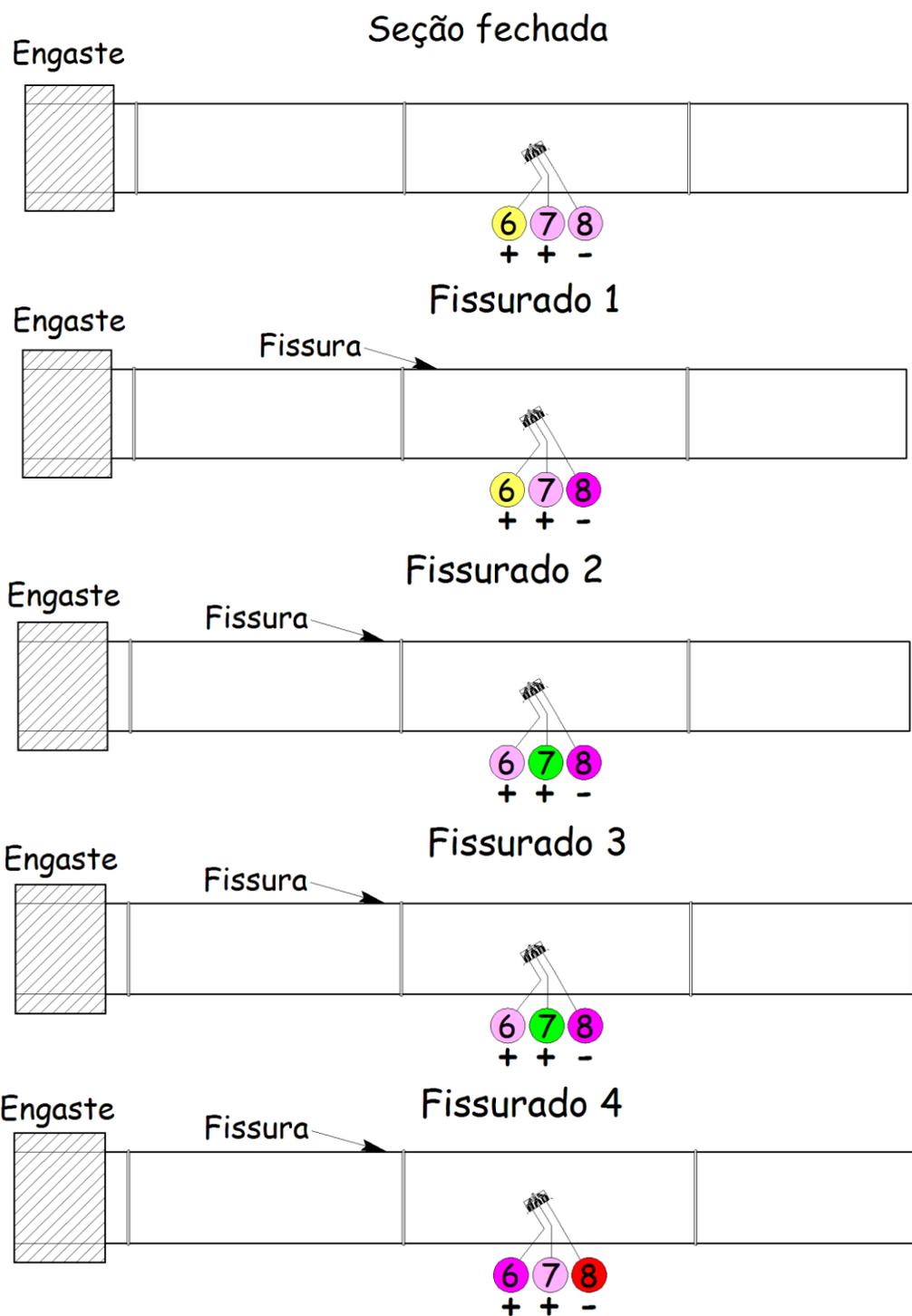


Figura 4.19 - Alterações das deformações em todas as faces de ensaio de colmo 1 no processo de carga (de colmo inteiro até fissurado 4 com torque de 150 kN·mm) (vista lateral)

- - deformações entre 1000 - 1600 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 700 - 1000 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 400 - 700 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 200 - 400 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 100 - 200 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 50 - 100 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 0 - 50 $\mu\epsilon$
- + - tracionado
- - comprimido

Figura 4.20 - Significado das cores

Analisando o comportamento dos Strain Gauges nas partes laterais do colmo nota-se, que os Strain Gauges mais deformados são os 7 e 8. No primeiro ensaio as deformações não ultrapassam os valores de 700 $\mu\epsilon$. No segundo ensaio as deformações aumentam no Strain Gauge 8 (que fica inclinado a 13° da direção das fibras) e atingem o valor de 1000 $\mu\epsilon$. No terceiro ensaio as deformações do Strain Gauges 7 diminuem e aumentam no Strain Gauges 6 (inclinado à 77° da direção das fibras). A distribuição das deformações permanece a mesma no quarto ensaio e no quinto aumentam mais ainda chegando ao valor de 1400 $\mu\epsilon$ (Strain Gauges 8). Durante todos os ensaios os Strain Gauges 6 e 7 permaneciam tracionados e 8 comprimido.

Outra vista lateral



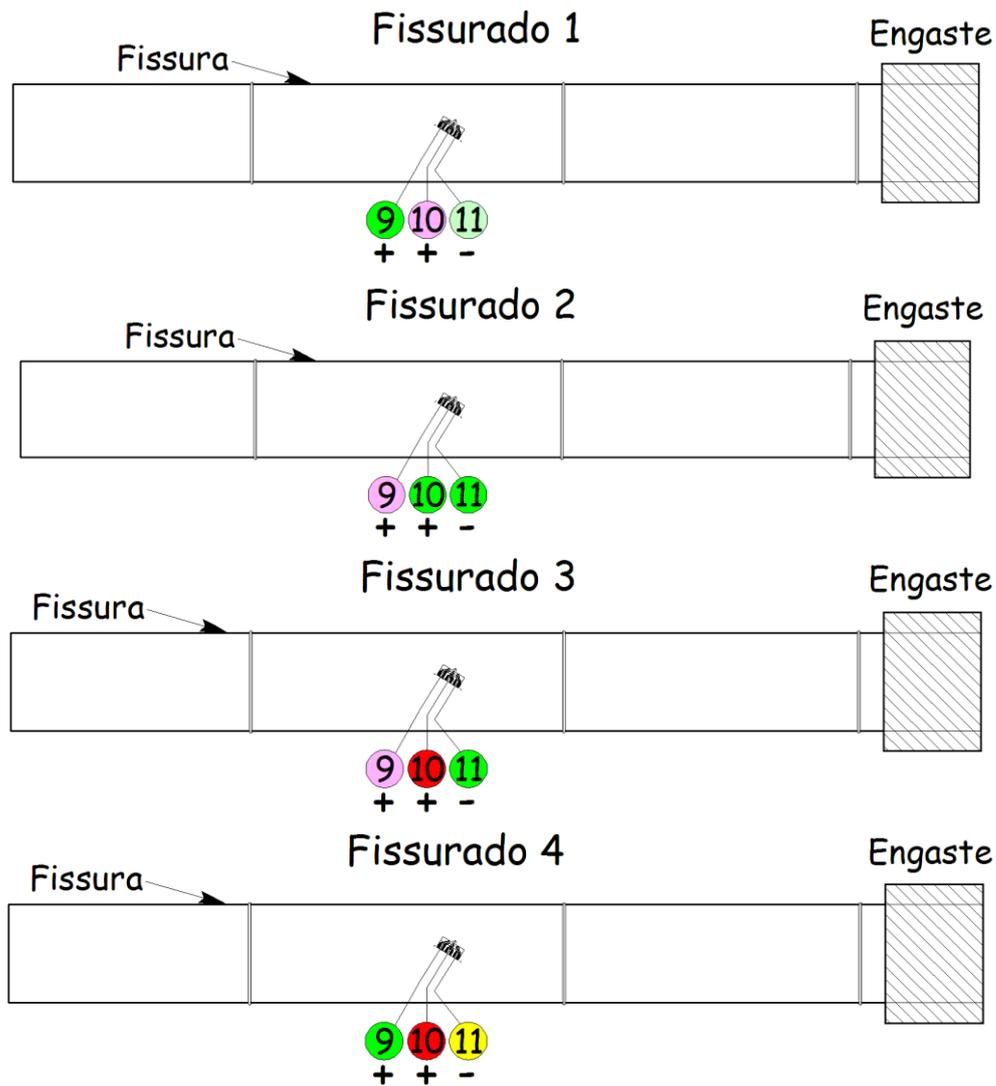


Figura 4.21 - Alterações das deformações em todas as faces de ensaio de colmo 1 no processo de carga (de colmo inteiro até fissurado 4 com torque de 150 kN·mm) (outra vista lateral)

- - deformações entre 1000 - 1600 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 700 - 1000 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 400 - 700 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 200 - 400 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 100 - 200 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 50 - 100 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 0 - 50 $\mu\epsilon$
- + - tracionado
- - comprimido

Figura 4.22 - Significado das cores

A outra parte lateral do colmo ficou menos deformada que analisada anteriormente. As deformações neste caso variam entre 400 e 700 $\mu\epsilon$ no primeiro ensaio (Strain Gauge inclinado à 58° da direção das fibras). As demais deformações variam entre 50 e 400 $\mu\epsilon$. No segundo ensaio a distribuição das deformações permanece a mesma e no terceiro fica mais deformado o Strain Gauges 9, inclinado a 13° da direção das fibras. Nos ensaios 4 e 5 as deformações máximas voltam para o Strain Gauges 10 e atingem valor 1600 $\mu\epsilon$, enquanto os Strain Gauges 9 e 11 ficam pouco deformados (até 400 $\mu\epsilon$).

4.1.2

Análise de Colmo 2

O colmo 2 foi ensaiado a torção 5 vezes (inteiro e fissurado 1, 2, 3 e 4) com os Strain Gauges posicionados assim como está mostrado nas figuras 4.23 e 4.24. Seguem os gráficos (torque versus deformações) junto com as figuras que mostram as posições das fissuras de cada caso.

Os saltos nos gráfico ocorrem devido a ruptura do colmo no processo do ensaio.

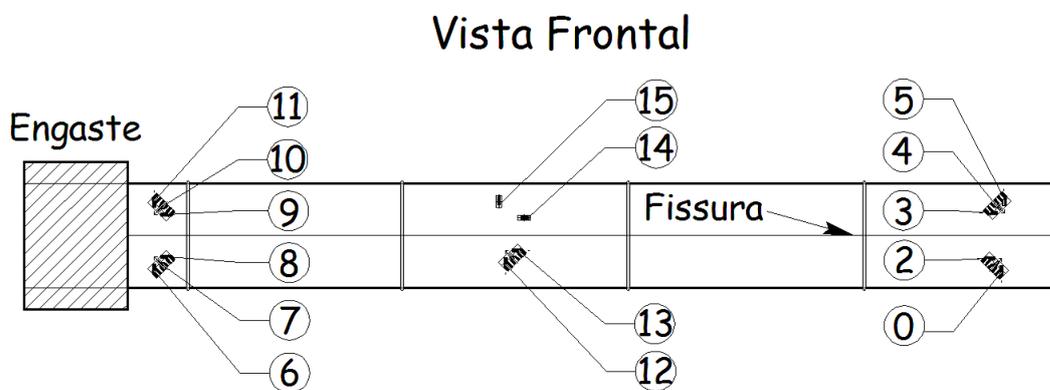


Figura 4.23 - Numeração dos Strain Gauges (Colmo 2, vista frontal)

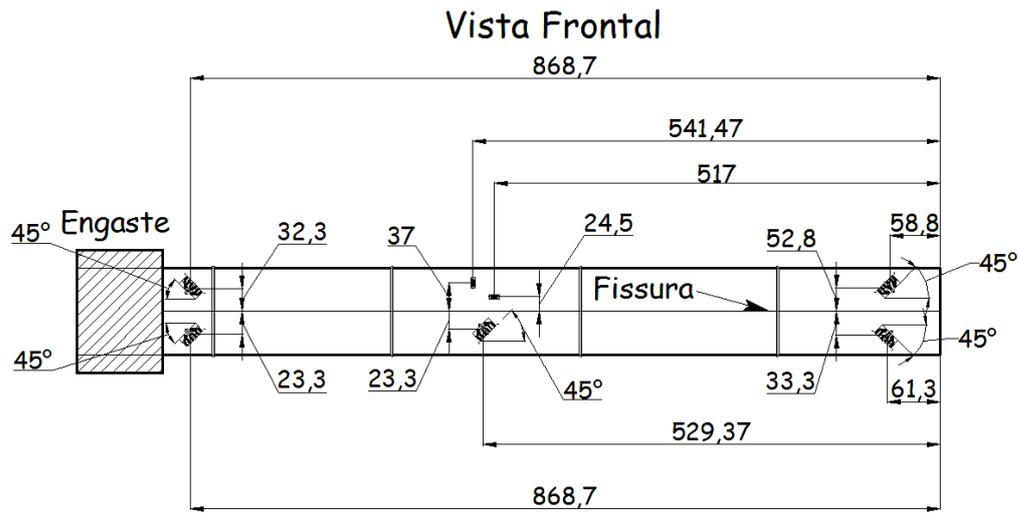


Figura 4.24 - Posição dos Strain Gauges (Colmo 2, vista frontal)



Figura 4.25 - Abertura de fissura (Colmo 2, seção fechada)

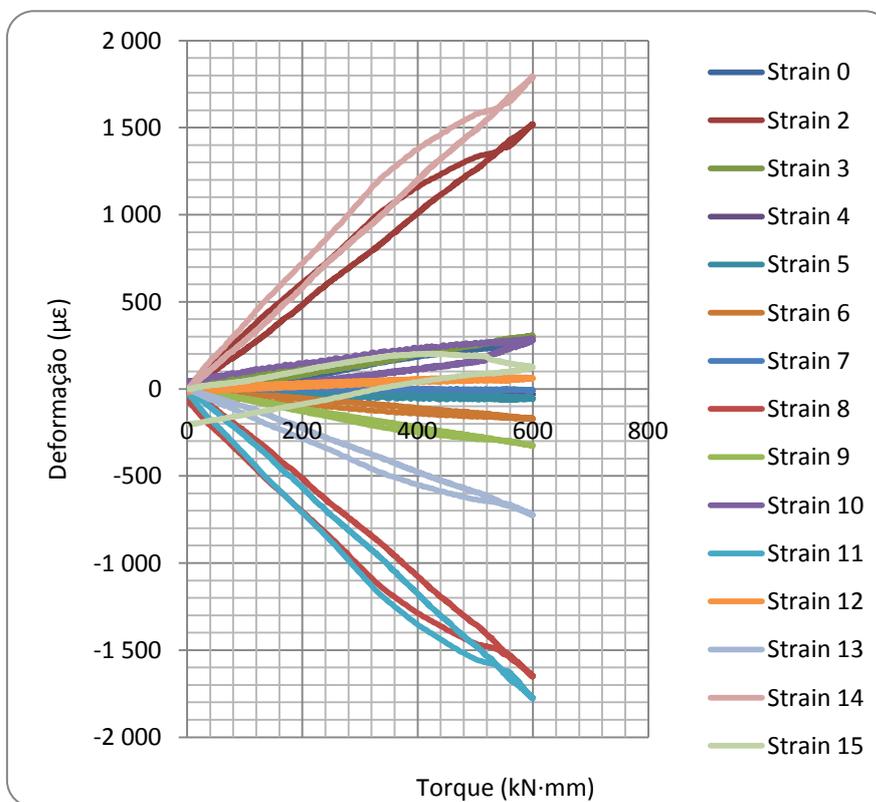


Figura 4.26 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 2, seção fechada)

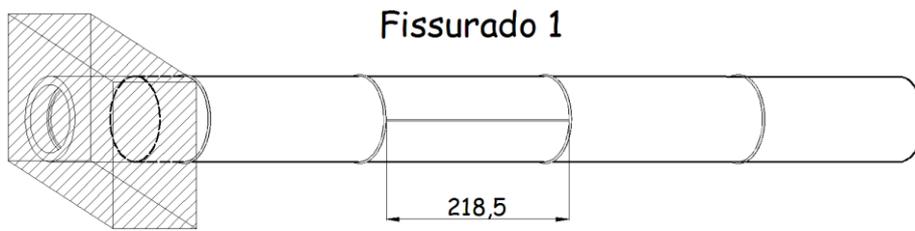


Figura 4.27 - Abertura de fissura (Colmo 2, seção aberta 1)

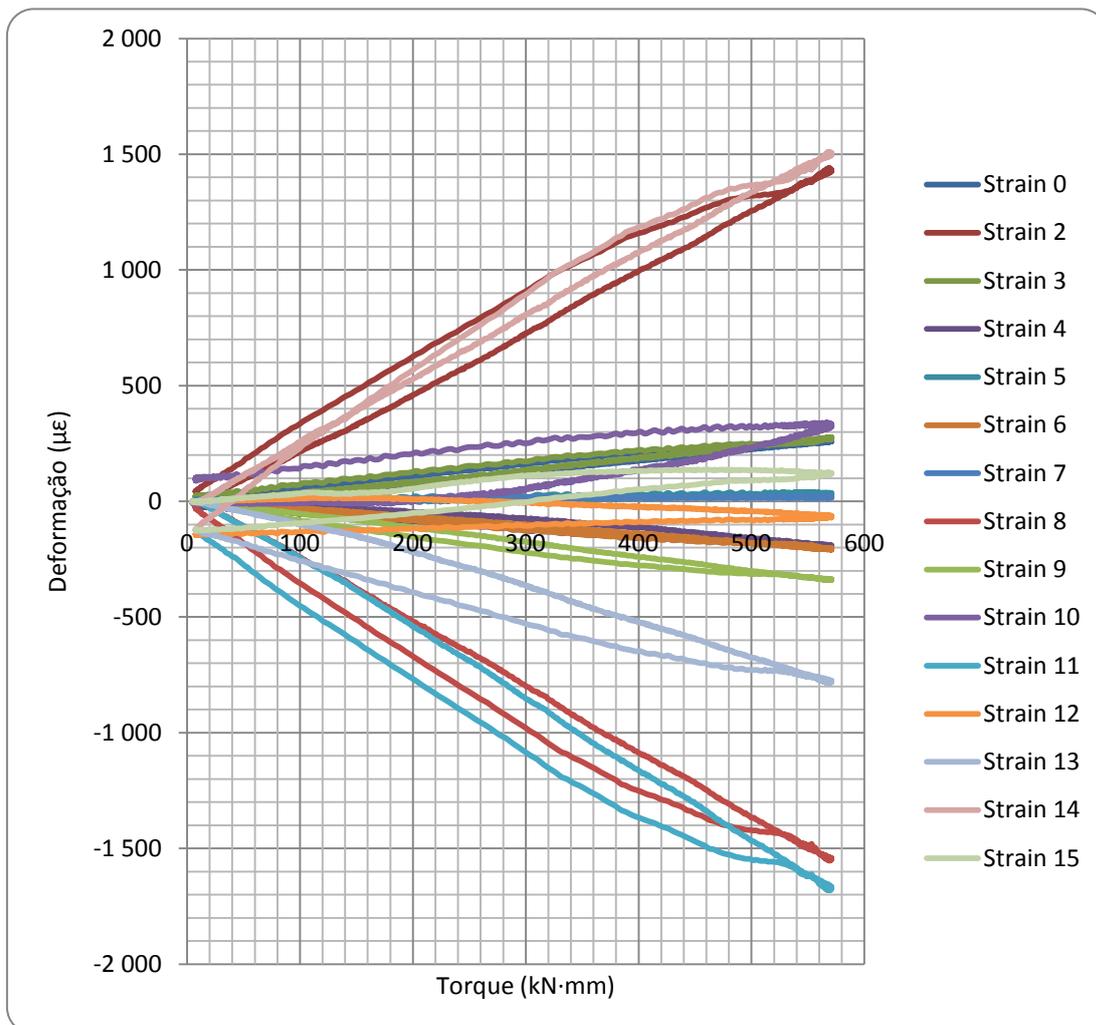


Figura 4.28 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 2, seção aberta 1)

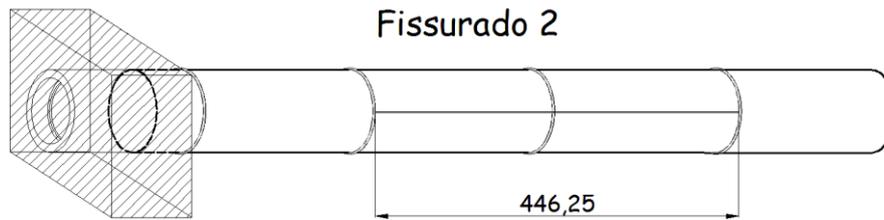


Figura 4.29 - Abertura de fissura (Colmo 2, seção aberta 2)

