

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Departamento de Engenharia de Estruturas

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE TENSÕES RESIDUAIS EM
PERFIS DE AÇO SOLDADOS

FLÁVIO ANTÔNIO DOS SANTOS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia de Estruturas".

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. EDGAR VLADIMIRO MANTILLA CARRASCO

UFMG

Prof. Dr. JOSÉ LUÍS DE FRANÇA FREIRE

PUC-RJ

Prof. Dr. RICARDO HALLAL FAKURY

UFMG

Eng. TÂNIO RODRIGUES MANSUR, M.Sc.

CDTN

Flávio Antônio dos Santos

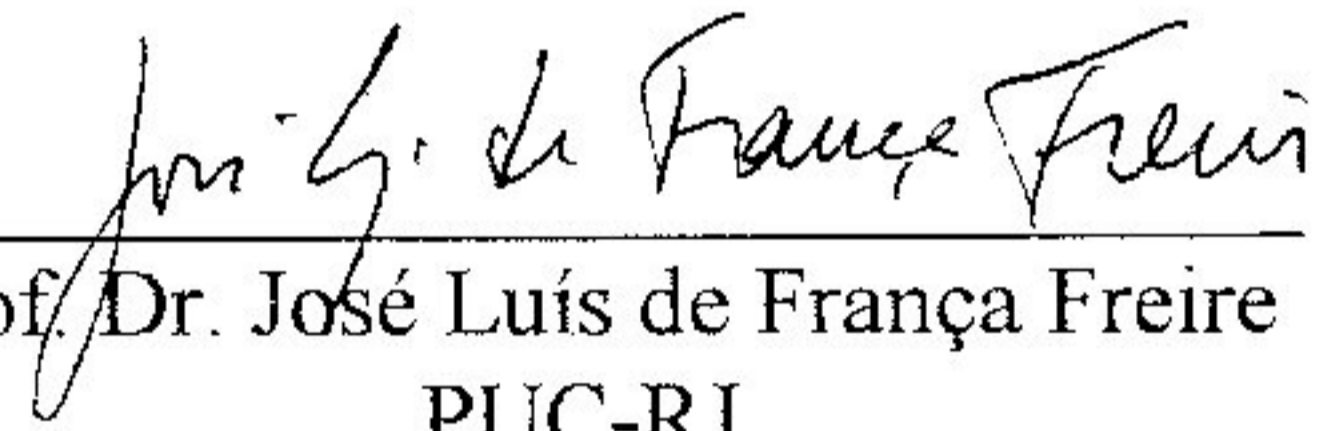
**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE TENSÕES RESIDUAIS
EM PERFIS DE AÇO SOLDADOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão julgadora:



Prof. Dr. Edgar Vladimiro M. Carrasco
EE-UFMG (orientador)



Prof. Dr. José Luís de França Freire
PUC-RJ



Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury
EE-UFMG



Prof. M.Sc. Tânius R. Mansur
CDTN

Belo Horizonte, 31 de agosto de 1995
Escola de Engenharia da UFMG

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco pelo incentivo à pesquisa desenvolvida, sobretudo na parte experimental, na qual sua experiência e orientação muito contribuíram para o bom andamento dos trabalhos.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) através dos Engenheiros Tânius Rodrigues Mansur, Roberto Francisco Di Lorenzo e Geraldo de Paula Martins que viabilizaram a realização dos ensaios naquele Centro de pesquisa.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado, à Pró-Reitoria de Pesquisa (PRPq) da UFMG pelo fornecimento de material de consumo e à Codeme Engenharia Ltda. pela doação de perfis metálicos.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG e funcionários, em especial à Fátima, pelo apoio e colaboração.

À Estânia e Cristina do CEFET-MG pelo apoio, à Paula Bamberg pelo incentivo; ao Nilton, Nirlando e Paulo, do CDTN, pelo auxílio na realização dos ensaios, à Ariane pelo trabalho de digitação e, finalmente, à Professora Júnia Focas, pela revisão gramatical do trabalho.

Aos meus pais,

Odilon e Zaida.

SUMÁRIO

1 - Introdução	
1.1 - Generalidades.....	01
1.2 - Justificativa do estudo	01
1.3 - Objetivos	05
2 - Revisão bibliográfica	
2.1 - Introdução	07
2.2 - Histórico	08
2.3 - Natureza das tensões residuais	12
2.3.1 - Influência das tensões residuais na resistência de colunas	16
3 - O Método do Furo Central	
3.1 - Introdução	20
3.2 - Princípio e teoria do método	20
3.3 - Avanços e limitações do método	26
3.3.1 - Alívio máximo de deformação	27
3.3.2 - Efeito da profundidade do furo	28
3.3.3 - Utilização de furação incremental	30
4 - Determinação experimental de tensões residuais	
4.1 - Programa de testes	32
4.1.1 - Materiais	34
4.1.2 - Equipamentos	36
4.1.3 - Constantes de calibração	38
4.2 - Metodologia de ensaio	38
4.2.1 - Instalação das rosetas de deformação	39
4.2.2 - Alinhamento e usinagem do furo	41
4.2.3 - Ensaios e aquisição de dados.....	42

5 - Análise de resultados	
5.1 - Introdução	50
5.2 - Tensões e direções principais	51
5.2.1 - Determinação manual	51
5.3 - Valores de tensões residuais máxima e mínima	62
6 - Conclusões e recomendações	
6.1 - Generalidades	66
6.2 - Conclusão final	67
6.3 - Sugestões para trabalhos futuros	68
Referências bibliográficas.....	71
Bibliografia	76
APÊNDICE I	
- Resultados experimentais obtidos.....	78
APÊNDICE II:	
- Programa para análise de tensões residuais utilizando o Método do Furo Central	177
APÊNDICE III:	
- Circuito elétrico empregado para monitoração dos ensaios	185
APÊNDICE IV:	
- Instrumentação e Corte dos Perfis Ensaiaados	187

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

Resultados de uma série de conclusões de pesquisas desenvolvidas nas duas últimas décadas foram incorporados à diversas especificações de projeto de estruturas de aço, tais como o Eurocode, a norma alemã DIN, a norma britânica e a canadense de modo a permitir a execução de estruturas mais econômicas e de maior confiabilidade. Nesse aspecto, merece destaque o tratamento mais realista dado à influência das tensões residuais no comportamento das barras, em especial aquelas submetidas a esforço axial de compressão.

Estudos a partir da teoria de Euler e, posteriormente, a teoria do módulo tangente, atribuíam às tensões existentes antes da aplicação de qualquer carregamento externo, a redução da capacidade de carga destas barras.

Nas últimas décadas, a importância das tensões residuais vem sendo reconhecida como um dos fatores que influenciam consideravelmente a resistência de colunas [01, 02, 03].

Neste trabalho, estudar-se-á apenas as tensões residuais: como surgem nos perfis de aço e qual a sua magnitude e distribuição, realizando-se ainda ensaios de laboratório para determinação de valores experimentais, visando obter dados para um estudo da sua influência no comportamento de barras axialmente comprimidas.

1.2 - Justificativa do estudo

As tensões residuais têm pequeno efeito na resistência máxima de colunas muito esbeltas, cujos valores de carga crítica de flambagem aproximam-se bastante da carga de Euler, mesmo que apresentem pequena curvatura inicial [05]. Entretanto, para os

comprimentos comumente usados em projetos de estruturas, as tensões residuais afetam significativamente a sua resistência máxima. De acordo com medidas realizadas [06, 07, 08], a magnitude das tensões residuais de compressão em um grande número de perfis chega a ser superior a 50% da tensão de escoamento do aço .

Desta forma, quando submetidas a esforços de compressão, a tensão provocada por carregamentos externos superpõe-se a estas tensões pré-existentis, reduzindo a capacidade de carga das barras.

Para que sejam obtidas as curvas de resistência à compressão e quantificada a redução da capacidade de carga provocada pelas tensões residuais, é necessário levar-se em conta a sua magnitude e distribuição, bem como o eixo do perfil em torno do qual ocorre a flambagem.

A menos que tratamentos térmicos apropriados sejam realizados, o aparecimento de tensões residuais após a transformação do aço em produto acabado é inevitável. Tais tensões são derivadas de deformações plásticas que resultam, principalmente, do resfriamento não uniforme da peça.

Sendo de origem essencialmente térmica, as tensões residuais são influenciadas pelo módulo de elasticidade, pelo coeficiente de dilatação linear do material e pelo gradiente de temperatura. Desta forma, sua grandeza e distribuição dependem do tipo de seção transversal, da temperatura de laminação ou soldagem, das condições de resfriamento, dos métodos de retificação das peças e das propriedades inerentes ao metal. A tensão de escoamento não afeta significativamente as tensões residuais, conforme foi demonstrado por Tall [09] em 1965.

Em perfis laminados a quente, as mesas, sendo a parte mais espessa, resfriam-se mais lentamente do que a região das almas. Da mesma forma, os cantos das mesas, por terem maior exposição ao ar, resfriam-se mais rapidamente do que a sua parte central. Em consequência disso, aparecerão tensões residuais de compressão nas regiões de resfriamento mais rápido e tensões residuais de tração onde o

resfriamento for mais lento. Isto se dá nos cantos das mesas e região central da alma, e na junção entre a alma e mesas, como mostra a figura 1.1.

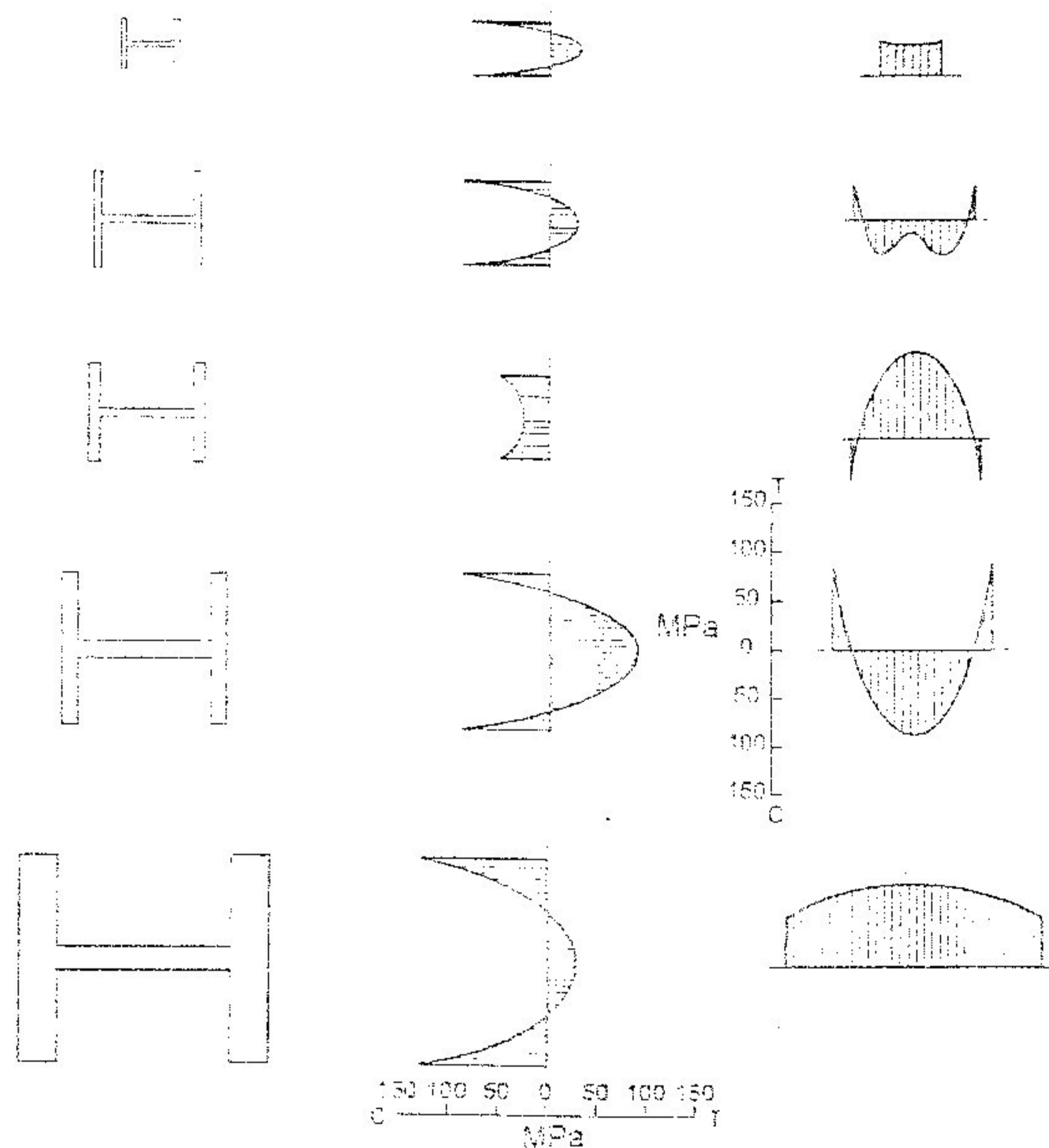


Figura 1.1 - Distribuição de tensões residuais em perfis laminados.