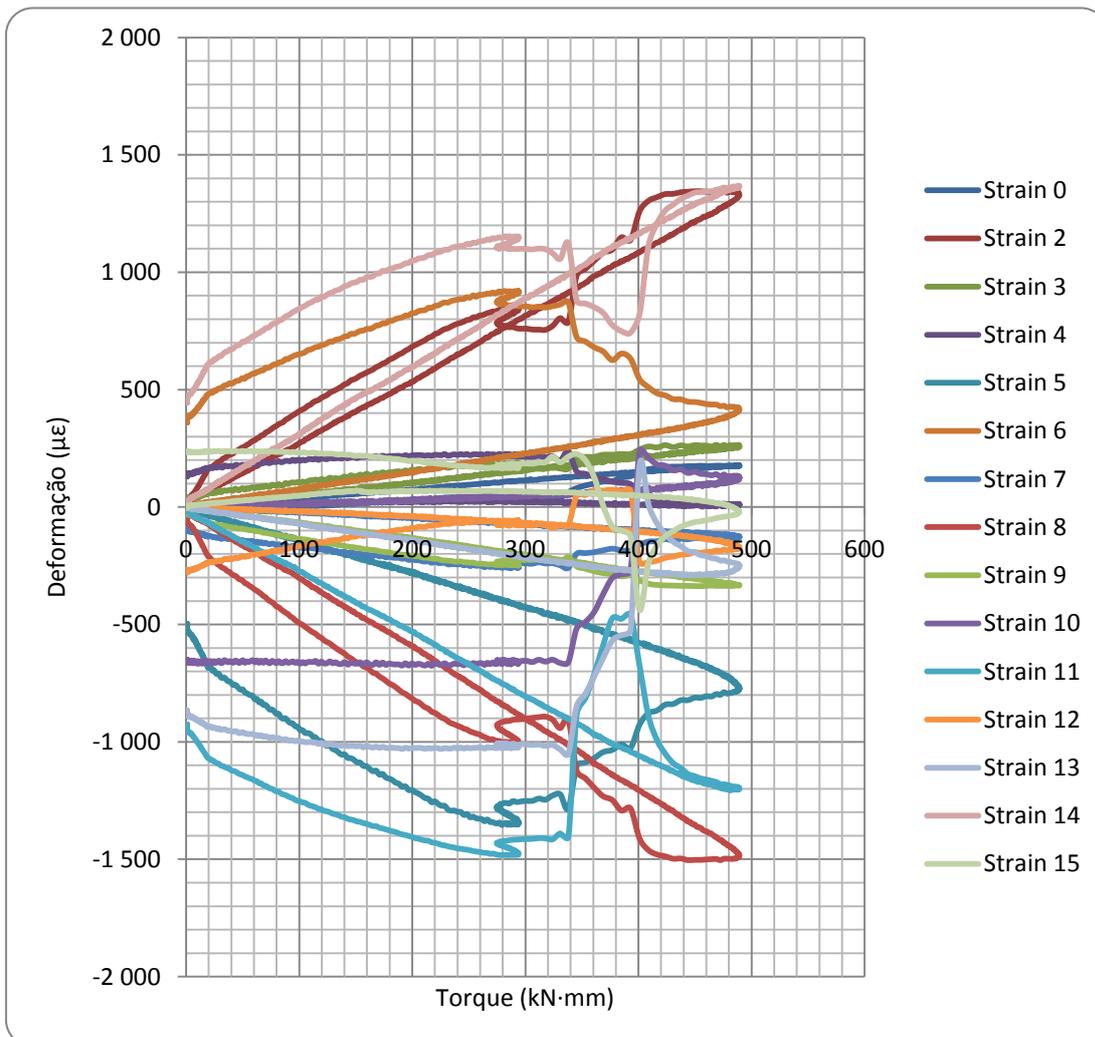


Figura 4.30 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 2, seção aberta 2)

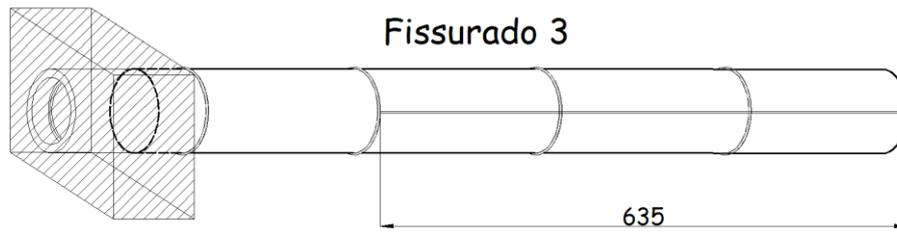


Figura 4.31 - Abertura de fissura (Colmo 2, seção aberta 3)

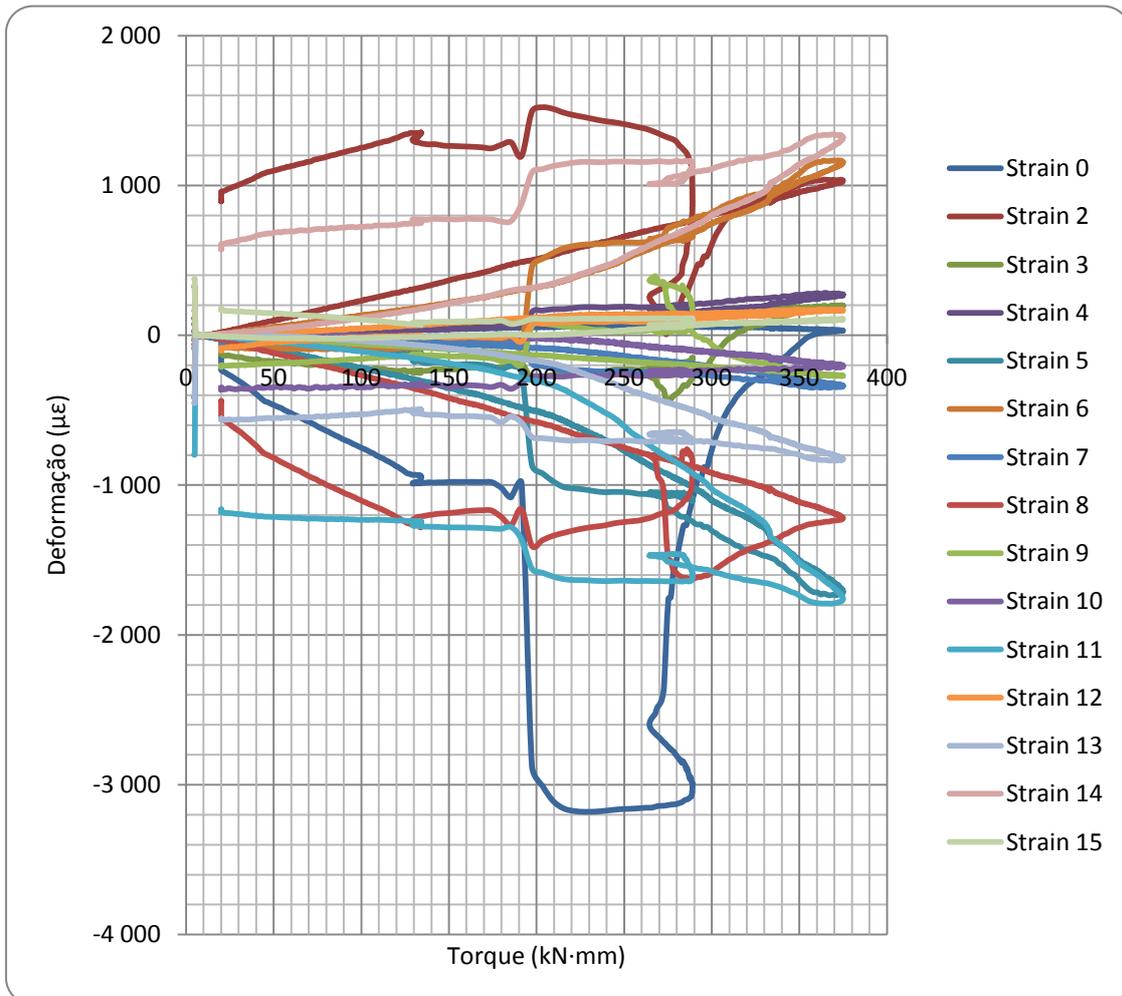


Figura 4.32 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 2, seção aberta 3)

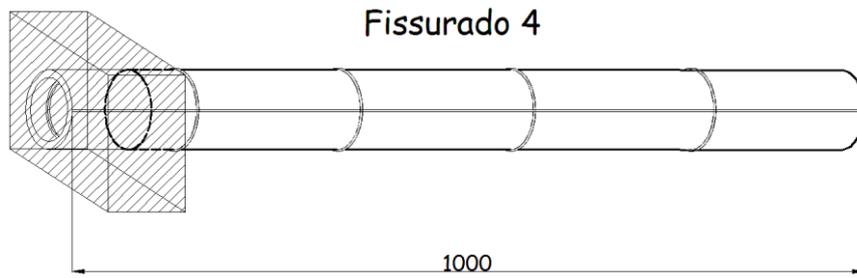


Figura 4.33 - Abertura de fissura (Colmo 2, seção aberta 4)

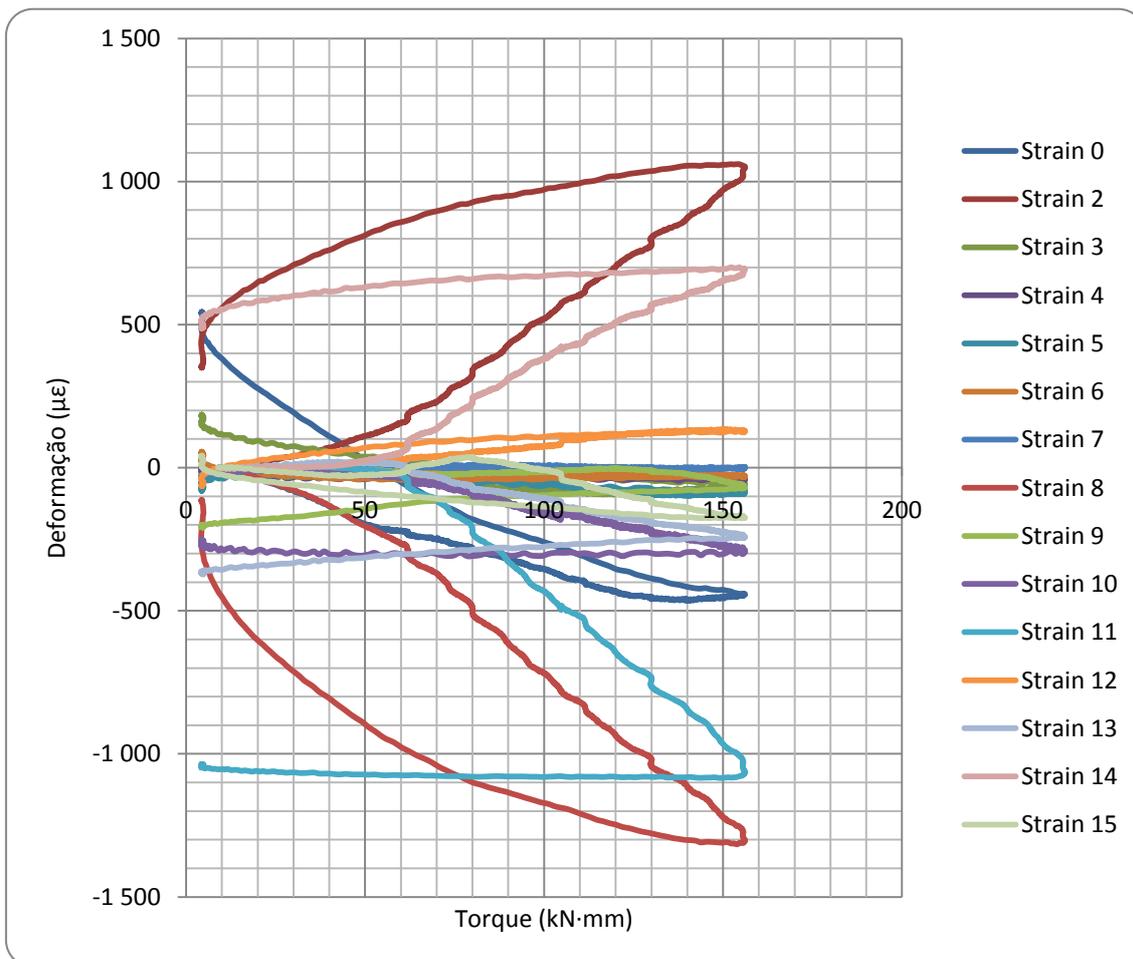


Figura 4.34 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 2, seção aberta 4)

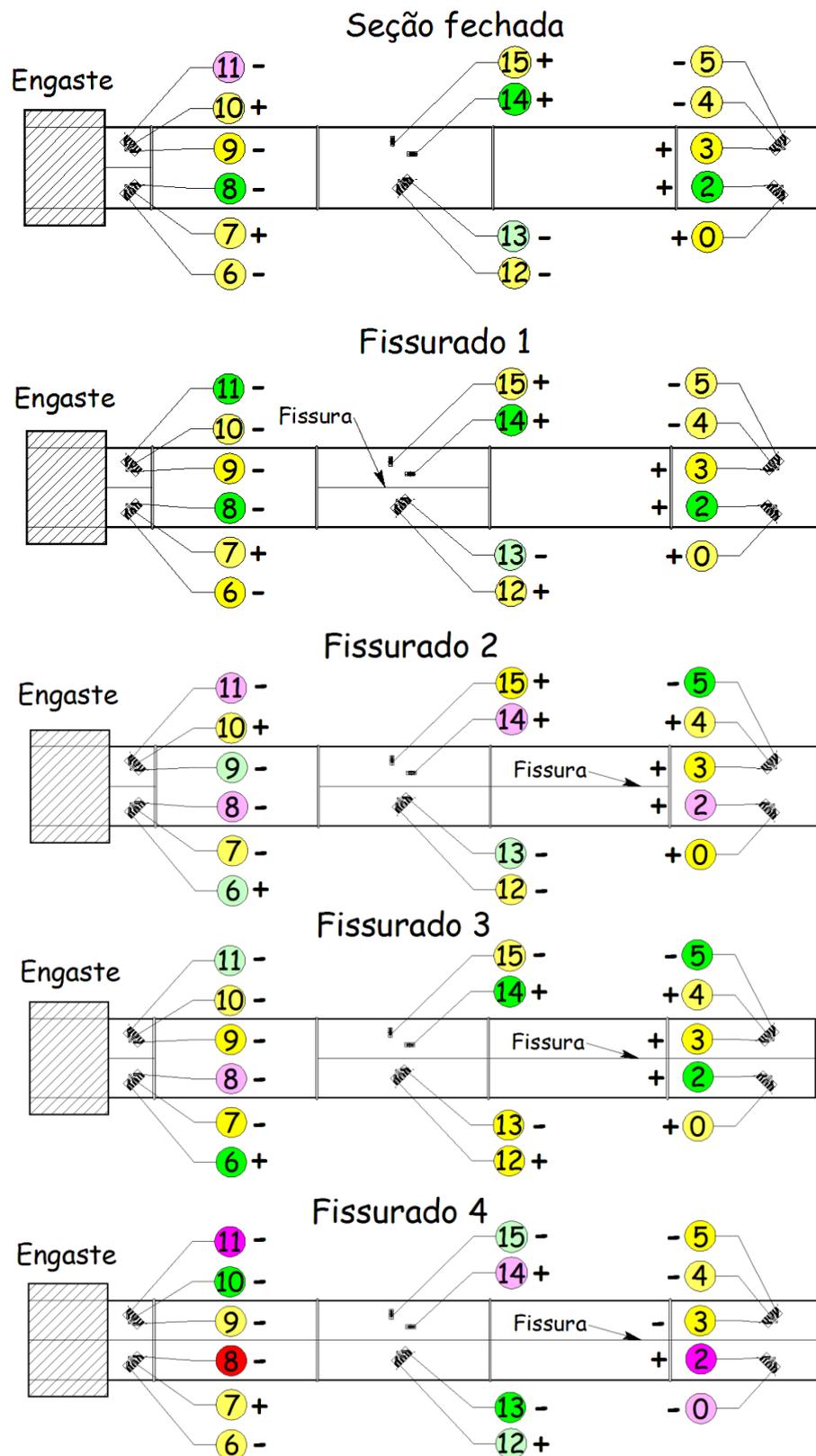


Figura 4.35 - Alterações das deformações em todas as faces de ensaio de colmo 2 no processo de carga (de colmo inteiro até fissurado 4 com torque de 150 kN-mm) (vista frontal)

- - deformações entre 1000 - 1600 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 700 - 1000 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 400 - 700 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 200 - 400 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 100 - 200 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 50 - 100 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 0 - 50 $\mu\epsilon$
- + - tracionado
- - comprimido

Figura 4.36 - Significado das cores

Na figura 4.35 estão mostrados as deformações no cada ponto dos Strain Gauges nos 5 casos analisados no processo de carga (começando com a seção fechada e até a seção totalmente aberta) com o torque de 150 kN·mm aplicado na extremidade livre. No primeiro caso o ponto mais deformado é 11 (direcionado transversalmente às fibras do bambu) e as deformações neste ponto não ultrapassam valor de 700 $\mu\epsilon$. Os seguintes pontos com maiores deformações são 2,8 e 14 onde as deformações variam entre 200 e 400 $\mu\epsilon$. Na maioria dos pontos, onde as deformações foram medidas elas não ultrapassam 100 $\mu\epsilon$. No segundo ensaio a distribuição das deformações permanece a mesma, só nota-se o aumento das deformações nos alguns pontos, e ao mesmo tempo a diminuição nos outros, como, por exemplo, Strain Gauge 11. No terceiro ensaio (fissurado 2) as deformações aumentam (devido a abertura da fissura até a próxima diafragma), nos vários pontos (Strain Gauges 2,8,11,14) valores superam 400 $\mu\epsilon$. No quarto ensaio a fissura foi aberta até a extremidade livre do colmo, as deformações nos alguns pontos diminuem (2,11,14) e aumentam nos outros (6,7,12). Alguns Strain Gauges que foram comprimidos no terceiro ensaio ficaram tracionados no quarto (12) e vice-versa (10 e 15). Isso só acontece com as pequenas deformações. No ultimo ensaio (seção aberta) as deformações atingem os valores máximos em comparação com outros ensaios. A deformação do Strain Gauge 8 atingiu valor 1200 $\mu\epsilon$, valores dos Strain Gauges 2 e 11 variam em torno do 1000 $\mu\epsilon$. Neste caso os Strain Gauges mais deformados também ficaram dos dois lados da fissura, na parte da cima Strain Gauges 11, que é direcionada transversalmente as fibras

do colmo, e na parte de baixo os Strain Gauges 2 e 8, direção dos ambos coincide com as fibras. Os Strain Gauges menos deformados são 4,6 e 7, deformação dos quais não ultrapassa $50 \mu\epsilon$.

4.1.3

Análise de Colmo 3

Os Strain Gauges de colmo três foram distribuídos da forma similar com o colmo dois (figura 4.37 e 4.38), posicionados nas partes do início, meio e fim do colmo. Os Strain Gauges lineais (14 e 15) foram posicionados simetricamente com a roseta (12,13). O Strain Gauges do médio da roseta (12,13) não foi usado por causa da falta das entradas nos blocos de sistema de aquisição de dados.

Seguem os gráficos das deformações versus torque.

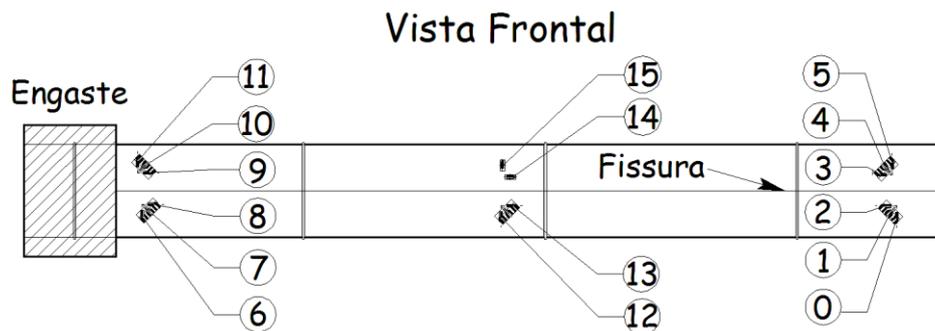


Figura 4.37 - Numeração dos Strain Gauges (Colmo 3, vista frontal)

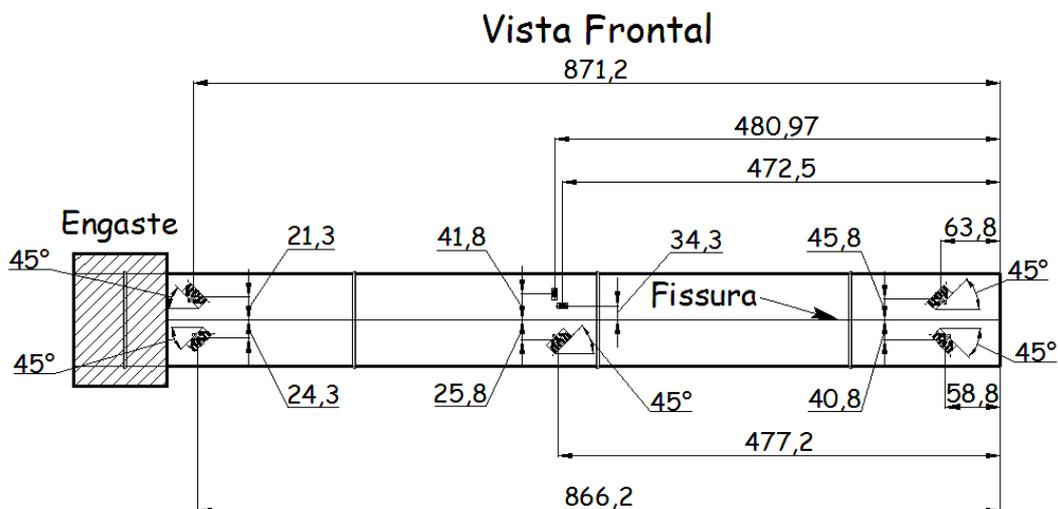


Figura 4.38 - Posição dos Strain Gauges (Colmo 3, vista frontal)

Seção fechada

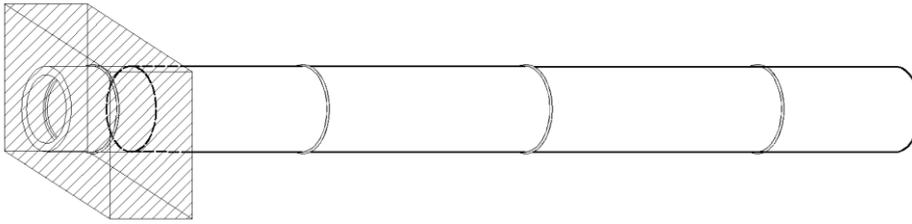


Figura 4.39 - Abertura de fissura (Colmo 3, seção fechada)