Em perfis soldados temos dois casos a considerar, quais sejam:

a) Perfis formados com chapas de borda laminada ou cortados mecanicamente.

As chapas incorporam durante seu processo de fabricação pequenas tensões residuais resultantes de resfriamento desigual após a laminação. Ao se executar a solda de união das mesas com a alma, o aquecimento e posterior resfriamento não uniforme da seção introduzem

altas tensões, que aumentam a região das tensões residuais de compressão nas mesas, com conseqüências negativas na resistência de barras comprimidas. O valor dessas tensões é significativamente maior do que o das tensões em perfis laminados [10].

b) Perfis formados por chapas cortadas por chama:

Nestes perfis, o corte por chama introduz tensões de tração nas bordas das chapas, que agem favoravelmente na resistência de colunas submetidas à compressão [11]. Em geral os perfis formados por chapas cortadas por chama apresentam resistência superior à dos formados por chapas com bordas laminadas, e similar à dos perfis laminados [12]. No Brasil, devido à falta ou escassez de perfis laminados, são de grande utilização os perfis soldados formados por chapas cortadas por chama. Após levantamento bibliográfico extenso, não se encontrou, entretanto estudo ou referência a estudo feito para se determinar as tensões residuais presentes nos perfis soldados fabricados por nossas indústrias. É necessária, portanto, a realização de ensaios para que este processo de fabricação de nossos perfis seja estudado, de modo a se determinar a magnitude das tensões residuais e como elas se distribuem na seção.

A figura 1.2 apresenta uma comparação qualitativa da distribuição de tensões residuais nas mesas de perfis formados por chapas de bordas laminadas e por chapas de bordas cortadas, mostrando o efeito de variação de tensões produzido pela soldagem mesa-alma.

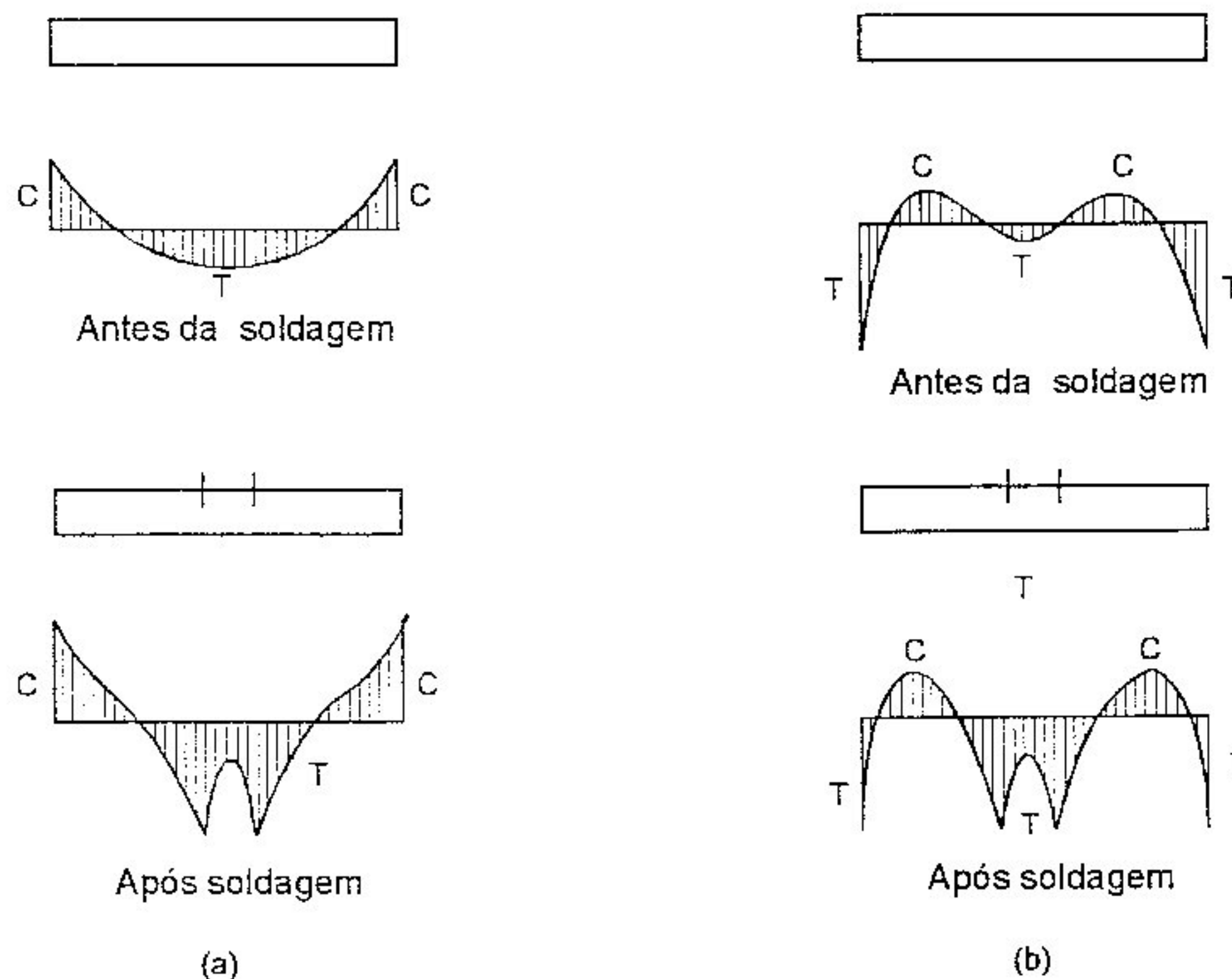


Figura 1.2 - Comparação qualitativa de tensões residuais nas mesas de perfis de aço soldados, formados por chapas de bordas laminadas (a) e por chapas de bordas cortadas por chama (b).