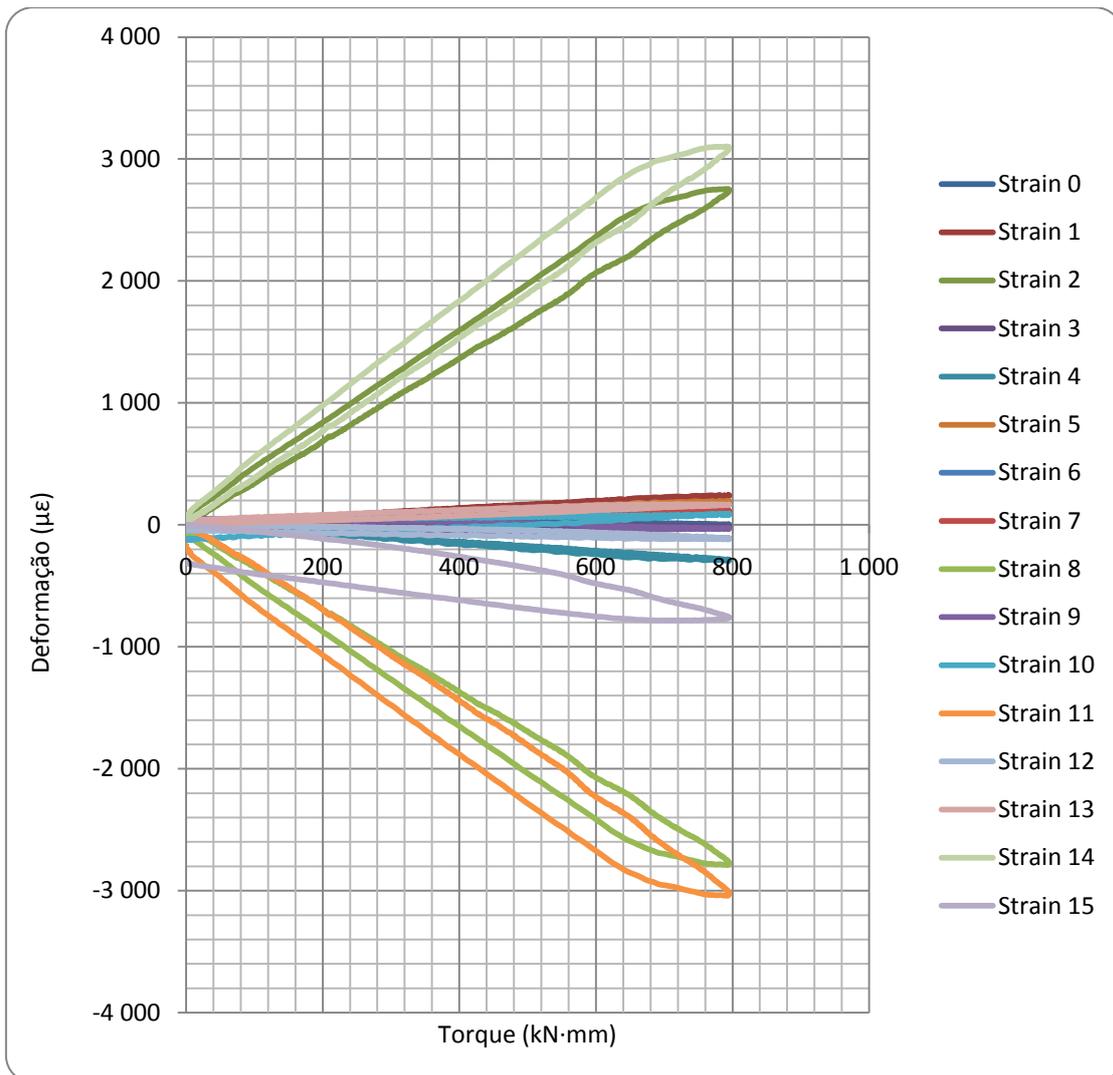


Figura 4.40 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 3, seção fechada)

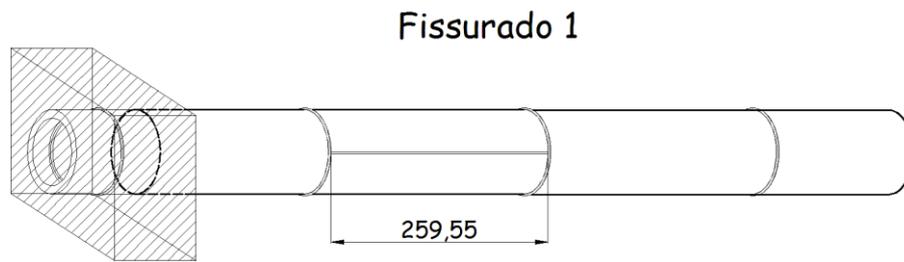


Figura 4.41 - Abertura de fissura (Colmo 3, seção aberta 1)

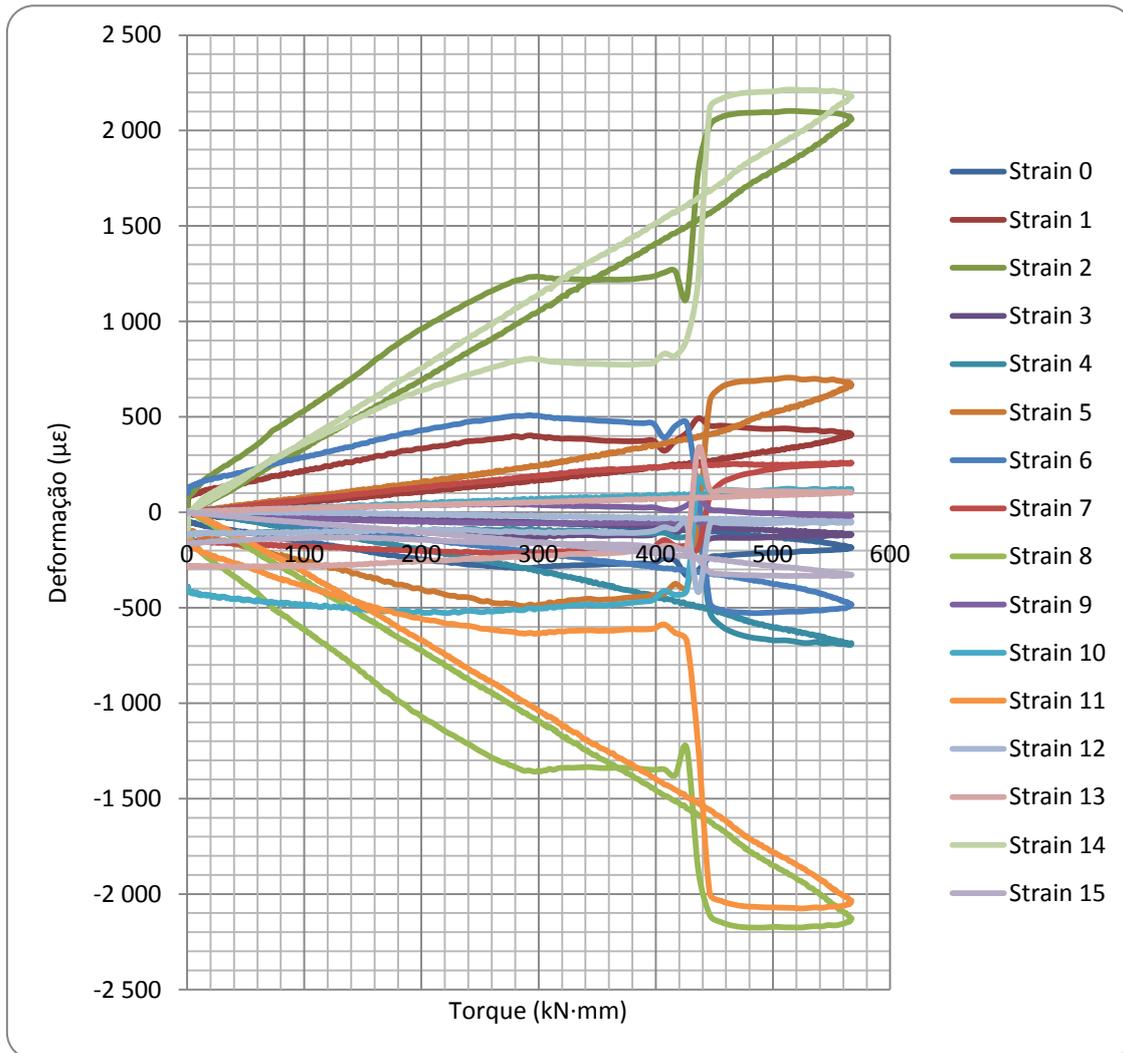


Figura 4.42 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 3, seção aberta 1)

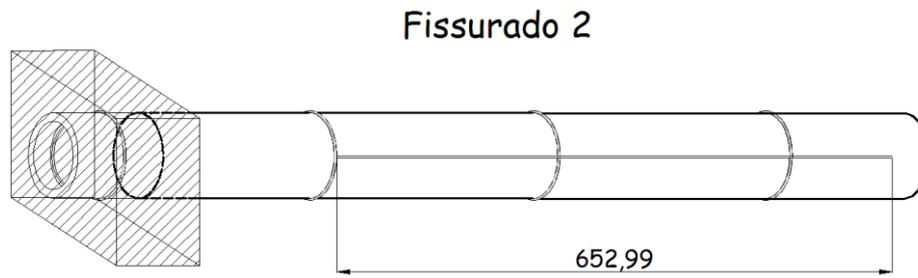


Figura 4.43 - Abertura de fissura (Colmo 3, seção aberta 2)

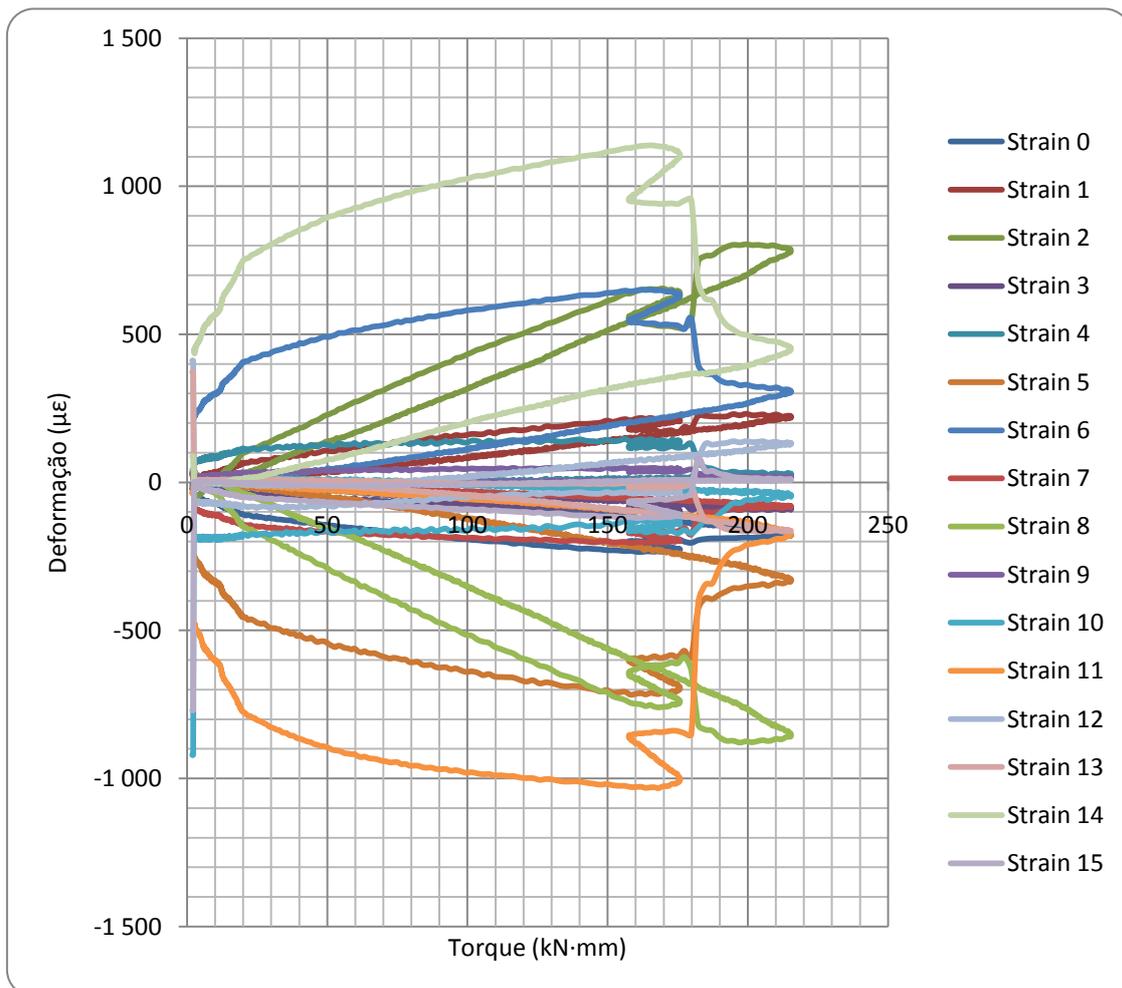


Figura 4.44 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 3, seção aberta 2)

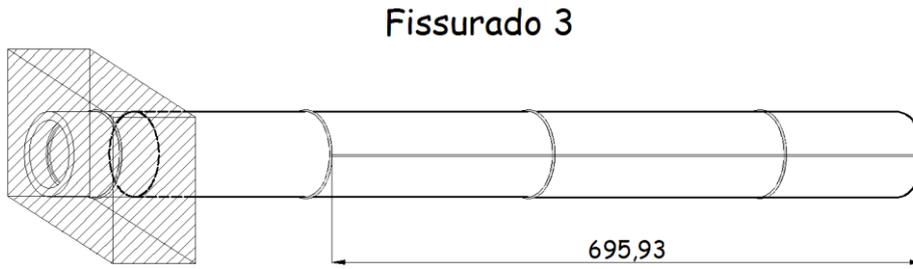


Figura 4.45 - Abertura de fissura (Colmo 3, seção aberta 3)

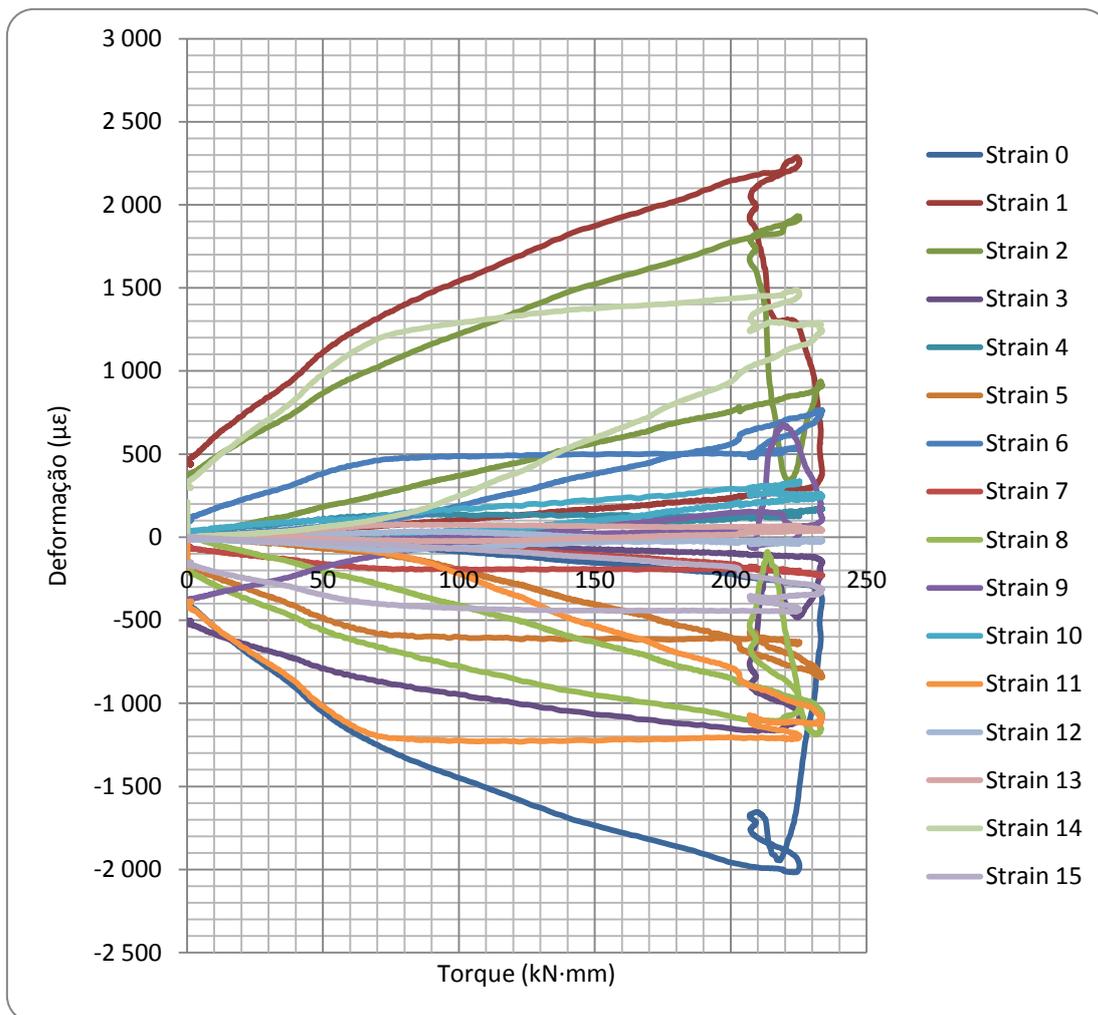


Figura 4.46 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 3, seção aberta 3)

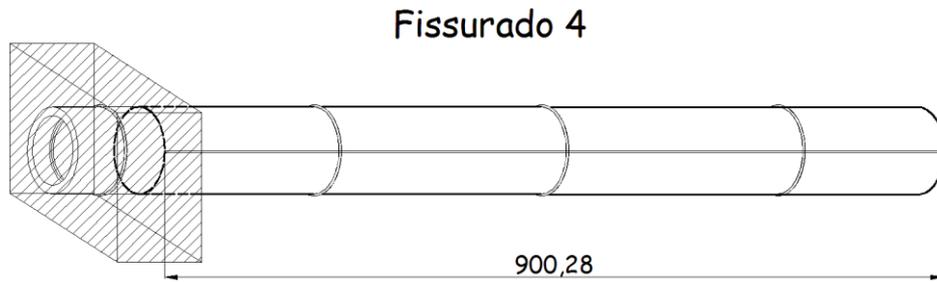


Figura 4.47 - Abertura de fissura (Colmo 3, seção aberta 4)

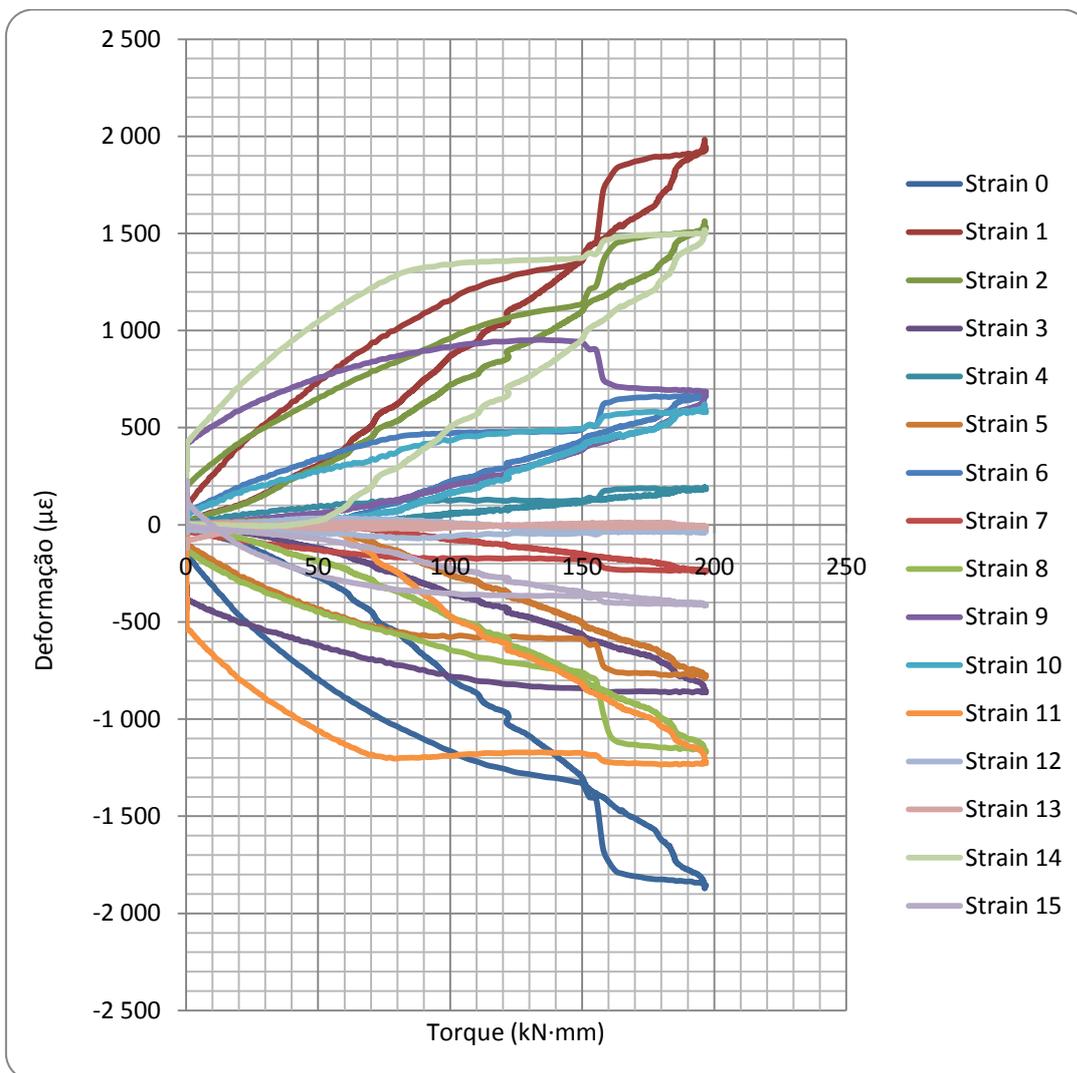


Figura 4.48 - Torque versus deformação dos Strain Gauges (Colmo 3, seção aberta 4)

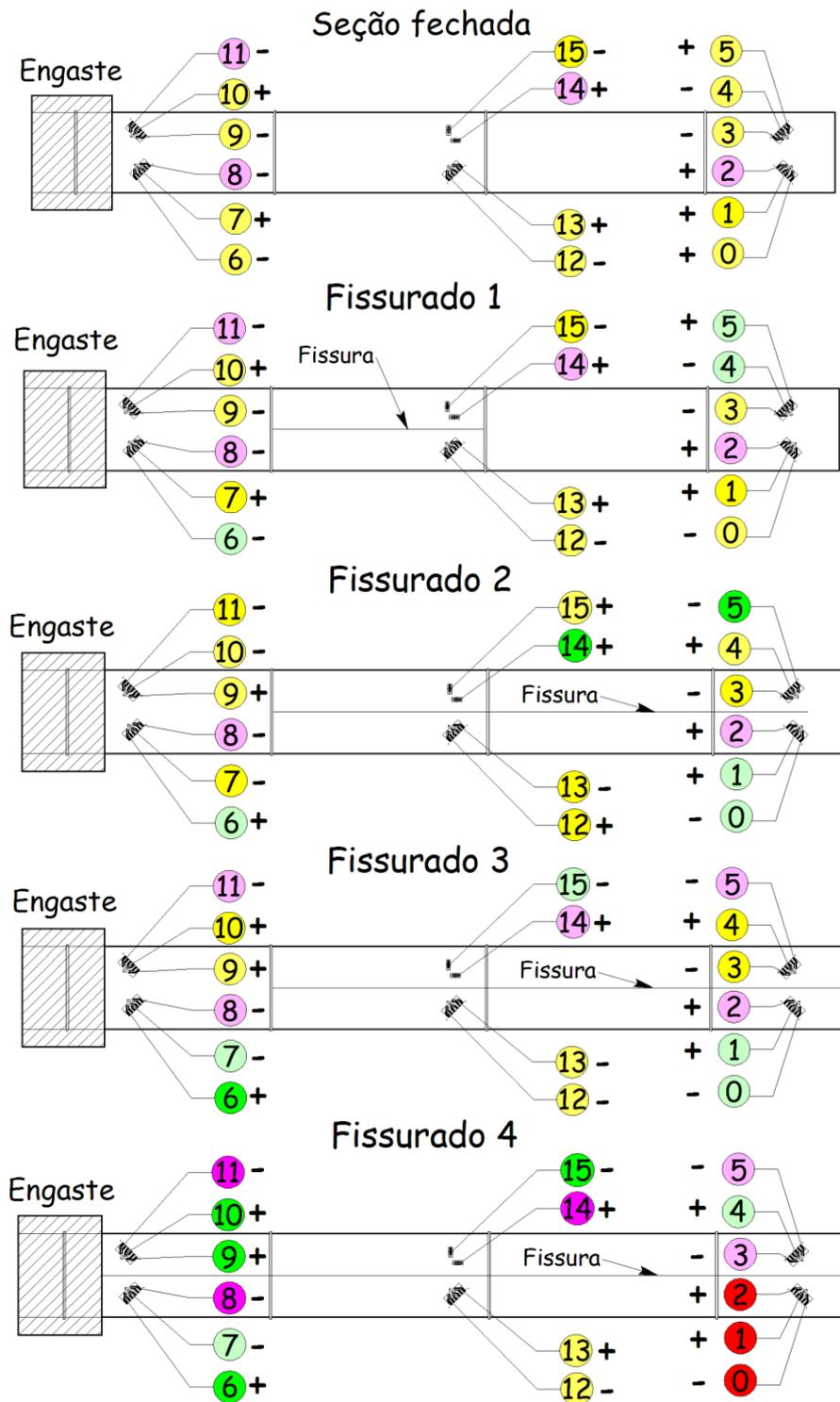


Figura 4.49 - Alterações das deformações em todas as faces de ensaio de colmo 3 no processo de carga (de colmo inteiro até fissurado 4 com torque de 150 kN·mm) (vista frontal)

- - deformações entre 1000 - 1600 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 700 - 1000 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 400 - 700 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 200 - 400 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 100 - 200 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 50 - 100 $\mu\epsilon$
- - deformações entre 0 - 50 $\mu\epsilon$
- + - tracionado
- - comprimido

Figura 4.50 - Significado das cores

Analisando as deformações do colmo três nas 5 fases do ensaio com torque de 150 kN·mm aplicado na extremidade livre, note-se, que na primeira fase a distribuição das deformações é uniforme e varia em torno de 0-100 $\mu\epsilon$. As deformações dos Strain Gauges 2, 14 e 8 (inclinação coincide com a direção das fibras do colmo), posicionados de forma xadrez no início, meio e fim do colmo respectivamente variam em torno de 500 $\mu\epsilon$. Na segunda fase do ensaio nota-se aumento das deformações nos Strain Gauges 4,5 e 6, as demais tendências ficam as mesmas. Na terceira fase do ensaio notam-se as diminuições das deformações em alguns pontos e aumento nos outros. Os pontos mais deformados permanecem deformados dentro da mesma faixa das deformações. Na quarta fase as deformações aumentam. Aparecem mais pontos, onde as deformações chegam até 500 $\mu\epsilon$. Na quinta fase do ensaio destacam os valores das deformações dos Strain Gauges 0 e 1, que permaneciam pouco deformados durante todas as fases do ensaio. Deformações nestes pontos ultrapassam 1300 $\mu\epsilon$. O Strain Gauges localizados perto do engaste ficam menos deformados, as deformações variam em torno do 400 $\mu\epsilon$, chegando em alguns casos até 900 -1000 (Strain Gauges 8, 11). Estado de alguns Strain Gauges mudou durante o ensaio varias vezes, sendo comprimidos no início, tracionados no meio e voltaram a ser comprimidos no fim de ensaio e vice versa.

4.1.4

Comparação dos resultados

Comparando os resultados obtidos dos três colmos notam-se as seguintes tendências:

- muita similaridade nos estados das deformações dos colmos 2 e 3, devida a posicionamento similar dos Strain Gauges;
- diminuição das deformações nos vários pontos e sua concentração em outros nos casos de fissura incompleta (fissurado 2 para colmos 1 e 3 e fissurado 3 para colmo 2) [anexo 2];
- concentração das deformações máximas nas extremidades (perto do engaste e na extremidade livre) e a parte média permanece pouco deformada (na maioria dos pontos deformações não ultrapassam valor de $200 \mu\epsilon$).
- os Strain Gauges mais deformados foram posicionados na direção paralela às fibras em forma xadrez (8, 14 e 2);

4.2

Análise dos ângulos de rotação dos ensaios de torção pura

4.2.1

Análise de colmo 1

A segunda característica analisada (necessária para cálculo de módulo de cisalhamento) foi o ângulo de rotação, medido nos 3 diferentes pontos do colmo (os dados de medidor R e medidor B foram obtidos através do sistema de reconhecimento de imagem e a terceira serie de dados foi obtida através do cálculo, usando os dados dos LVDT 1 e 2, posicionados embaixo dos braços (figura 3.5).

Para verificar a ausência das rotações na base do engaste fio feita uma marcação no colmo e na madeira do engaste que permanecia imóvel durante todos os ensaios.

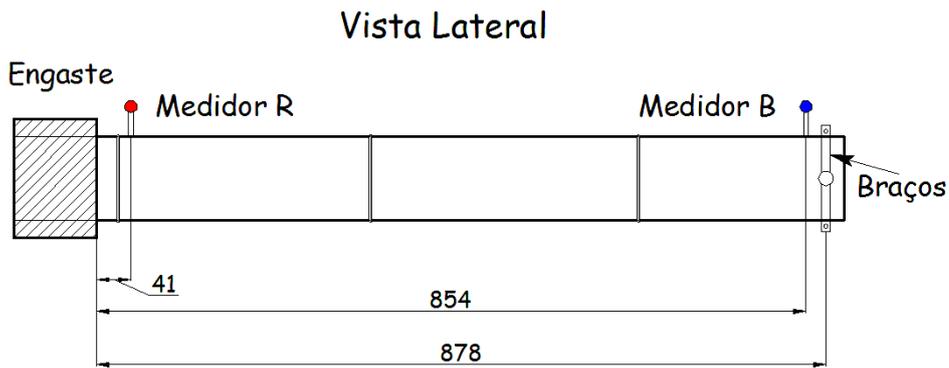


Figura 4.51 - Posição dos medidores de ângulo B e R (Colmo 1)

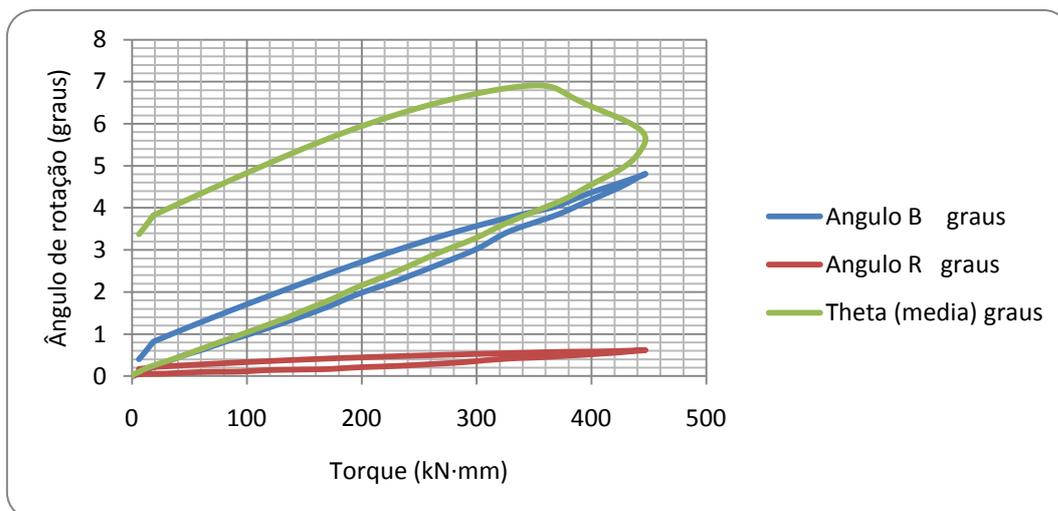


Figura 4.52 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 1, seção fechada)

Analisando o primeiro gráfico nota-se, que o maior ângulo atingido (Theta) é dos braços, que coincide no início com ângulo B. O valor máximo de ângulo de rotação é $5,7^\circ$ (medidor Theta) atingido com torque de 445 kN·mm. O valor 7° , mostrado no gráfico não é verdadeiro, é um erro, devido a desvio dos braços depois de aplicação dos torque. Pela mesma razão no processo de descarga o ângulo Theta no volta ao seu valor inicial. O ângulo R atingiu valor menos de 1° .

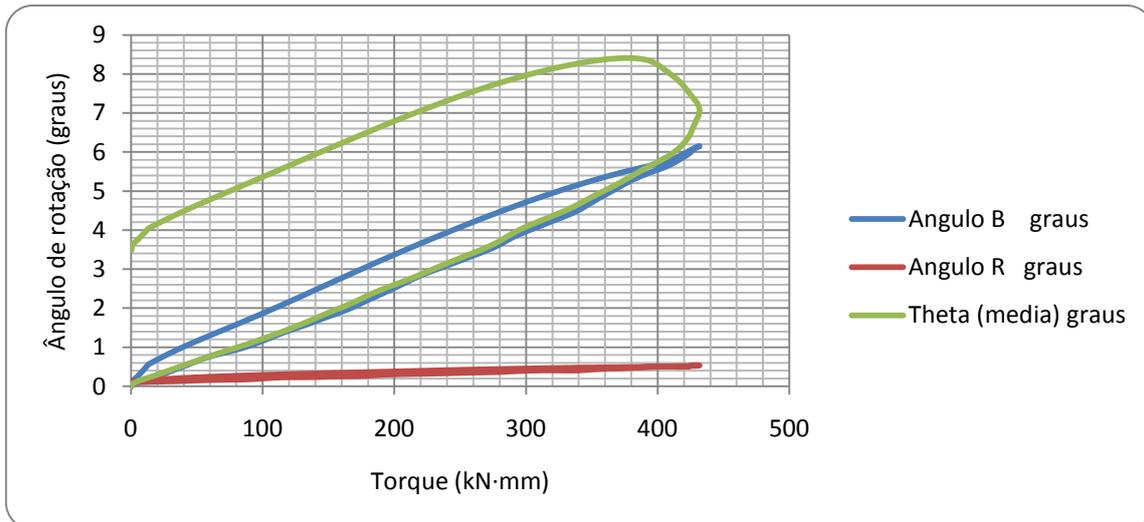


Figura 4.53 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 1, Fissurado 1)

No segundo gráfico as tendências são as mesmas, o ângulo máximo aumenta até 7° com o torque de $430 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ (menor que no primeiro ensaio). O ângulo R permanece menor de 1° e diminui algumas decimais.

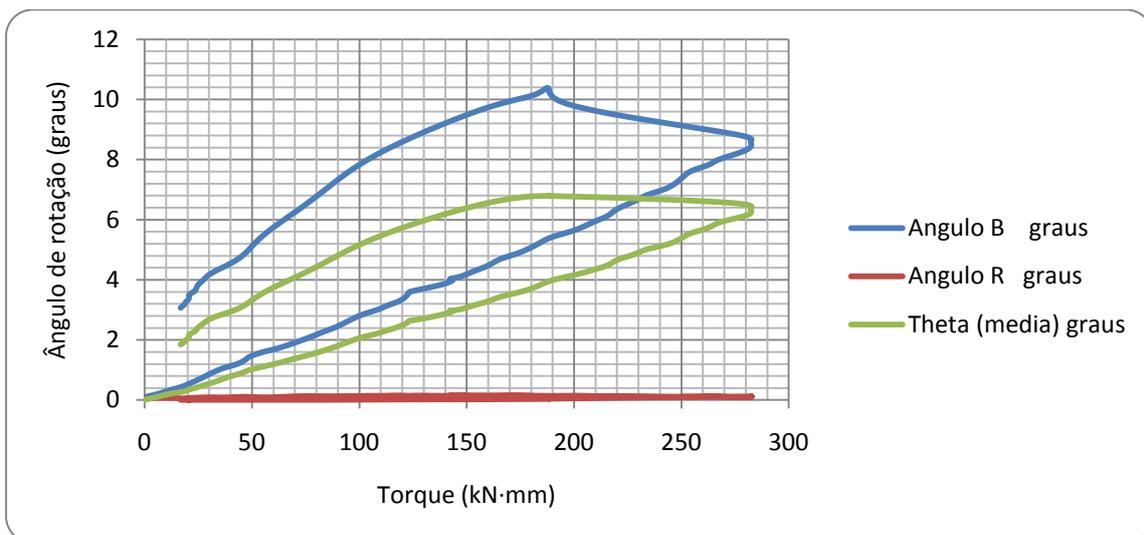


Figura 4.54 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 1, Fissurado 2)

No terceiro ensaio, quando a fissura ficou bastante aberta ($62,7 \text{ cm}$) a tendência do gráfico muda. O medidor B atinge o ângulo máximo ($8,4^\circ$), enquanto a rotação dos braços só chega até $6,4^\circ$. As razões possíveis deste fenômeno são:

- Deslocamento do centro de rotação (programa de reconhecimento de imagem considerava um ponto fixo como centro de rotação que na realidade se deslocava alguns milímetros horizontalmente), que provocou o aumento de ângulo

B. O deslocamento horizontal do centro aumentava com a flexibilidade do colmo, que crescia com a abertura de fissura.

- Inexatidão de medições dos LVDT e como consequência - inexatidão de calculo de ângulo de rotação Theta.

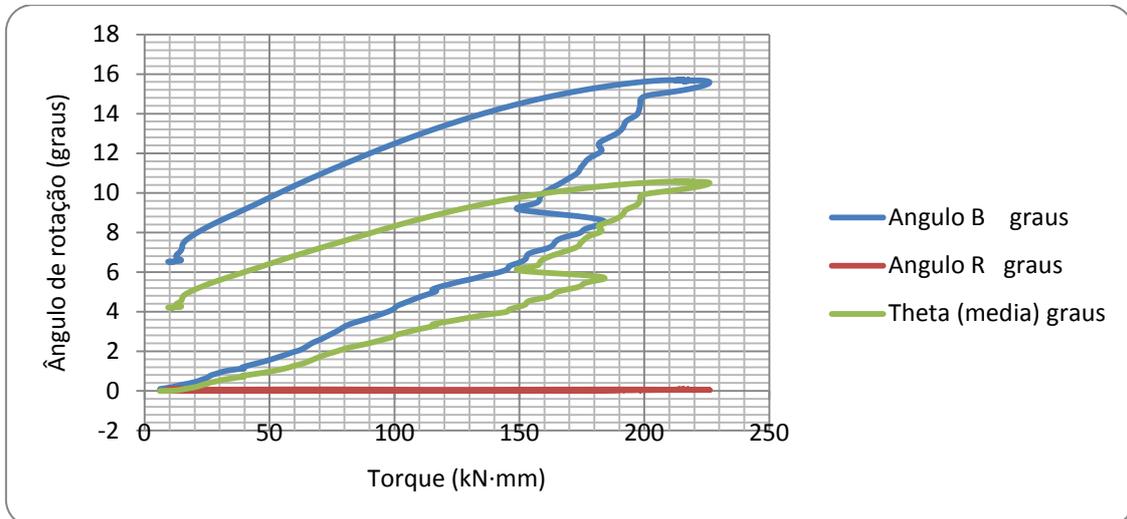


Figura 4.55 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 1, Fissurado 3)

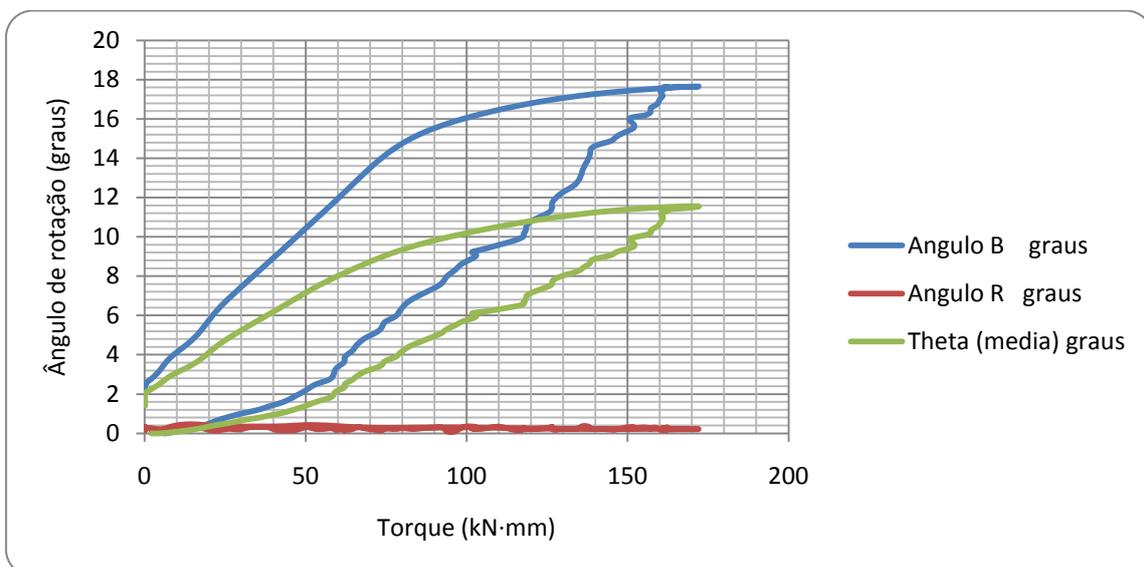


Figura 4.56 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 1, Fissurado 4)

No quarto e quinto ensaio mantém-se a tendência do terceiro. O medidor B atinge maiores ângulos de rotação ($15,6^\circ$ e $17,6^\circ$ respectivamente) com o torque que diminui de $228 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ até $172 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ (tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Valores máximos de ângulo de rotação do colmo 1

	Theta (graus)	B (graus)	R (graus)	Torque (kN·mm)
SF	5,7	4,8	0,7	445
R 1	7	6,2	0,5	435
R 2	6,4	8,8	0,1	282
R 3	10,4	15,6	0	226
R 4	11,6	17,6	0,2	172

Em relação a ângulo R, nos últimos 3 ensaios seu valor permanece quase em zero, devido a aumento da fissura (o torque aplicado só roda a extremidade livre, deixando a parte próxima do engaste praticamente imóvel).

4.2.2

Análise do colmo 2

O segundo colmo foi analisado da mesma forma que o primeiro, o ângulo de rotação foi medido nos três pontos diferentes do colmo (figura 4.57). Posições dos pontos é diferente do colmo 1 devido a posições diferentes das diafragmas e Strain Gauges.

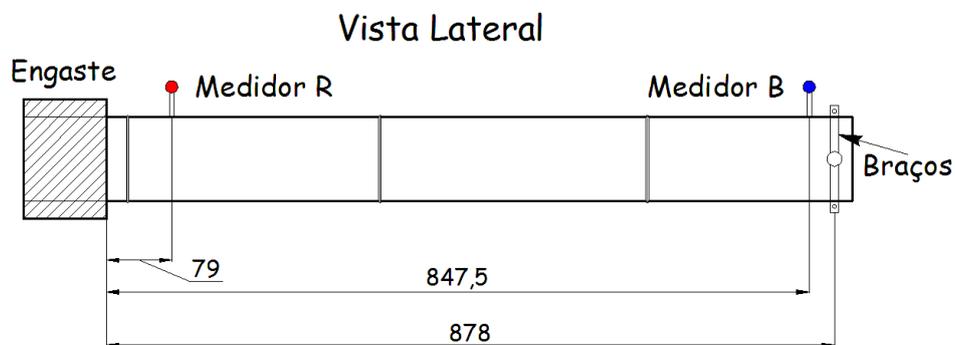


Figura 4.57 - Posição dos medidores de ângulo B e R (Colmo 2)

Nas figuras 4.58 – 4.62 estão mostrados os gráficos dos ângulo de rotação versus torque aplicado do colmo 2 (seção fechada, seção aberta 1, 2, 3, 4).