Embora algumas normas técnicas ainda utilizem uma curva única para representar a resistência de peças à compressão (AISC - ASD/89, AISC - LRFD/86), a tendência atual é a de se adotar o critério de múltiplas curvas agrupando-se perfis que possuem magnitude e distribuição de tensões residuais semelhantes (conforme recomendações do SSRC - Structural Stability Research Council e do ECCS - European Convention of Constructional Steelwork), procedimento este adotado pela NBR 8800/86 da ABNT [13].

1.3 - Objetivos

Neste trabalho estudar-se-á a distribuição de tensões residuais em perfis de aço soldados tipo I ou H formados por chapas cortadas por chama. Serão feitas medições experimentais destas tensões utilizando-se o Método do Furo Central. Os resultados experimentais obtidos serão analisados de modo a permitir uma avaliação da distribuição de tensões nas mesas e almas dos perfis ensaiados. Estes

resultados serão comparados a valores obtidos na literatura internacional, apresentando-se as conclusões.

Desenvolver-se-á também uma revisão bibliográfica e serão feitos comentários sobre a influência das tensões residuais no cálculo das estruturas em aço, principalmente na resistência de colunas.

No que se refere aos ensaios experimentais, serão apresentadas as limitações e os recentes avanços do Método do Furo Central, escolhido em função de suas vantagens em relação a outros métodos, como se apresenta nos capítulos seguintes.

Será desenvolvido um programa para microcomputadores, em linguagem Pascal, com entrada de dados via arquivo ou tela, que permita determinar as tensões residuais a partir de resultados experimentais e que forneça, através de gráficos, subsídios para análise daqueles resultados.

Ademais, este trabalho tem o objetivo apenas de iniciar um estudo sobre o correto enquadramento, ou não, dos tipos de perfis metálicos nacionais tipo I e H nas tabelas de curvas de resistência à flambagem, adotadas pelo Structural Stability Research Council (SSRC) e pela NBR 8800/86 [13].

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Introdução

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre as tensões residuais mostrando-se a evolução de sua compreensão a partir de situações empíricas e, posteriormente através de experimentação; a sua natureza e influência na resistência de colunas.

As tensões residuais, consideradas por alguns pesquisadores como “imperfeições” [14, 15] têm influência considerável na estabilidade das estruturas, com efeitos maléficos ou benéficos, dependendo de como se distribuem na seção transversal, de sua magnitude e do fato de serem de tração ou compressão.

Diversos outros fatores também influem na estabilidade das estruturas e podem ser agrupados da seguinte forma [15]:

a) Efeitos geométricos:

- imperfeições geométricas iniciais acidentais das barras (curvatura inicial);
- variações das dimensões das seções transversais teóricas para as seções reais;
- deformação por esforço cortante;
- flambagem local;
- influência da força axial na rigidez das barras;
- efeito $P-\Delta$.

b) Efeitos dos materiais:

- relação tensão-deformação não-linear;

- presença de tensões residuais nas barras antes do carregamento, resultantes dos processos de fabricação, transporte e montagem;
- espalhamento da zona inelástica nas barras;

c) Efeitos de carregamentos:

- carregamento não proporcional ;
- carregamento variável e repetido;

A influência de cada um dos fatores, anteriormente citados, no comportamento das estruturas, tem sido estudada por vários pesquisadores. Neste trabalho, estudar-se-á apenas as tensões residuais, determinadas através de técnica experimental e analisadas sob o enfoque da engenharia de estruturas.

2.2 - Histórico

Em 1757, Leonard Euler publicou um trabalho sobre flambagem de colunas, consideradas perfeitamente retas, prismáticas, bi-rotuladas nas extremidades, infinitamente elásticas e com carga perfeitamente centrada [16].

De acordo com a teoria desenvolvida por Euler, a carga de flambagem elástica ou "carga crítica" é dada por:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (2.1)$$

onde E é o módulo de elasticidade longitudinal do material, I é o menor momento de inércia da seção transversal e L é o comprimento da coluna.

Apesar de o trabalho de Euler continuar sendo um importante instrumento no estudo do comportamento de barras submetidas à compressão, os resultados obtidos de acordo com sua teoria não foram confirmados nos testes. As colunas de comprimento usual, ou de esbeltezas

intermediárias, não apresentavam resistência tão elevada como previa a equação de Euler.

Em 1889, Considère e Engesser [17] perceberam que antes da ocorrência da perda da estabilidade, alguns trechos da seção transversal tornavam-se inelásticos. Desta forma, uma das hipóteses impostas por Euler (material perfeitamente elástico) não se verificava. E isso se devia, como ficou provado mais tarde, à superposição de tensões residuais de compressão às tensões provocadas pelo carregamento aplicado, reduzindo-lhe a rigidez devido ao escoamento parcial de regiões da seção transversal. Em outras palavras, as tensões residuais são a principal causa da não-linearidade do diagrama tensão x deformação de barras axialmente comprimidas.

Para essas situações, nas quais o regime é inelástico, Engesser [18] propôs a teoria do módulo tangente, sendo a resistência da barra dada por

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t I}{L^2} \quad (2.2)$$

onde E_t é o módulo de elasticidade tangente, dado pela inclinação da reta tangente à curva tensão x deformação (figura 2.1).