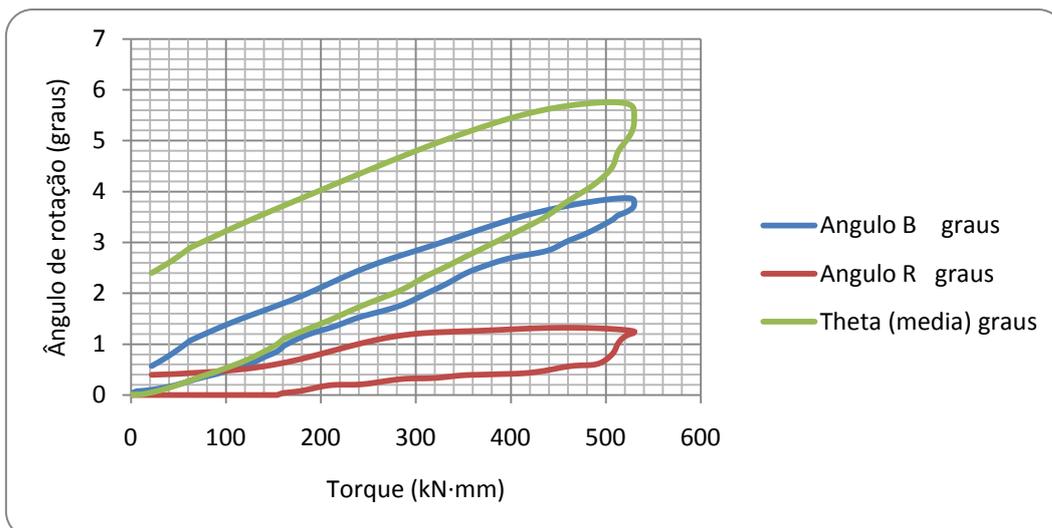


Figura 4.58 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 2, seção fechada)

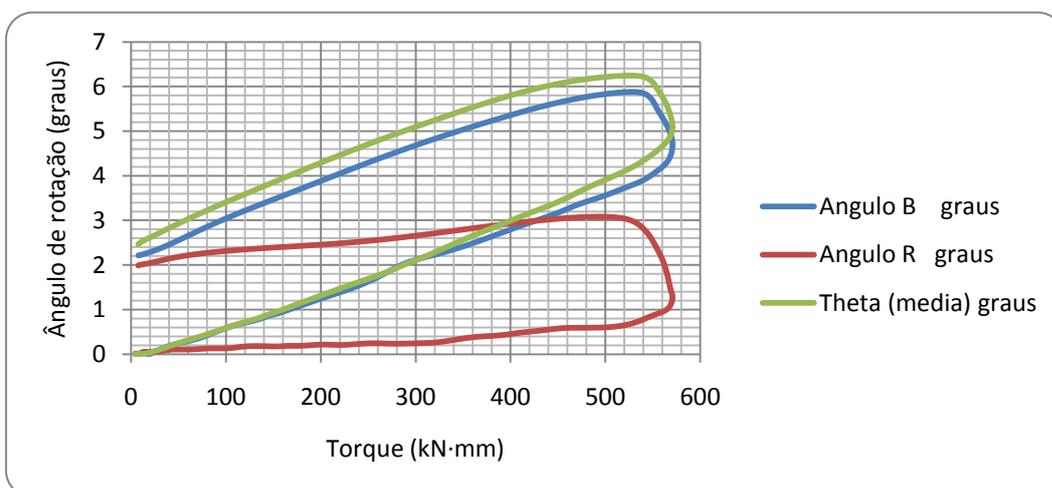


Figura 4.59 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 2, Fissurado 1)

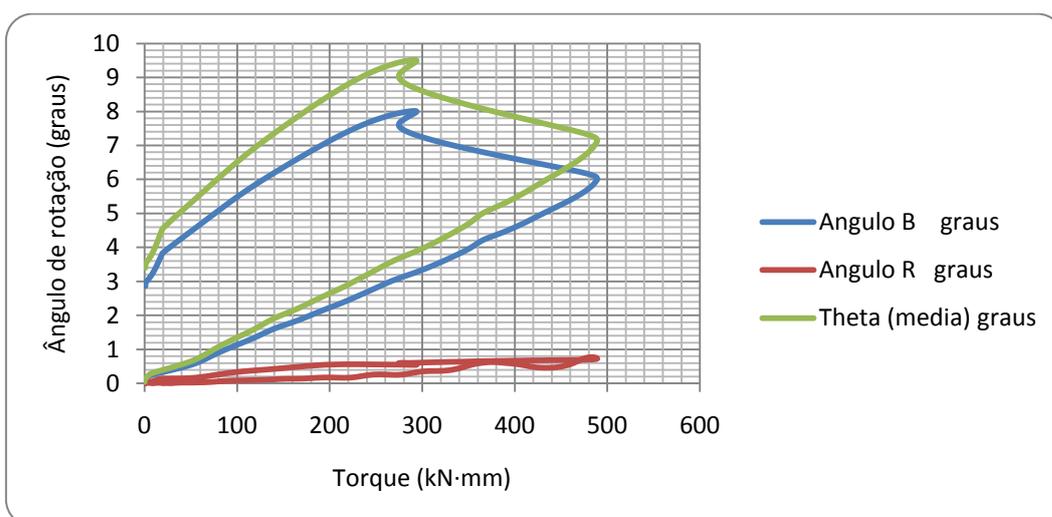


Figura 4.60 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 2, Fissurado 2)

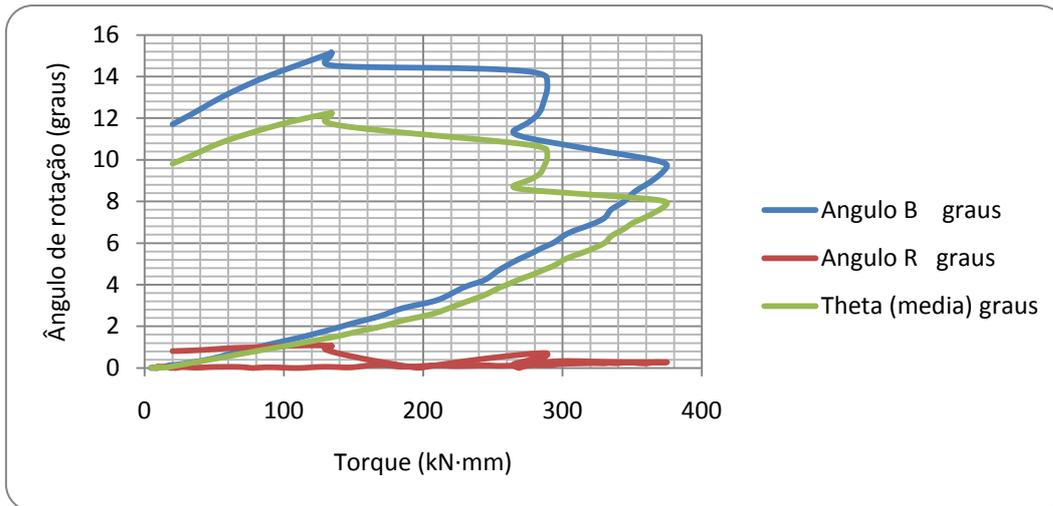


Figura 4.61 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 2, Fissurado 3)

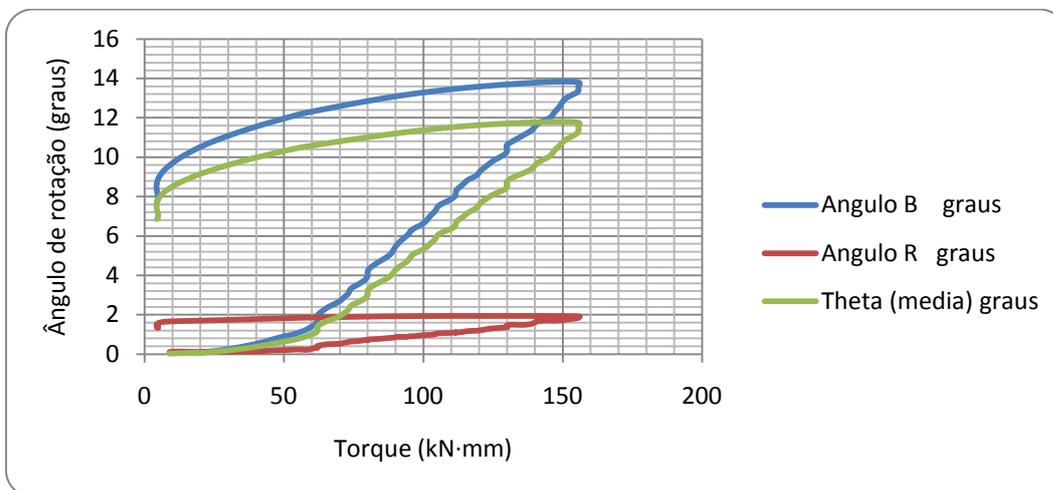


Figura 4.62 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 2, Fissurado 4)

Analisando os gráficos ângulo de rotação versus torque do colmo 2 nota-se o comportamento similar com colmo 1. O ângulo máximo de rotação aumenta de primeiro ensaio até o ultimo de 5,8° até 14° e com torque diminuindo de 530 kN·mm até 158 kN·mm respectivamente. A mudança do comportamento do ângulo B começa a partir de quarto ensaio, onde o ângulo B supera ângulo Theta, chegando até o valor 9,8° enquanto o ângulo Theta é 7,8°. A diferença entre ângulo B e ângulo Theta permanece igual a 2° no quarto e quinto ensaios (tabela 4.2)

Tabela 4.2 - Valores máximos de ângulo de rotação do colmo 2

	Theta (graus)	B (graus)	R (graus)	Torque (kN·mm)
SF	5,6	3,8	1,2	530
R 1	5	4,6	1,2	570
R 2	7,2	6	0,8	490
R 3	8	9,8	0,3	375
R 4	11,6	13,8	2	158

O valor de ângulo R permanece 1,2° (no primeiro e segundo ensaio), depois baixa até quase zero no quarto e sobe de novo no quinto até 2°. Vários saltos nos gráficos devem-se aos saltos do sistema, que ocorria toda vez que a abertura do colmo crescia.

4.2.3

Análise de colmo 3

Análise do terceiro colmo foi feito de forma similar com primeiro e segundo. Posição dos medidores está mostrado na figura 4.63.

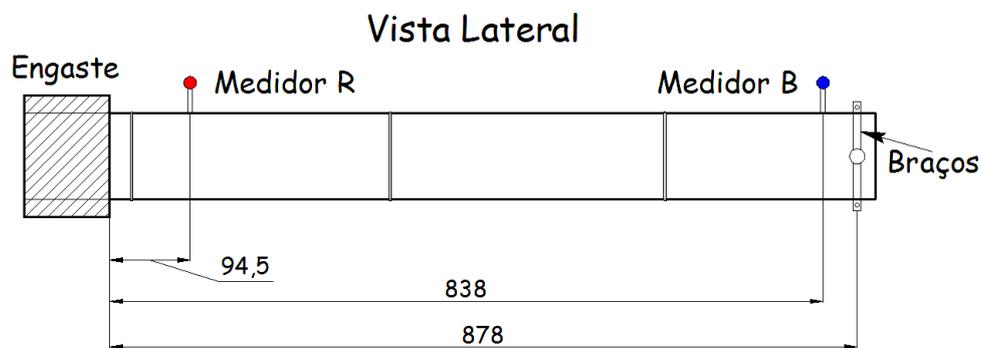


Figura 4.63 - Posição dos medidores de ângulo B e R (Colmo 3)

Seguem os gráficos dos ângulo de rotação versus torque aplicado do colmo 3 (seção fechada, seção aberta 1, 2, 3, 4).

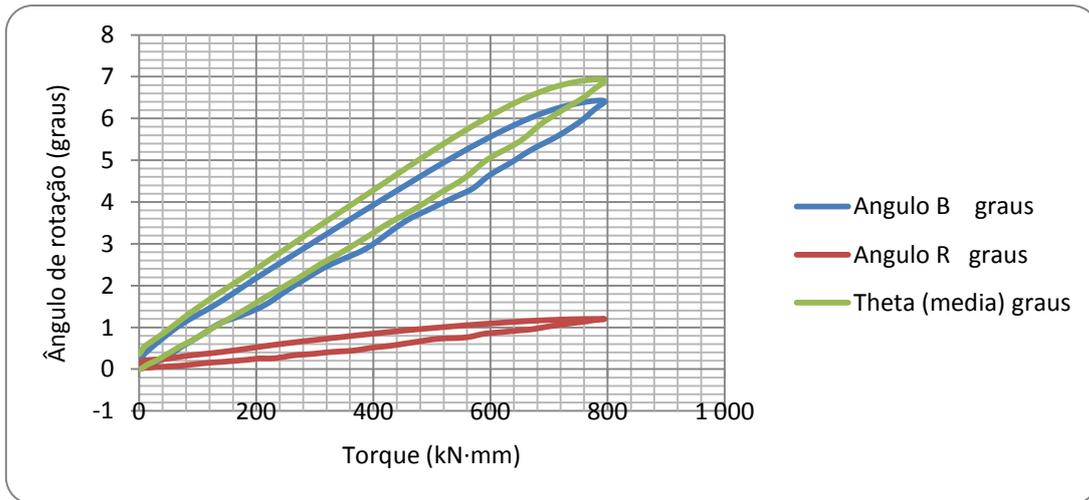


Figura 4.64 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 3, seção fechada)

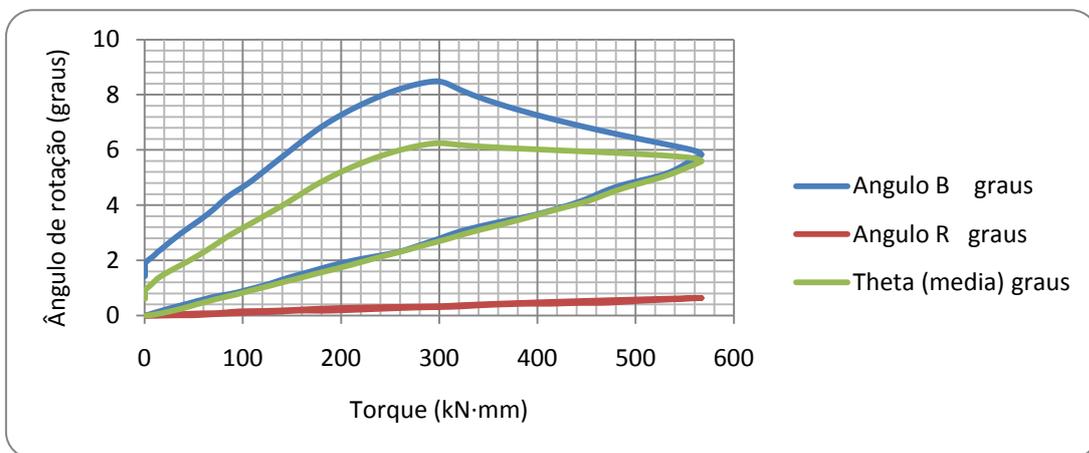


Figura 4.65 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 3, Fissurado 1)

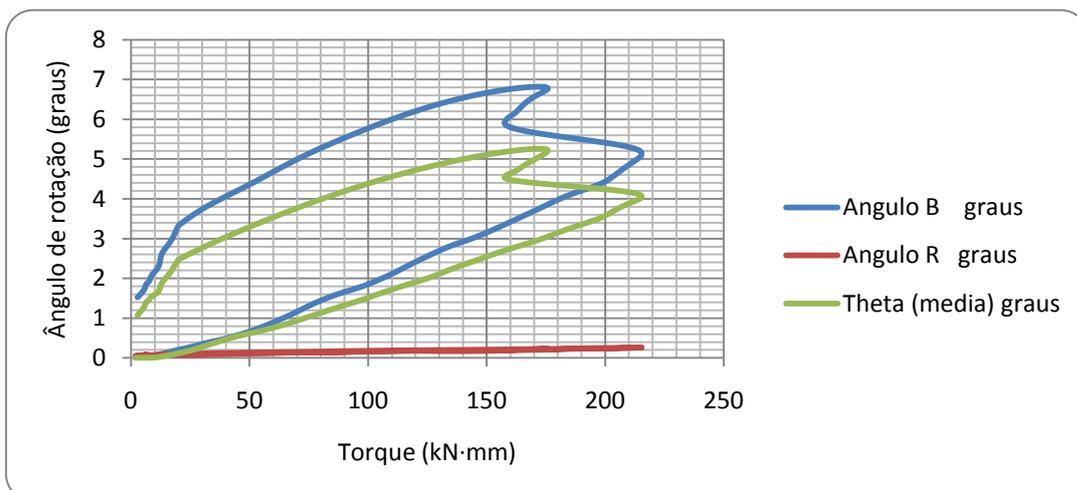


Figura 4.66 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 3, Fissurado 2)

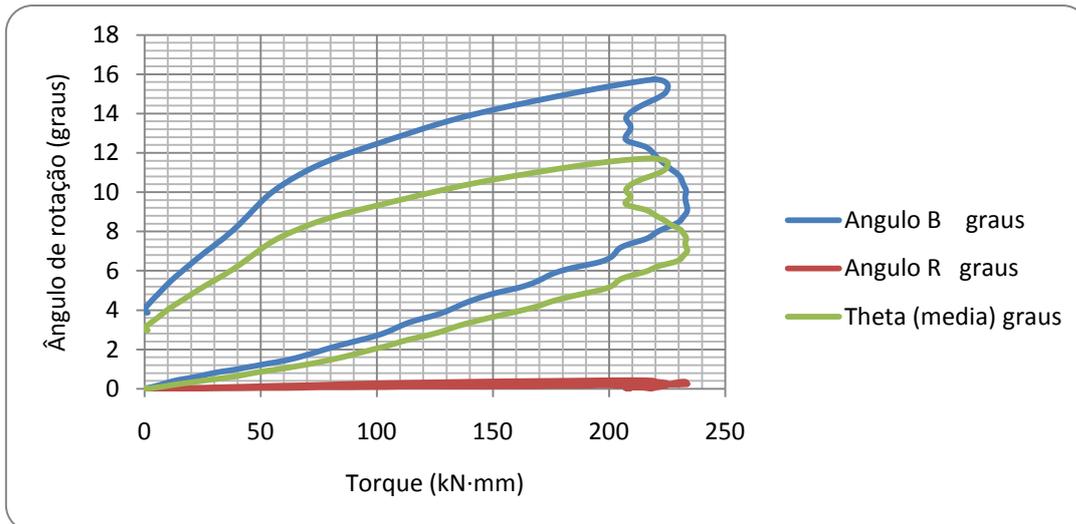


Figura 4.67 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 3, Fissurado 3)

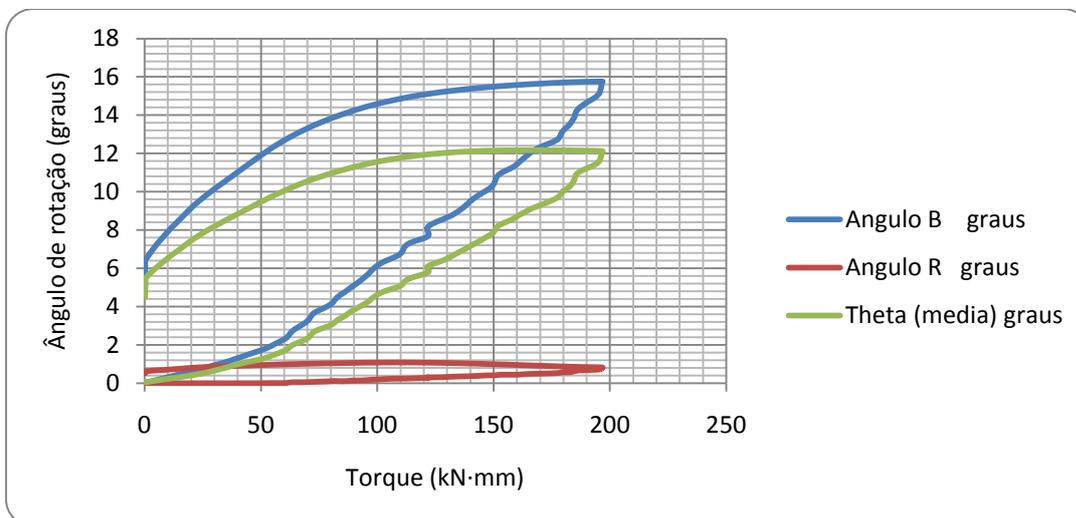


Figura 4.68 - Ângulo de rotação versus torque (Colmo 3, Fissurado 4)

Analisando os gráficos ângulo de rotação versus torque do colmo 3 nota-se o comportamento similar com colmo 1 e 2. O ângulo máximo de rotação aumenta de primeiro ensaio até o ultimo de 7° até $15,8^{\circ}$ com torque diminuindo de $800 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ até $198 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ respectivamente. A mudança do comportamento do ângulo B começa a partir de terceiro ensaio, onde o ângulo B supera ângulo Theta, chegando até o valor $5,2^{\circ}$ enquanto o ângulo Theta chega até 4° . A diferença entre ângulo B e ângulo Theta permanece igual a 4° no quarto e quinto ensaios (tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Valores máximos de ângulo de rotação do colmo 3

	Theta (graus)	B (graus)	R (graus)	Torque (kN·mm)
SF	7	6,4	1,2	800
R 1	5,6	5,8	0,7	565
R 2	4	5,1	0,3	215
R 3	6,8	9,2	0,2	235
R 4	12	15,8	0,6	198

O valor de ângulo R diminui de 1,2° (no primeiro ensaio) até quase zero no quarto e sobe de novo no quinto até 0,6°.

4.2.4

Comparação dos resultados

Analisando e comparando o comportamento dos três colmos em relação ao ângulo de torção notam-se as seguintes tendências :

- a tendência do comportamento dos ângulos Theta e B coincide com diferença de 1-2° (Theta é maior que B) até ambos valores chegarem o 7° e o torque diminuir até 400 kN·mm (tabela 4.4). Neste ponto a tendência muda e ângulo B fica maior que ângulo Theta (com a diferença media de 4° entre os dois).
- ângulo R diminui com aumento das fissuras, sendo o menor no quarto ensaio (Fissurado 3) e aumenta até 60% do valor inicial no quinto (seção aberta).

Tabela 4.4 - Valores máximos de ângulo de rotação dos três colmos

Torque (kN·mm)	Theta (graus)	B (graus)	R (graus)
158	11,6	13,8	2
172	11,6	17,6	0,2
198	12	15,8	0,6
226	10,4	15,6	0
235	6,8	9,2	0,2
282	6,4	8,8	0,1
375	8	9,8	0,3
435	7	6,2	0,5
445	5,7	4,8	0,7
490	7,2	6	0,8
530	5,6	3,8	1,2
565	5,6	5,8	0,7
570	5	4,6	1,2
800	7	6,4	1,2

Tabela 4.4 representa os ângulos máximos de rotação dos três colmos, ordenados pelo aumento de torque aplicado (sem considerar a diferença das posições dos medidores e aberturas das fissuras).

4.3

Modulo de cisalhamento (ensaios de torção pura)

4.3.1

Análise dos três colmos

Módulo de cisalhamento foi calculado a partir dos dados dos ângulo de rotação, torque e momento de inércia. A tabela 4.5 representa os módulos de cisalhamento, encontrados nos ensaios dos colmos com seção fechada, calculados a partir do ângulo de rotação dos braços, posicionados na distancia de 878 mm do engaste. Para colmo 2 foram feitos dois ensaios seguidos.

Tabela 4.5 - Módulos de cisalhamento G_{13} (878 mm do engaste)

	Colmo 1	Colmo 2	Colmo 3
Ensaio 1	1242,2 MPa	1117,5 MPa	1252 MPa
Ensaio 2		980,8 MPa	

Valor médio dos módulos de cisalhamento da tabela 4.5 é **1148 MPa**, que é quase duas vezes maior, que valor encontrado por Torres (665 MPa) da mesma espécie de bambu. As razões possíveis desta diferença são os seguintes:

- Corpo de prova, analisado por Torres, foi o único corpo de prova analisado desta espécie e continha vestígios da ataque de insetos, que foi descoberto depois do ensaio;
- Corpo de prova de Torres tinha um metro de comprimento e a medição do ângulo de rotação foi feita na sua extremidade (1000 mm) que é diferente deste caso, onde as medições foram feitas na distância 878 mm (este é um parâmetro muito importante, que será explicado a seguir).

Comparando valor médio encontrado com valores dos G_{13} das outras espécies (tabela 2.1) nota-se que o valor mais próximo do valor encontrado no presente trabalho é G_{13} da espécie Metake (910 MPa), encontrado por Torres com o corpo de prova do mesmo comprimento (1000 mm).

Os valores de módulo de cisalhamento de *Guádua Angustifolia*, encontrados pelo Sanches e Prieto (628 MPa), Martinez, D (712 MPa) e García, J. (581 MPa) são menores, que valor encontrado no presente trabalho.

Neste trabalho os ângulos de rotação foram medidos no três pontos diferentes nos cinco ensaio diferentes para cada colmo e os módulos de cisalhamento foram calculados para cada ponto e cada ensaio segundo as distancias do afastamento dos medidores de ângulo e momentos de inércia correspondentes. No entanto, a discrepância dos valores encontrados foi muito grande, por isso estes dados não foram constados no presente trabalho.

4.4

Análise das deformações dos ensaio de flexão pura

4.4.1

Análise de colmo 1

Neste trabalho foram feitos 5 ensaios de flexão pura. Flexão do colmo 1 foi feito só para seção aberta. Segue o gráfico das deformações versus carga aplicada. Os Strain Gauges foram posicionados assim como esta mostrado nas figuras 4.1– 4.6. Na figura 4.69 nota-se, que a maioria e as maiores deformações são positivas que significa que os Strain Gauges foram tracionados. Como a maior parte dos extensômetros fica na parte superior do colmo é lógico que fiquem tracionados com a carga aplicada para baixo. Gráfico tem forma de passos, devido a forma de aplicação da carga, as peças de 1, 2 e 5 kilos foram aplicadas manualmente um por um. Irregularidade nos passos surgiu pelos ruídos nas leituras das deformações, que não foi tão notável nas deformações dos ensaios de torção, porque os valores eram de ordem de grandeza superior.

As maiores deformações ($310 \mu\epsilon$) surgem com a carga de 390 N.

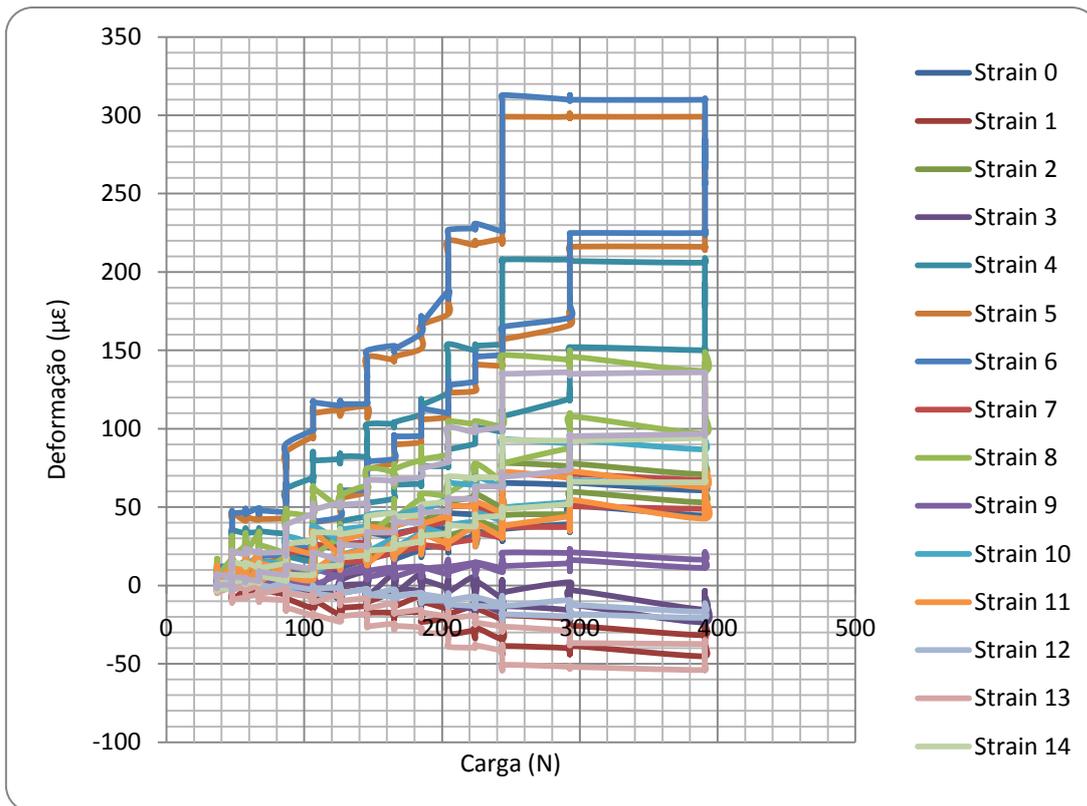


Figura 4.69 - Deformações versus Carga aplicada, colmo 1 (seção aberta)

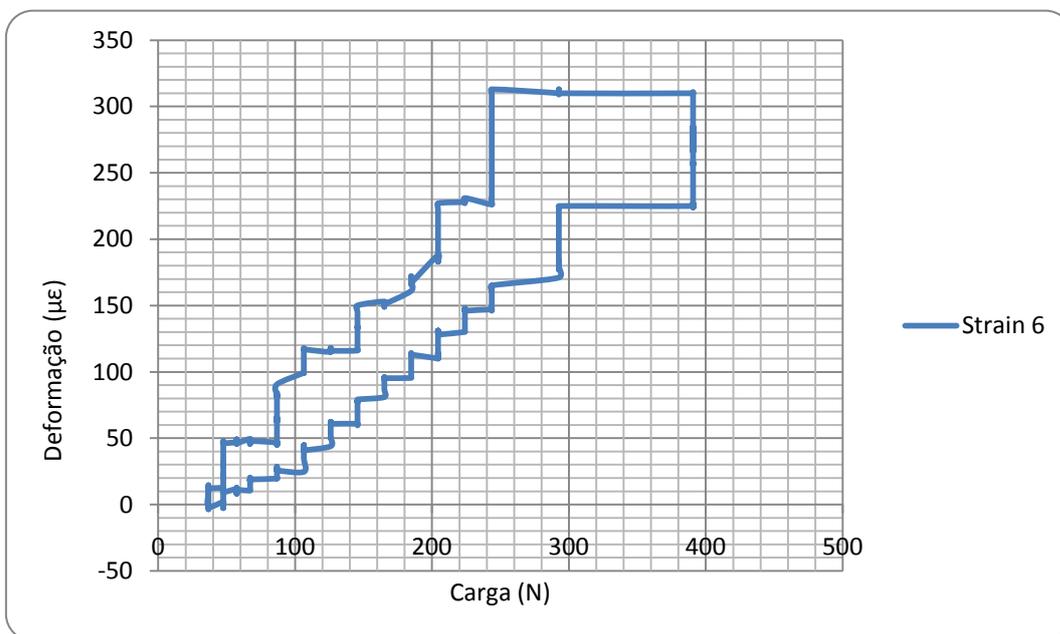


Figura 4.70 - Deformações versus Carga aplicada, colmo 1 (seção aberta) (Strain 6)

Para poder analisar comportamento das deformações no processo de descarga foi apresentado o gráfico das deformações versus carga do Strain Gauge 6 (o que apresentou maiores deformações). Gráfico não apresenta deformações residuais, linha de descarga é mais regular que a linha de carga.

Para análise mais detalhado foram graficadas as deformações segundo suas posições no colmo com a carga de 224 N.

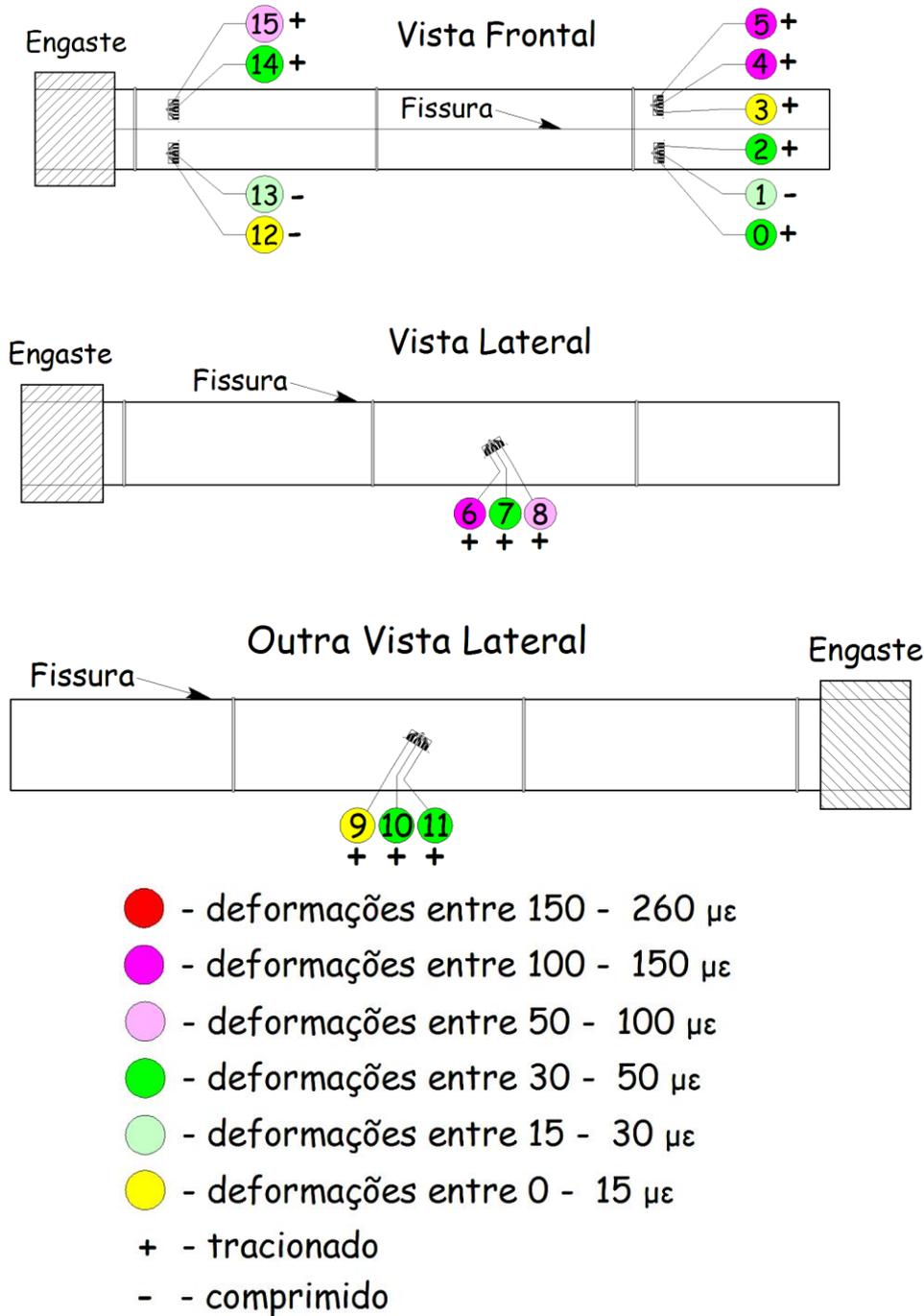


Figura 4.71 - As deformações com a carga de 224 N para colmo 1 (seção aberta)

Analisando a figura 4.71 nota-se, que a parte de cima da vista frontal é mais deformada que a parte de baixo. A razão disso pode ser explicada de varias formas:

- Como o colmo foi submetido a torção antes de ensaio de flexão podem permanecer as tensões residuais nos Strain Gauge 4, 5 e 15;
- O colmo não estava em posição exata, mostrada na figura 4.71, estava torcido a $1-2^\circ$;
- Os Strain Gauges não foram colados simetricamente com respeito a fissura e na direção exata das fibras, alguns foram inclinados a $1-2^\circ$.

O fato que os Strain Gauges 1 e 13 ficaram comprimidos em vez de ser tracionados (os Strain Gauge coincidem com direção das fibras) confirme as razões citados em cima.

As deformações máximas surgem nos Strain Gauges 4, 5 e 6 variam entre 100-150 $\mu\epsilon$.

Os Strain Gauge menos deformados são 3 e 12 com deformações menos de 15 $\mu\epsilon$, posicionados na mesma direção (inclinados a 45° para baixo do sentido das fibras). Parte próxima da extremidade livre apresenta maiores deformações, que a parte próxima do engaste.

4.4.2

Análise de colmo 2

Para colmo 2 foram feitos 2 ensaios de flexão: primeiro – ensaio de colmo inteiro (seção fechada), segundo – ensaio de colmo fissurado (seção aberta). Primeiro ensaio foi feito antes dos ensaios de torção, segundo – depois.

Seguem os gráficos das deformações versus carga aplicada dos dois ensaios. Posições exatas dos Strain Gauges – figuras 4.23 e 4.24.

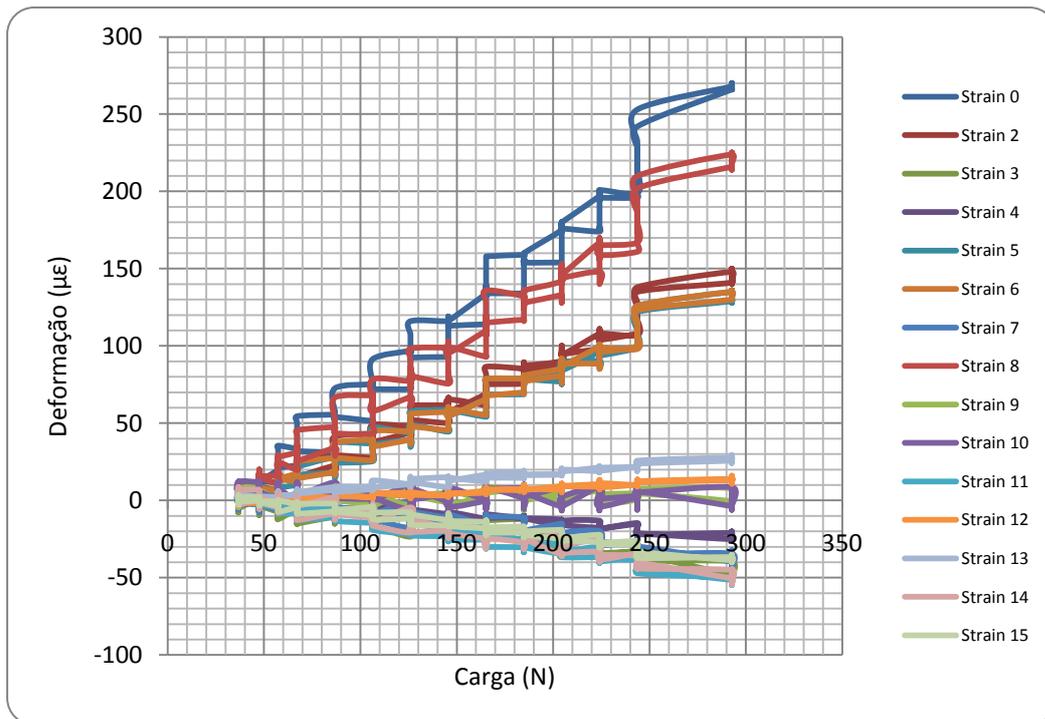


Figura 4.72 - Deformações versus Carga aplicada, colmo 2 (seção fechada)

Analisando ambos gráficos nota-se, que o colmo sofre maiores deformações com seção aberta (mesma carga aplicada). A tendência dos gráficos em concentrar a maioria das deformações em positivo (Strain Gauges tracionados) permanece a mesma assim como caráter do gráfico (em forma de passos). Os passos dos gráficos tem forma mais regular que confirma a menor presença de ruído nestes dados.

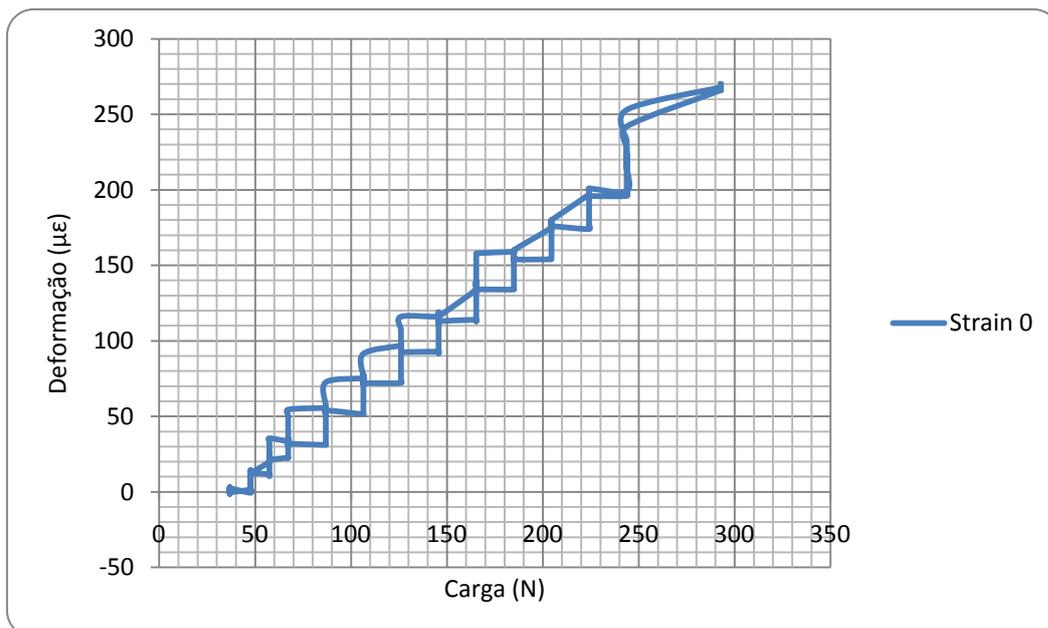


Figura 4.73 - Deformações versus Carga aplicada, colmo 2 (seção fechada) (Strain 0)

Gráfico das deformações máximas versus carga aplicada da seção aberta está apresentado na figura 4.74. No gráfico notam-se os segmentos, quando carga e deformações crescem ao mesmo tempo, isso deve-se a anotação mais exata das cargas aplicadas, considerado que as anotações foram feitas manualmente. Deformações residuais neste caso também não foram detectadas.

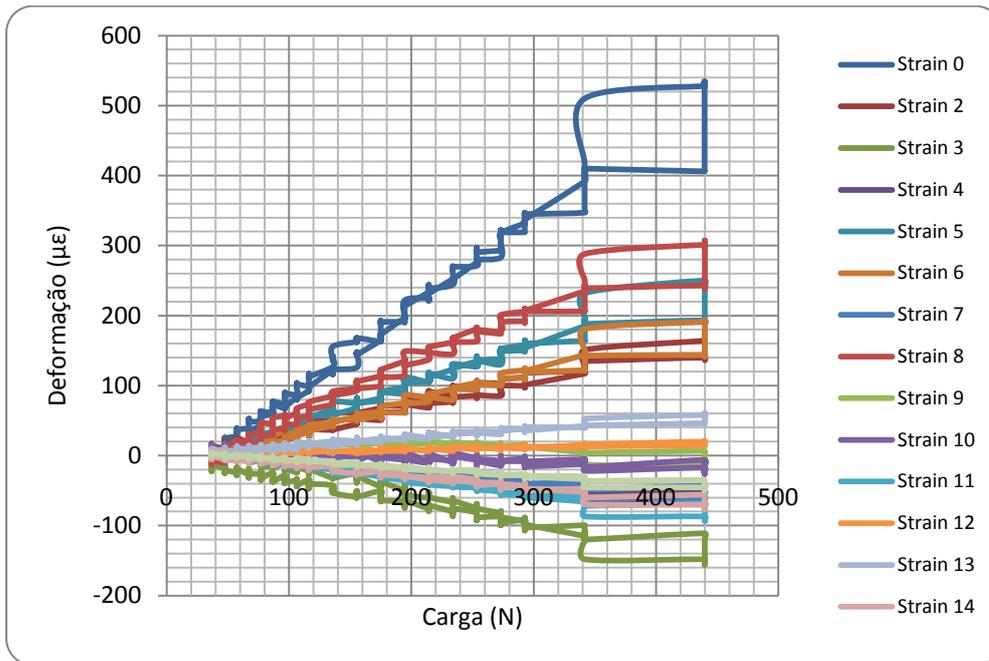


Figura 4.74 - Deformações versus Carga aplicada, colmo 2 (seção aberta)

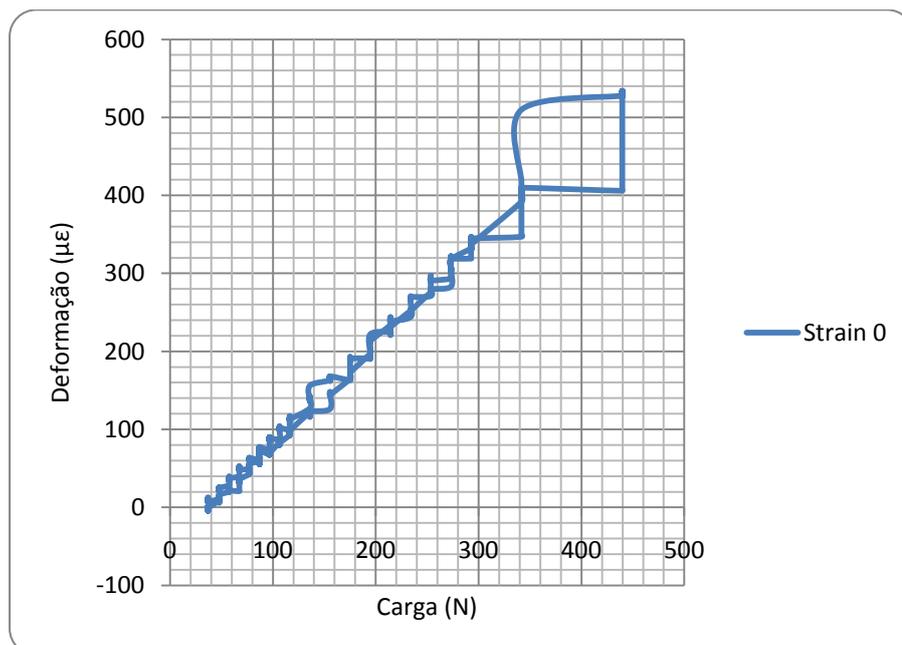


Figura 4.75 - Deformações versus Carga aplicada ,colmo 2 (seção aberta) (Strain 0)

Gráfico 4.75 apresenta a maior coincidência das linhas de carga e descarga que demonstra a precisão do ensaio realizado.