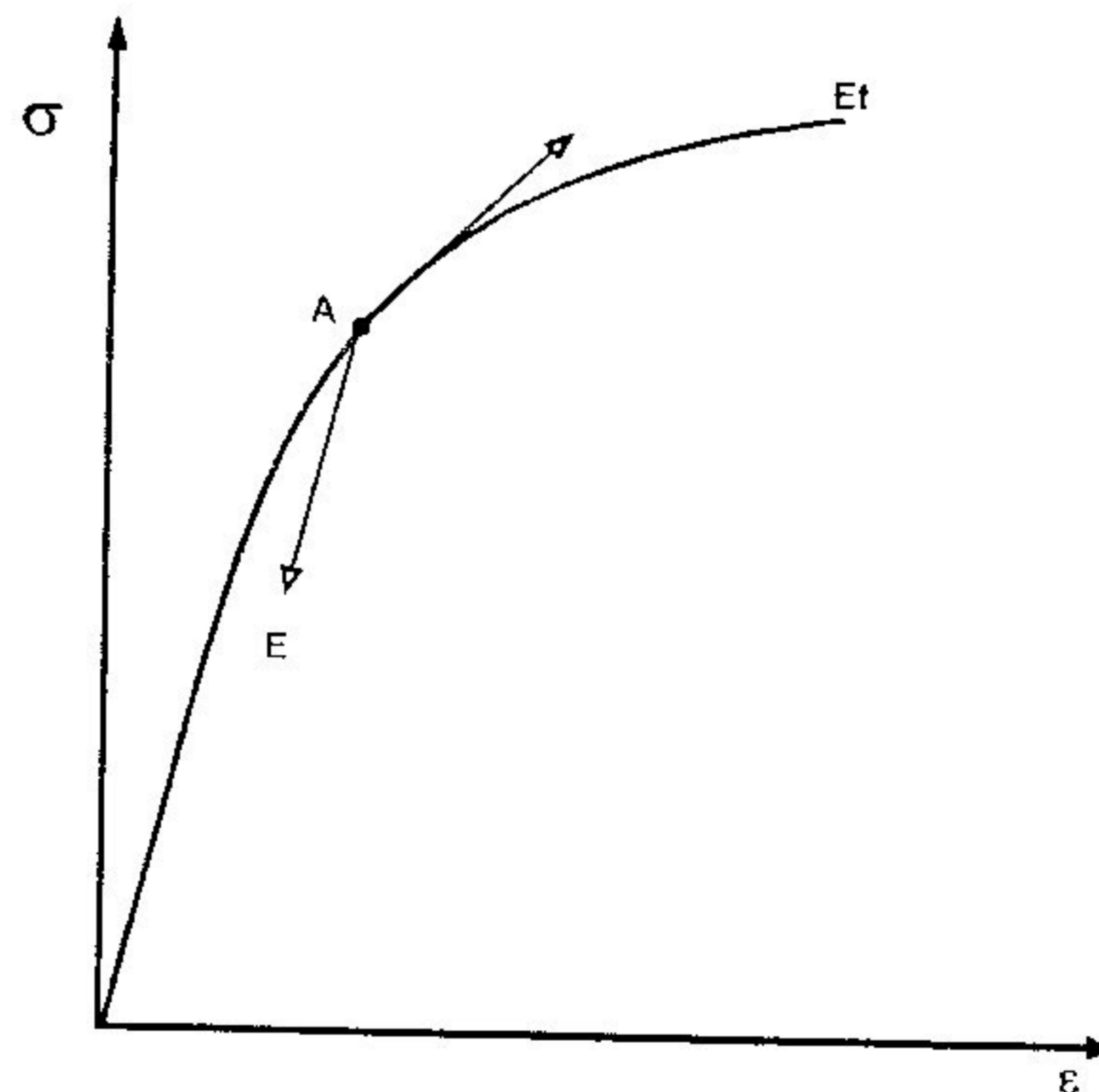


Figura 2.1 - Gráfico tensão x deformação para uma amostra contendo tensões residuais.

Em 1895, Engesser [19] corrigiu sua teoria, passando a considerar o fato de, durante a flexão da barra, algumas fibras continuarem a aumentar a deformação (pelo módulo tangente) e algumas fibras serem descarregadas (pelo módulo elástico E), como mostra a figura 2.2. Desta forma, um valor combinado deveria ser usado para os módulos, surgindo daí a teoria do duplo módulo ou módulo reduzido.

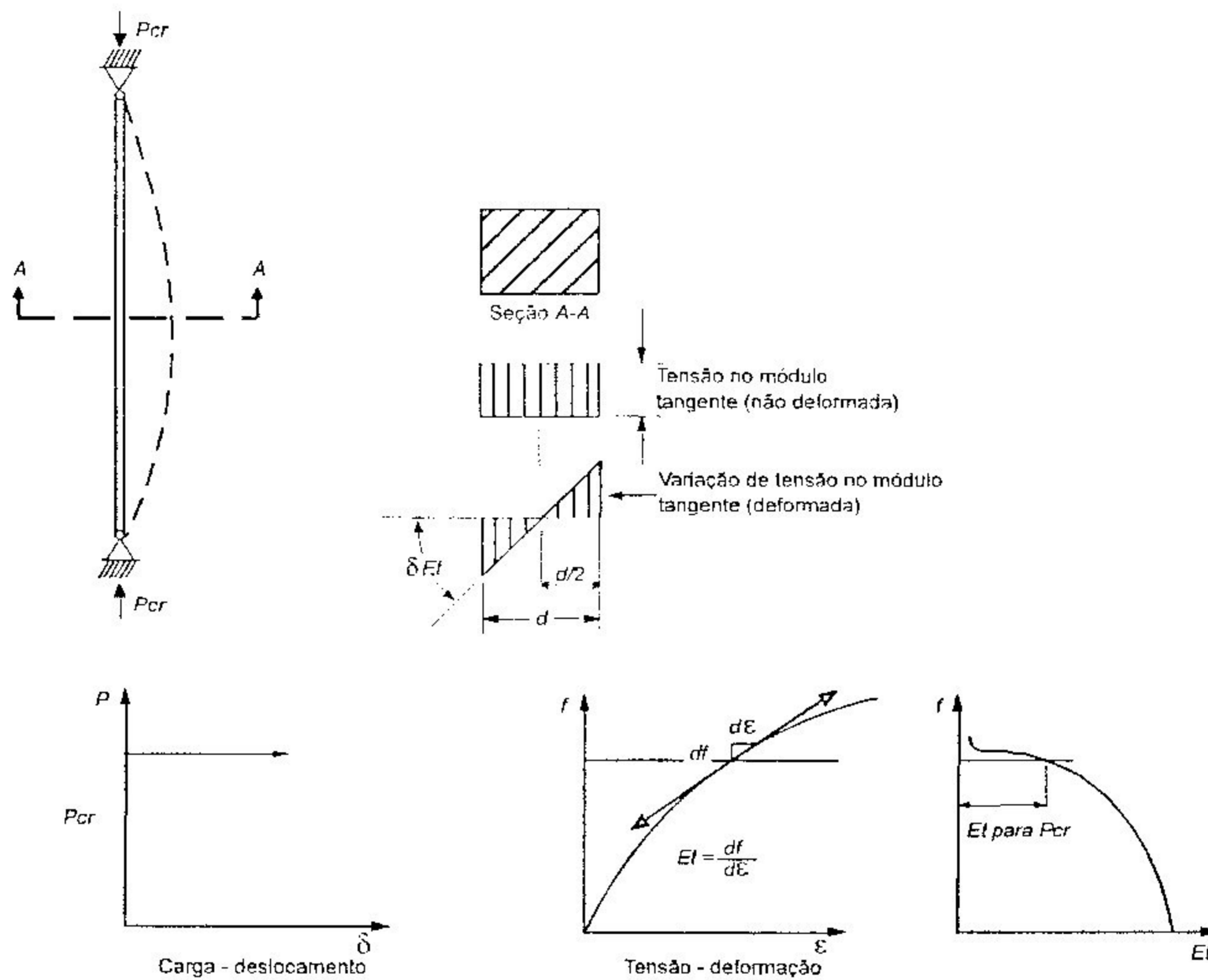


Figura 2.2 - Teoria de Engesser do módulo tangente

A carga crítica é dada então por:

$$P_r = \frac{\pi^2 E_r I}{L^2} \quad (2.3)$$

sendo E_r o módulo de elasticidade reduzido dado por:

$$E_r = E_t \int_0^{d_1} y_1^2 dA_1 + E \int_0^{d_2} y_2^2 dA_2 \quad (2.4)$$

Entretanto, apesar de a teoria do módulo reduzido ser mais correta pelos conceitos teóricos da instabilidade clássica, os resultados obtidos em laboratório mostravam que as barras flambavam com cargas bem mais próximas daquelas previstas pela teoria do módulo tangente.

Howards, em 1908 [apud 20], em uma discussão sobre resultados de testes de colunas, considerou as tensões residuais como sendo a provável causa da redução da resistência de colunas de esbeltez intermediária.

Salmon, em 1921, e Madsen, em 1941, notaram a possível influência destas tensões na resistência à flambagem de perfis laminados e chapas soldadas de grelhas [apud 21].

Estudos sistemáticos sobre o efeito das tensões residuais na resistência de colunas foram iniciados no final de 1940 sob orientação do Research Committee A, do Column Research Council (CRC), por Osgood [22]

A total compreensão da flambagem inelástica, entretanto, deu-se somente em 1947 com Shanley em "Inelastic Column Theory"[23].

A bifurcação do equilíbrio ocorre com a carga do módulo tangente P_t , mas o deslocamento lateral conseqüente só é possível com o aumento da carga. Se não houvesse maior perda de rigidez, devido ao escoamento de outras fibras, a carga aproximaria assintoticamente da carga P_r do módulo reduzido. Como o aumento do carregamento acima da carga P_t resulta em mais escoamento, a rigidez continua a reduzir-se e a curva carga x deslocamento atinge um máximo, após o qual começa a decrescer.

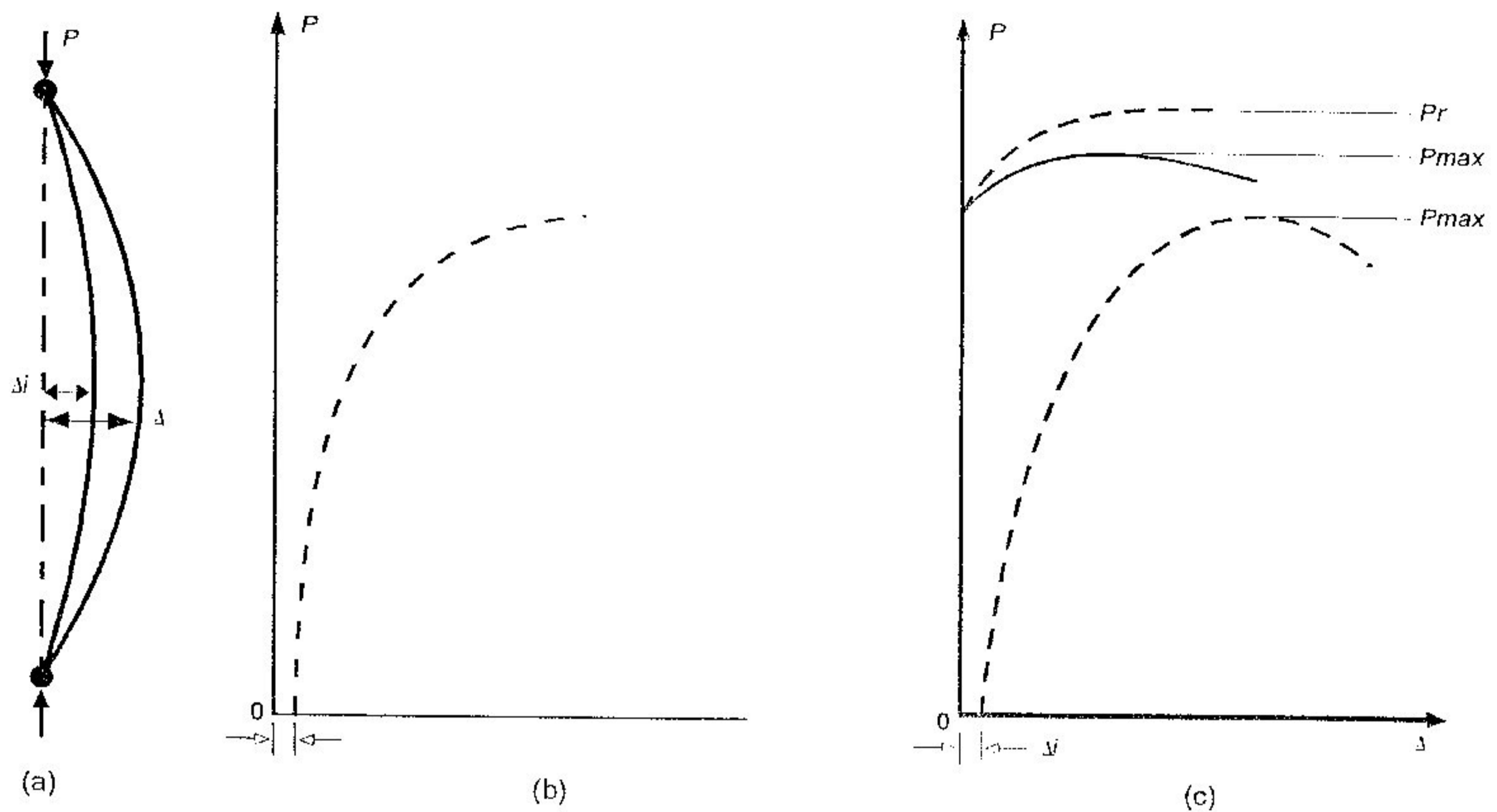


Figura 2.3 - Comportamento de colunas perfeitas e imperfeitas

Nos casos práticos, entretanto, o aumento da capacidade de carga de P_t para P_r é pequeno e pode ser desprezado. Portanto, a carga P_t pode ser tratada como carga crítica, ou seja, a carga na qual se inicia a flambagem.