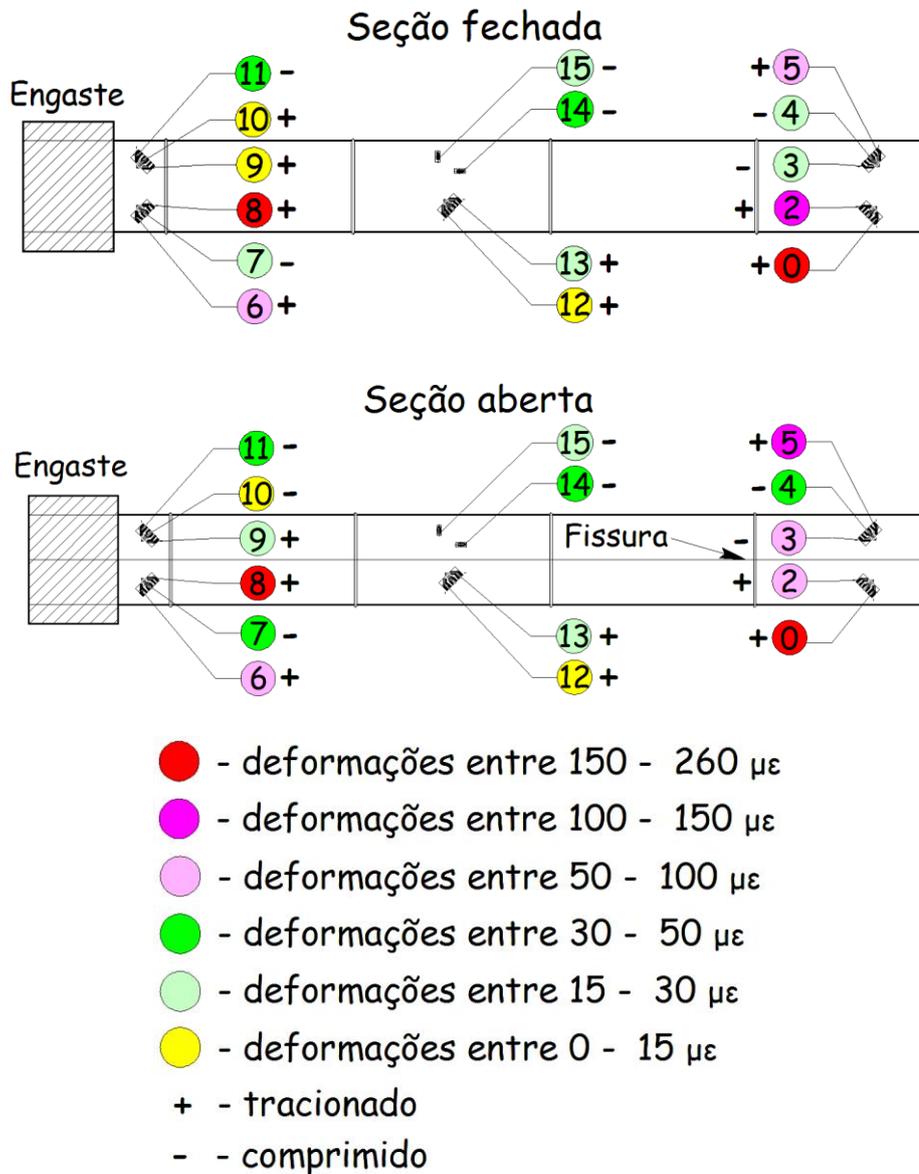


Figura 4.76 - As deformações do colmo 2 (seção aberta e seção fechada) com a carga de 224 e 234 N respectivamente

Na figura 4.76 estão mostradas as deformações que apresentou colmo 2 nos ensaios com seções fechada e aberta com a carga de 224 e 234 N respectivamente. A carga no ensaio de seção aberta foi aplicada da forma diferente, por isso foram considerados dois casos com a diferença de 10 N. Na figura nota-se similaridade dos estados de deformações dos ambos casos. Os Strain Gauges que apresentaram maiores deformações permanecem os mesmos,

nota-se aumento das deformações nos Strain Gauges 3, 4, 5, 7 e 9. Assimetria das deformações apresentadas deve-se a um ou mais fatores, citados no capítulo 4.4.1. Maiores deformações apresentou a extremidade livre (ensaio de seção aberta), onde a maioria varia 50 até 260 $\mu\epsilon$, sendo Strain Gauge 0 o mais deformado (posicionado a 90° com sentido das fibras, Strain Gauge 5 – segunda maior deformação na extremidade (posicionado de forma simétrica com Strain Gauge 0). Outro defletômetro, que apresentou deformações de 162 $\mu\epsilon$ é Strain Gauge 8, posicionado no sentido coincidente com sentido das fibras, na parte próxima de engaste. Todos os Strain Gauges, que apresentaram as maiores deformações estavam tracionados.

4.4.3

Análise de colmo 3

Ensaio de flexão pura de colmo 3 foram feitos de forma similar com os ensaios de colmo 2. Seguem os gráficos das deformações versus carga aplicada. Posicionamento dos Strain Gauges esta mostrado nas figuras 4.37 e 4.38.

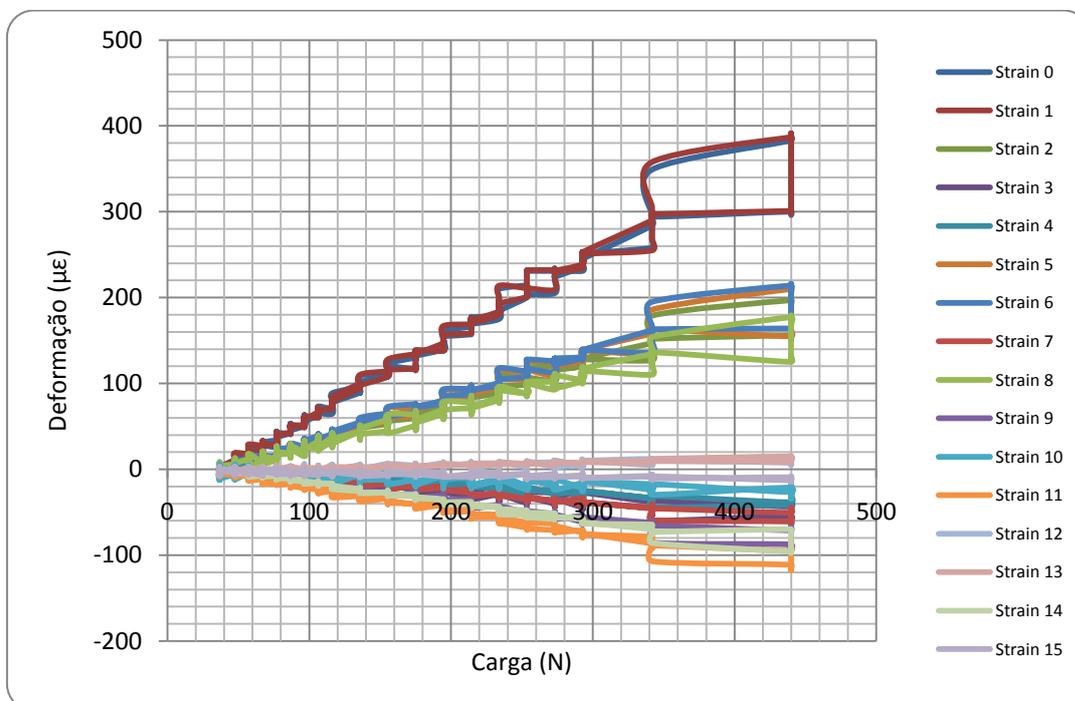


Figura 4.77 - Deformações versus Carga aplicada, colmo 3 (seção fechada)

Analisando os gráficos das deformações versus carga do colmo 3 nota-se, que com a mesma carga de 420 N a diferença de deformações máximas é muito pequena (10 $\mu\epsilon$). As deformações se dividem em 3 grupos: primeiro grupo – as deformações máximas positivas (Strain Gauges tracionados), que incluem os defletômetros 0 e 1, segundo grupo – as deformações médias positivas (os Strain Gauges 2, 5, 6 e 8) e o ultimo grupo – deformações pequenas (principalmente negativas (os Strain Gauges comprimidos)). Esta divisão mantém-se no gráfico das deformações da seção aberta.

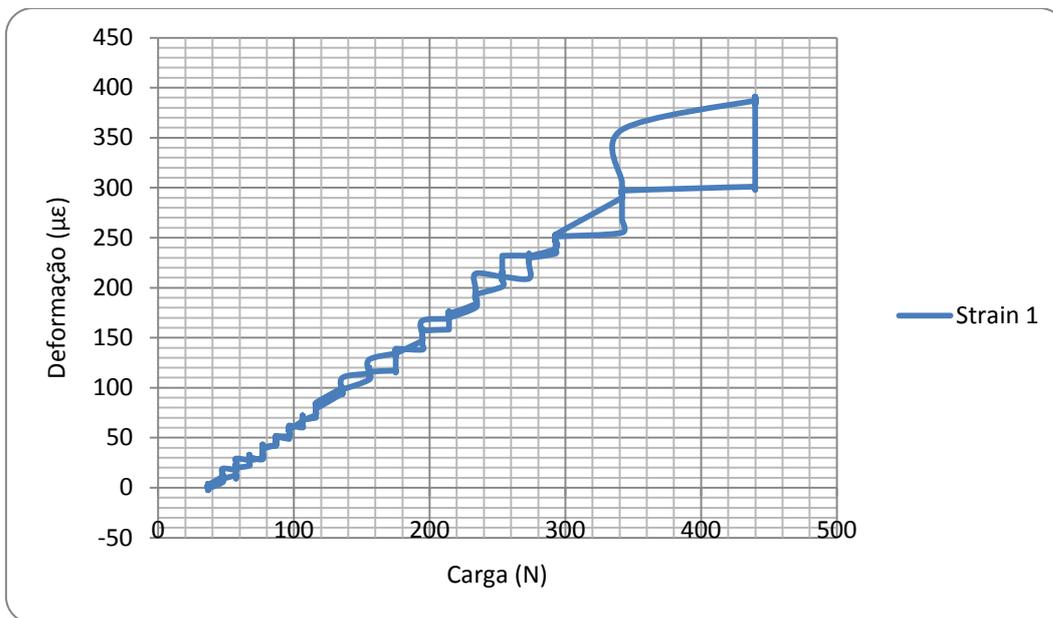


Figura 4.78 - Deformações versus Carga aplicada, colmo 3 (seção fechada) (Strain 1)

Na figura 4.78 está mostrado o gráfico das deformações versus carga do Strain 1 (o qual apresentou maiores deformações). No gráfico nota-se que as linhas de carga e descarga praticamente coincidem exceto o segmento, quando foi aplicado e tirado o ultimo bloco de carga (100N).

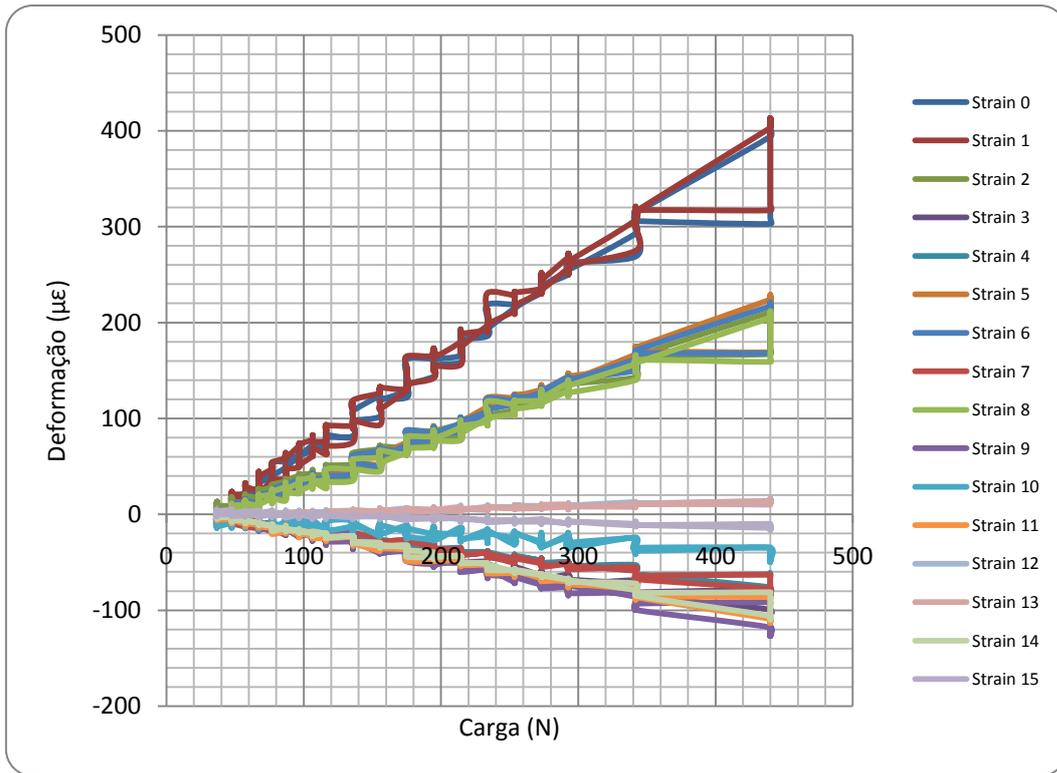


Figura 4.79 - Deformações versus Carga aplicada, colmo 3 (seção aberta)

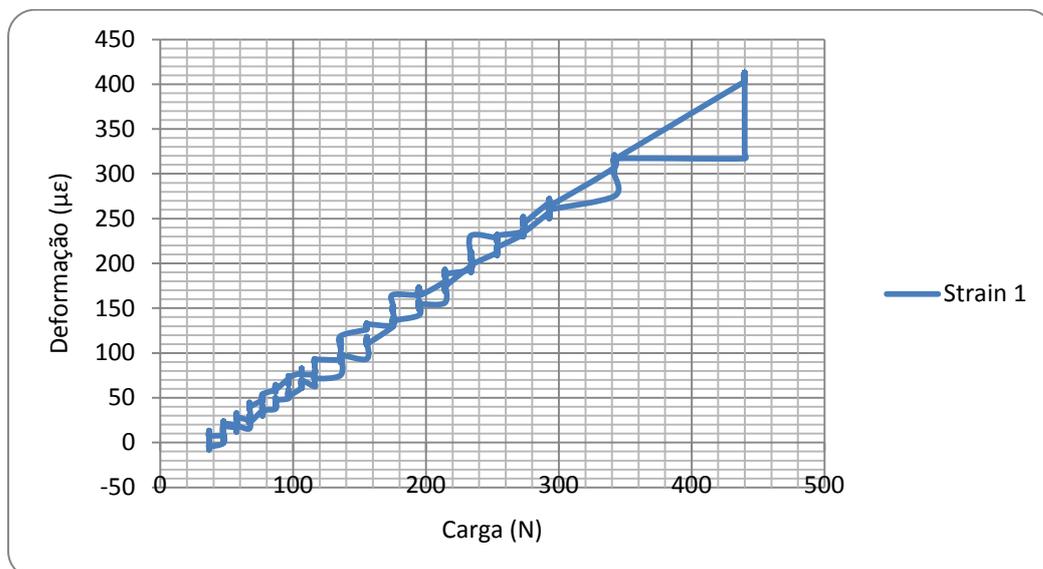


Figura 4.80 - Deformações versus Carga aplicada , colmo 3 (seção aberta) (Strain 1)

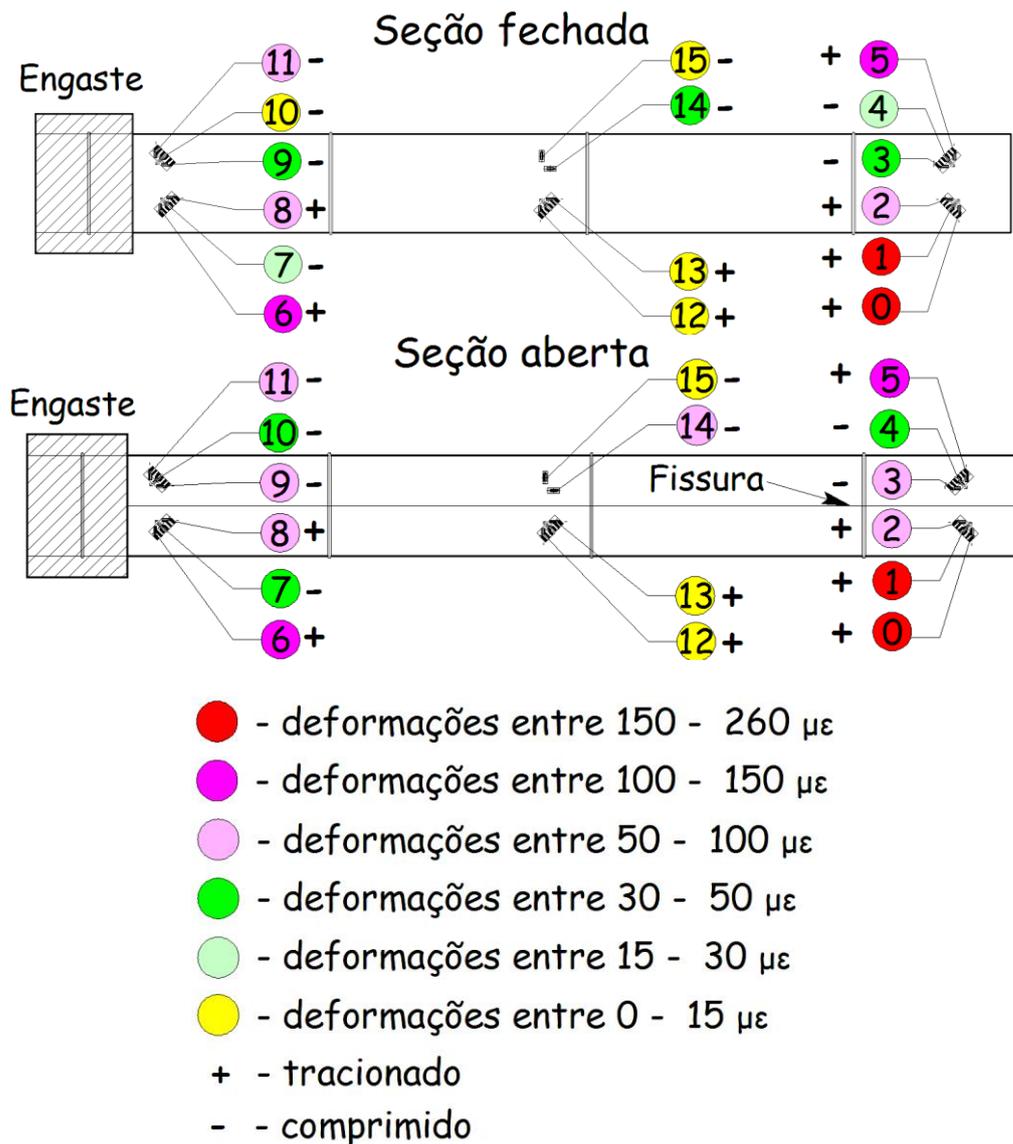


Figura 4.81 - As deformações do colmo 3 (seção aberta e seção fechada) com a carga de 234 N

Na figura 4.81 está mostrado a distribuição das deformações no colmo 3 nos ensaios de colmo inteiro e colmo fissurado com a carga de 234N. De novo nota-se similaridade dos ambos casos, colmo fissurado é mais deformado que colmo inteiro, a distribuição das deformações permanece igual nos dois casos. A extremidade livre é a parte mais deformada do colmo, as deformações máximas atingem 200 $\mu\epsilon$. A parte menos deformada é a parte média, tanto no colmo 2, que no colmo 3.

4.5

Módulo de elasticidade longitudinal E_y (ensaios de flexão pura)

Módulo de elasticidade longitudinal foi calculado de acordo com procedimento descrito no capítulo 3.3.2. Os dados obtidos foram divididos para análise em dois grupos:

- E_y , calculado utilizando os dados dos ensaios da seção fechada
- E_y , calculado utilizando os dados dos ensaios da seção aberta

4.5.1

Seção fechada

Analisando os módulos de elasticidade obtidos através do análise dos colmos inteiros nota-se certa discrepância dos dados. Esta discrepância deve-se às características mecânicas dos corpos de prova. Por isso foi introduzido o novo parâmetro, que apresenta a relação entre diâmetro médio e espessura da parede de cada um dos três colmos. O parâmetro λ (esbeltez diametral) não foi usado devido a pouca diferença entre valores obtidos para três colmos (tabela 4.6). Este parâmetro é mais usado para caracterização das espécies.

Tabela 4.6 - Esbeltez diametral dos três colmos

	Esbeltez Diametral
Colmo 2	0,7978
Colmo 3	0,8011
Colmo 1	0,8069

Na tabela 4.7 estão apresentados os dados dos módulos de elasticidade dos colmos 2 e 3 segundo pontos, nos quais os módulos E_y foram calculados. Na figura 4.82 está mostrado posicionamento dos LVDT 1 e 2 para ambos corpos de prova.

Tabela 4.7 - Distribuição dos E_y (GPa) pelo comprimento do colmo dependendo do razão Diâmetro médio/Espessura da parede (seção fechada)

	Módulo de elasticidade longitudinal, E_y (Gpa)	Distância de engaste até ponto de medição, mm	Módulo de elasticidade longitudinal, E_y (Gpa)	Distância de engaste até ponto de medição, mm	Razão Diâmetro médio/Espessura de parede
Colmo 2 SF	2,60	320	4,54	838	8,89
Colmo 3 SF	4,08	321	6,77	834	9,06

Como não foi realizado ensaio de flexão para colmo 1 inteiro, a quantidade de dados não permite fazer o análise completo. Nota-se que módulo E_y aumenta proporcionalmente distância de afastamento do engaste. Esta imprecisão deve-se às deflexões de cisalhamento que não foram consideradas na fórmula 66. Existe um parâmetro para avaliar a importância de influencia das deflexões citadas a uma viga submetida a flexão – é a relação L/d ,

onde L – comprimento da viga,
 d – diâmetro médio da viga.

No presente trabalho a relação L/d varia entre 9,5 e 10,5.

Fellmoser e Blass [25] estudaram as deflexões de cisalhamento em uma viga de madeira de seção retangular simplesmente apoiada e carregada no ponto central de vão. Os estudos mostram que a contribuição das deflexões de cisalhamento produz alterações significativas nos valores do E_y , quando a relação L/d é inferior a 30. Além disso, no mesmo trabalho os autores mostram que para relação L/d igual a 10 a contribuição das deflexões de cisalhamento pode obter valores até 50% da deformação total. Isto confirma-se com os resultados da tabela 4.7, onde E_y calculado na distancia de 320 mm do engaste e quase 2 vezes menor que E_y calculado na distancia de 838 mm do engaste. Considerando estes fatores os valores encontrados no presente trabalho não podem ser interpretados como uma referência de módulo de elasticidade longitudinal E_y .

Outras características que tem influencia no valor de E_y são as dimensões dos colmos: quanto maior seja a razão entre diâmetro médio e espessura de parede

– maior será o módulo E_y . Este parâmetro aumenta de base ao topo, o seja quanto maior estiver diâmetro e espessura da parede – menor será a razão.

Outra característica mecânica que tem influencia nos valores de módulo de elasticidade E_y é quantidade das diafragmas, que diminui de base ao topo, portanto é um parâmetro inverso ao razão D/E (diâmetro/espessura): quanto maior estiver o numero de diafragmas – menor será a razão.

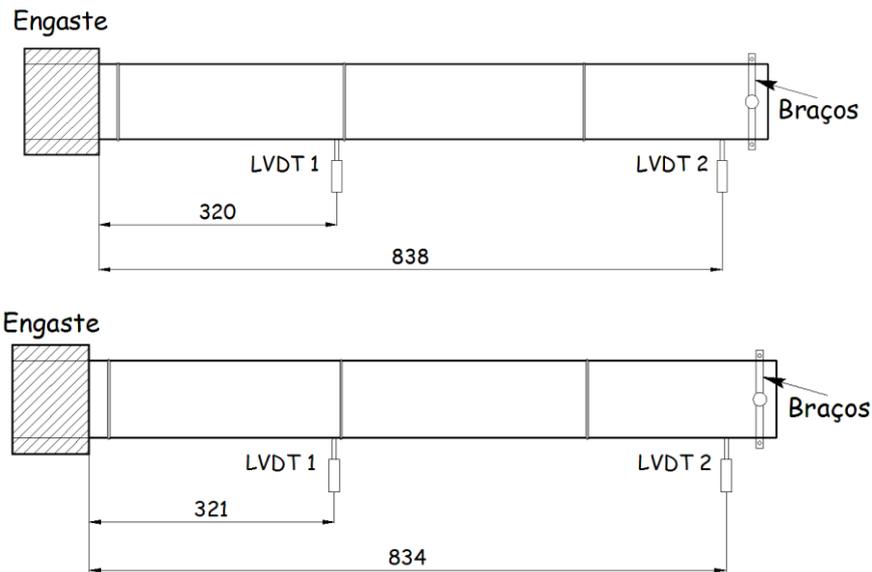


Figura 4.82 - Posições dos LVDT (Colmos 2 e 3 – Seção fechada)

Comparando os resultados obtidos com os resultados reportados pelo Torres [14] (tabela 2.3), nota-se a similaridade, no entanto não é a coincidência total. Segundo valores de razão D/E calculados para os colmos metake e mosô, os resultados obtidos no presente trabalho são superiores aos resultados reportados. Os razões D/E de Torres (Metake – 13,15, Mosô – 9,84) são superiores, então, deveriam apresentar os maiores módulos E_y . Aliás, a tendência de aumento de módulo E_y com aumento da razão D/E confirma-se com os resultados de Torres.

Comparando os resultados sem considerar a razão D/E, mas a distância de afastamento do ponto analisado do engaste, nota-se a similaridade dos resultados do corpo de prova Metake [14] e colmo 2 do presente trabalho.

Tabela 2.3 - Módulos efetivos a flexão (Torres,2005)

Módulo de elasticidade efetivo Espécie de bambu	E_{f1} (GPa)	E_{f2} (GPa)	E_{f3} (GPa)	E_{f4} (GPa)	Razão $D_{\text{médio}}/$ Espessura da parede	Esbeltez diametral λ_D
<i>Metake</i>	0,5	3,3	4,9	5,9	13,15	0,927
<i>Phyllostachys Pubescens</i> (Mosô)	0,27	2,33	3,43	4,2	9,84	0,903
Distância de afastamento do engaste, mm	60	370	630	940		

4.5.2

Seção aberta

No processo de análise dos módulos E_y para seção aberta notou-se a mesma tendência de aumento dos E_y com aumento de razão D/E e distancia de afastamento de ponto analisado de engaste (tabela 4.8). Na tabela 4.8 estão apresentados os dados dos módulos de elasticidade dos colmos 1, 2 e 3, ordenados pelo crescimento da razão D/E.

Tabela 4.8 - Distribuição dos E_y (GPa) pelo comprimento do colmo dependendo do razão Diâmetro médio/Espessura da parede (seção aberta)

	Módulo de elasticidade longitudinal, E_y (Gpa)	Distância de engaste até ponto de medição, mm	Módulo de elasticidade longitudinal, E_y (Gpa)	Distância de engaste até ponto de medição, mm	Razão Diâmetro médio/ Espessura de parede
Colmo 2 SA	1,19	320	2,32	822,5	8,89
Colmo 3 SA	3,89	322	6,29	841,5	9,06
Colmo 1 SA	5,9	459	8,24	849	9,35

Os valores na tabela 4.8 variam entre 1,19 e 8,24 GPa. Os valores obtidos para colmo 3 coincidem com os mesmos de análise da seção fechada que mostra, que a fissura longitudinal não afectou os valores de módulo E_y para colmo 3. No entanto, os mesmos resultados são diferentes para colmo 2 (os módulos E_y para seção aberta são 2 vezes menores que para seção fechada). Colmo 1 apresentou os maiores valores de módulo E_y (1,5 vezes maiores que para colmo 3). Da mesma forma que no análise da seção fechada nota-se a aumento dos valores de módulo de elasticidade longitudinal E_y com aumento da razão D/E e de distância do afastamento do engaste.

Na figura 4.83 está mostrado posicionamento dos LVDT 1 e 2 para todos os colmos.

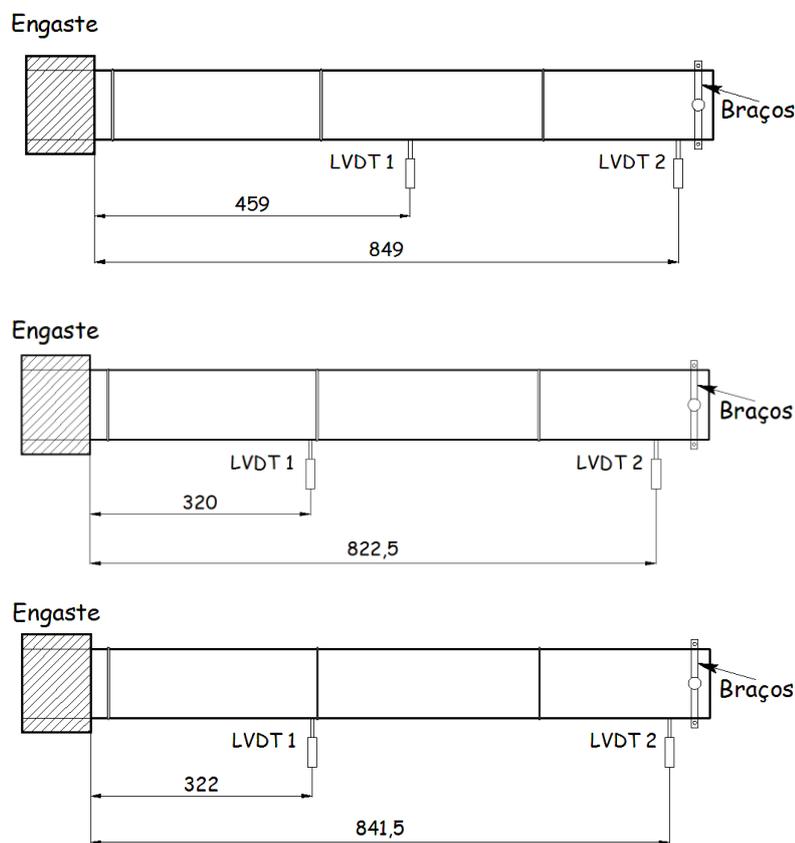


Figura 4.83 - Posições dos LVDT (Colmo s 1, 2 e 3 – Seção aberta)

4.6

Simulações em Abaqus

4.6.1

Perfil fechado

Neste capítulo foi analisado o caso real (caso de colmo ensaiado), quando os diafragmas foram retirados, mais ficou a sua parte exterior dentro do colmo, devido a dificuldade de retiro total (forma oval dos colmos). Para análise foi escolhido o colmo 2. Todas as fissuras foram feitas de forma igual a ensaio efetuado. Foi aplicado momento torçor de $150 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ na extremidade livre.

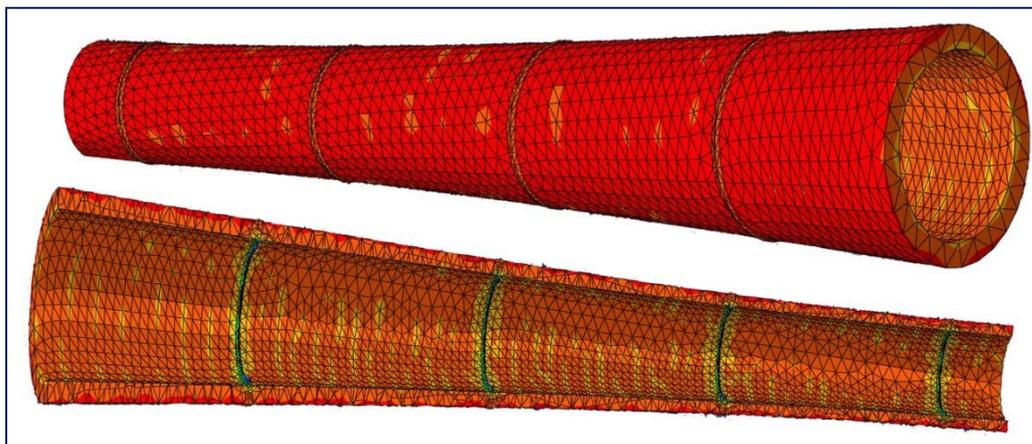


Figura 4.84 - Distribuição das deformações (seção fechada)

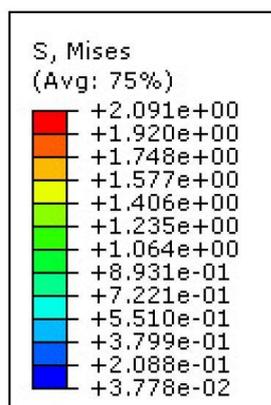


Figura 4.85 - Significado das cores (seção fechada)

Analisando figura 4.84 nota-se a distribuição uniforme das deformações máximas pela superfície externa do colmo. As deformações atingem valor de

2,1%. Nota-se a diminuição das deformações na superfície interna até 1,7% e na área dos nós, variando perto dos nós em torno de 1,4% e chegando na diafragma até 0,04%. O diâmetro da extremidade livre aumenta quase 2 vezes em comparação com diâmetro inicial. Isto é o efeito visual de ampliação dos deslocamentos.

4.6.1

Perfil aberto

O segundo caso analisado é Fissurado 1 (foi introduzida a fissura no meio do colmo entre dois nós). Na figura 4.86 está apresentada a imagem do colmo deformado.

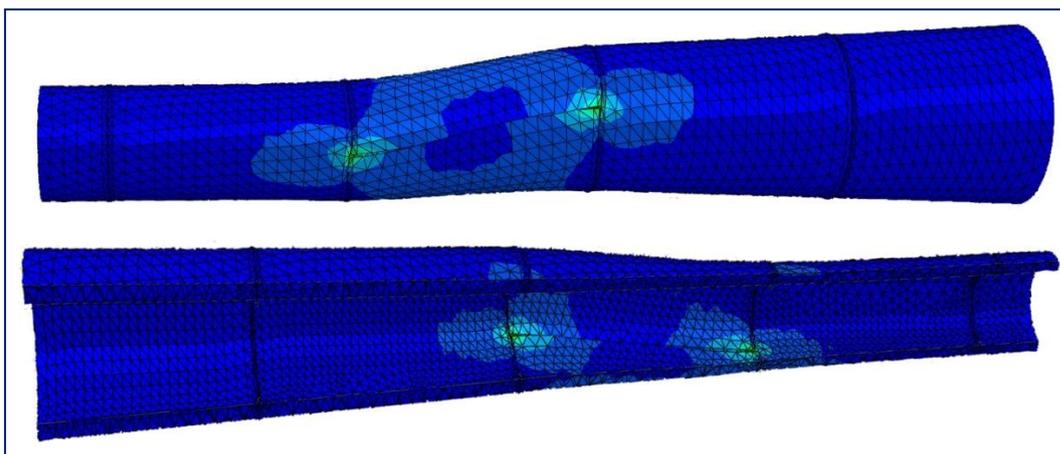


Figura 4.86 - Distribuição das deformações (Fissurado 1)

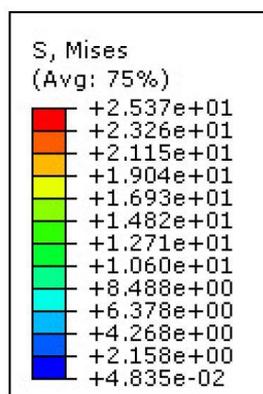


Figura 4.87 - Significado das cores (Fissurado1)

Na imagem 4.86 nota-se a distribuição uniforme das deformações mínimas (0,05%) pelo colmo, exceto a área perto da fissura. Nesta área as deformações aumentam no internó, onde foi introduzida a fissura, até 2, 1% e até 16,9% nas extremidades da fissura (deformações máximas). Também nota-se aumento do diâmetro da extremidade livre e quebra e deslocamento do eixo do colmo no meio da fissura. Isso deve-se ao razão, explicado acima.

O terceiro caso analisado é Fissurado 2 (a fissura introduzida foi alongada até a próxima diafragma). Segue a imagem do colmo deformado.

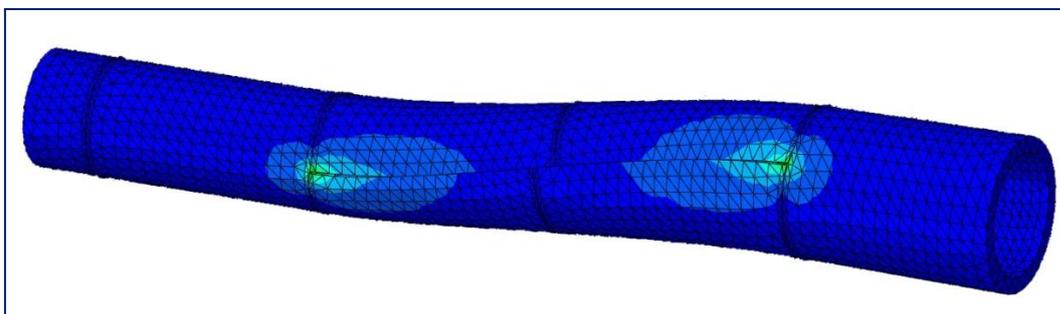


Figura 4.88 - Distribuição das deformações (Fissurado 2)

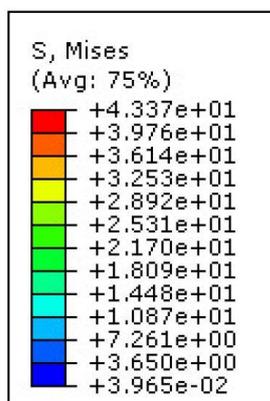


Figura 4.89 - Significado das cores (Fissurado 2)

Analisando o caso nota-se diminuição das deformações mínimas (0,04%), distribuídas uniformemente pela superfície do colmo e aumento das deformações máximas (28,9%) nas extremidades da fissura. Diâmetro da extremidade livre segue aumentado, no entanto o aumento é menor que nos casos anteriores.

No penúltimo caso a seção foi aberta até a extremidade livre, enquanto os dois internós perto do engaste permaneciam inteiros. Na figura 4.90 está mostrado o colmo deformado.

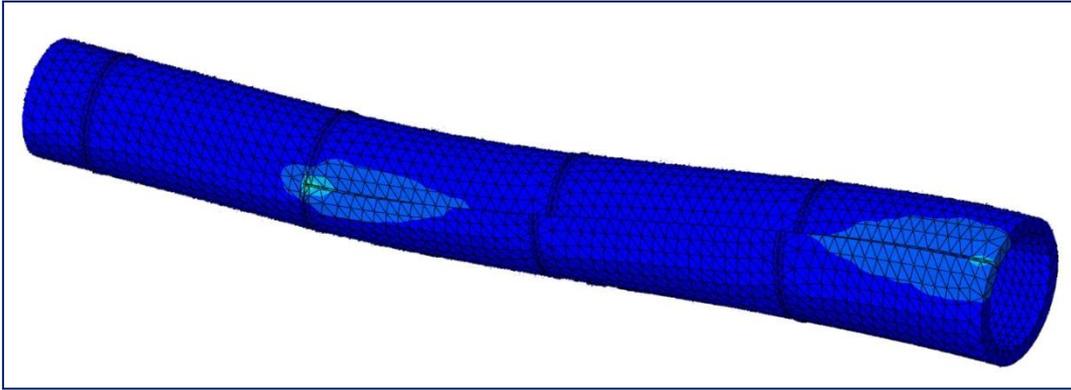


Figura 4.90 - Distribuição das deformações (Fissurado 3)

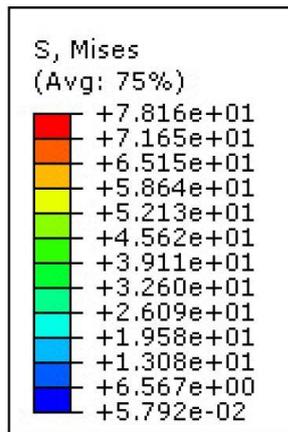


Figura 4.91 - Significado das cores (Fissurado 3)

Neste caso as deformações variam entre 0,6% (deformações mínimas, distribuídas uniformemente e 52,1% (as deformações máximas nas extremidades da fenda). Nota-se o deslize das parte do colmo na linha da fenda.

No último caso (seção aberta – fenda alongada até o engaste) a distribuição das deformações deixa de ser uniforme (figura 4.92).

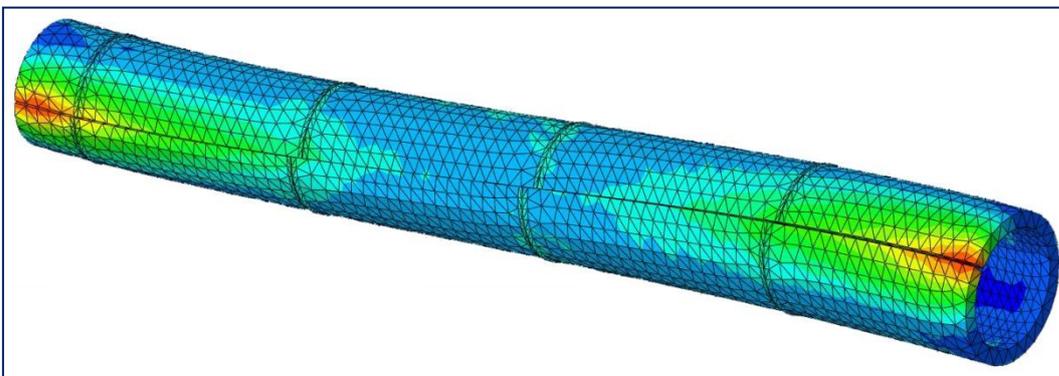


Figura 4.92 - Distribuição das deformações (Fissurado 4)

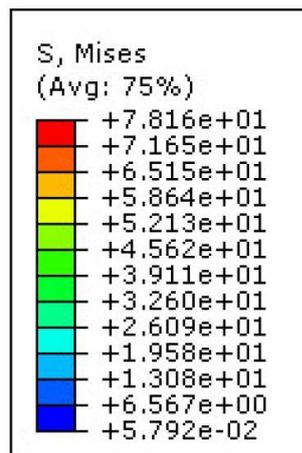


Figura 4.93 - Significado das cores (Fissurado 3)

As deformações na maior parte do colmo variam em torno de 19,6%, aumentando à medida que chagam perto das extremidades e atingindo o seu máximo nos pontos extremos da fissura (78,2%). Nota-se o deslize na linha da fissura e ausência de aumento de diâmetro na extremidade livre.

Comparando os resultados obtidos com os resultados do ensaio de torção (capítulo 4.1) nota-se certa similaridade:

- diminuição das deformações na maior parte do colmo (casos Fissurado 2 e Fissurado 3) e sua concentração nos pontos críticos coincide com a diminuição das deformações da maioria dos Strain Gauges (ensaio de torção) e seu aumento nos Strain Gauges mais deformados;
- na figura 4.29 destaca a concentração das deformações nas extremidades, enquanto a parte central permanece pouco deformada (foi observada a mesma tendência nos ensaios de torção).