2.3 - Natureza das tensões residuais

As tensões residuais, resultantes de deformações plásticas, são incorporadas às peças durante o processo de fabricação, transporte e montagem das estruturas e nelas permanecem após se transformarem em produto acabado, quando tratamentos térmicos adequados não são realizados.

Em aços estruturais estas deformações plásticas, durante o processo de fabricação, podem ser resultantes de [24]:

- a) resfriamento desigual após laminação à quente;
- b) dobramento ou conformação a frio;

- c) punção e outras operações de corte;
- d) soldagem.

Sob condições normais, as tensões residuais resultantes de resfriamento desigual (gradiente de temperatura), inclusive soldagem, são as mais importantes.

A sua origem pode ser compreendida considerando-se, por exemplo, uma barra de aço engastada e submetida a aumento uniforme de temperatura, como mostra a figura 2.4.

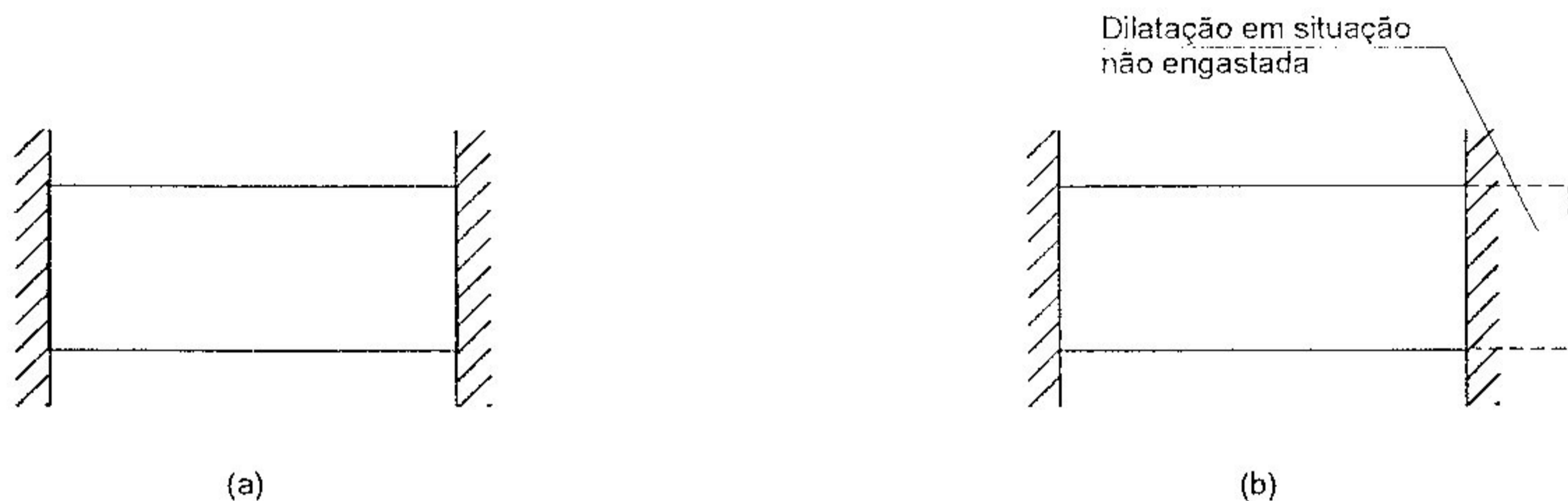


Figura 2.4 - Barra de aço engastada (a) e submetida a aumento de temperatura (b).

À medida que a temperatura aumenta, aparecem esforços de compressão na barra. Se a temperatura se elevar a tal ponto que as tensões de compressão produzidas ultrapassem o limite de proporcionalidade do material, ocorrerá plastificação na seção transversal e o material sofrerá deformação permanente. Devido a estas deformações, aparecerão tensões residuais de tração quando a temperatura retornar ao valor inicial, neste caso, em uma situação isotérmica.

O resfriamento não uniforme de um corpo também pode originar tensões residuais [25]. Considere-se, por exemplo, um lingote sob temperatura elevada, inicialmente livre de tensões residuais como mostra a figura 2.5.

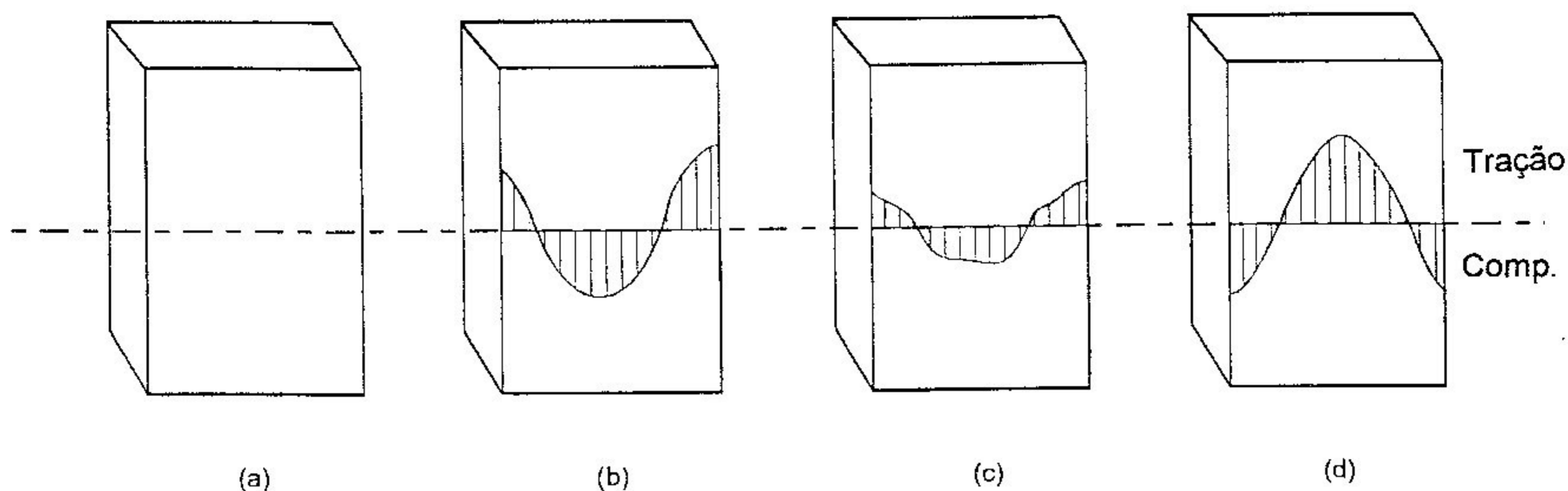


Figura 2.5 - Resfriamento não uniforme.

O resfriamento da parte externa provoca retração enquanto a parte interna, ainda sob elevada temperatura, encontra-se expandida, opondo-se, portanto, à retração da parte externa. Isto resulta em tensões de compressão no núcleo e de tração na parte externa (figura 2.5-b). No núcleo aquecido, a tensão de escoamento é baixa e ele se contrairá plasticamente ajustando-se às camadas externas mais frias e, portanto, mais rígidas, de maior tensão de escoamento (figura 2.5-b).

À medida que se processa o resfriamento, a retração térmica continua (figura 2.5-c) e o núcleo que havia escoado plasticamente continua a contração térmica.

Quando o lingote atinge uma temperatura uniforme, a contração total do núcleo (térmica e plástica) excede à das camadas externas. Esta retração diferencial é impedida pelo exterior, de tal forma que tensões de tração aparecem no núcleo e de compressão na região externa (figura 2.5-d).

No caso de peças soldadas, as tensões residuais são indesejáveis também pelas distorções que provocam, como o perfil soldado tipo I mostrado na figura 2.6, além da possibilidade de fratura frágil, quando estas tensões são elevadas.

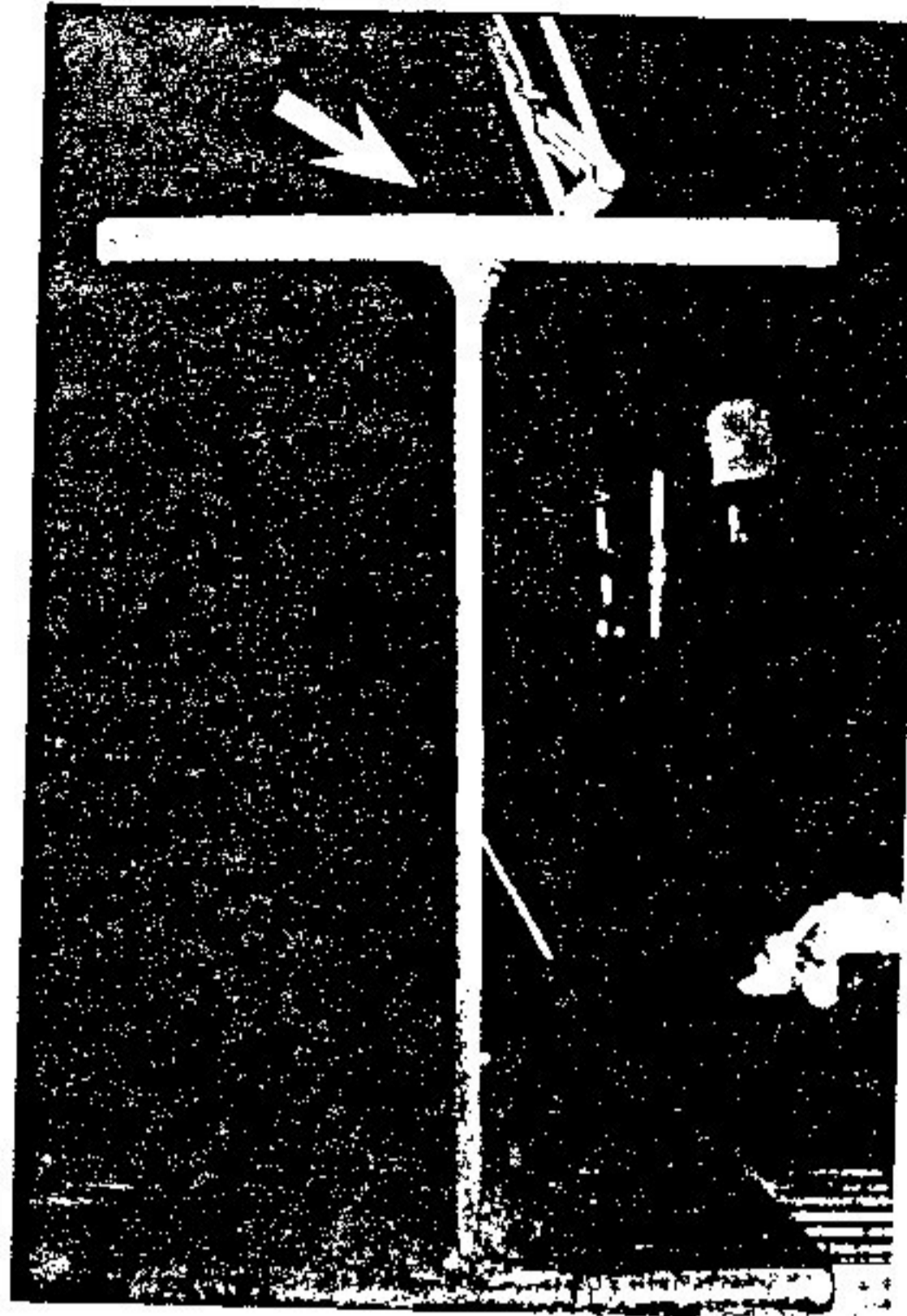


Figura 2.6 - Distorções em perfis metálicos devido a tensões residuais.

Distorções, entretanto, podem não estar associados a tensões residuais, como mostra a figura 2.7.

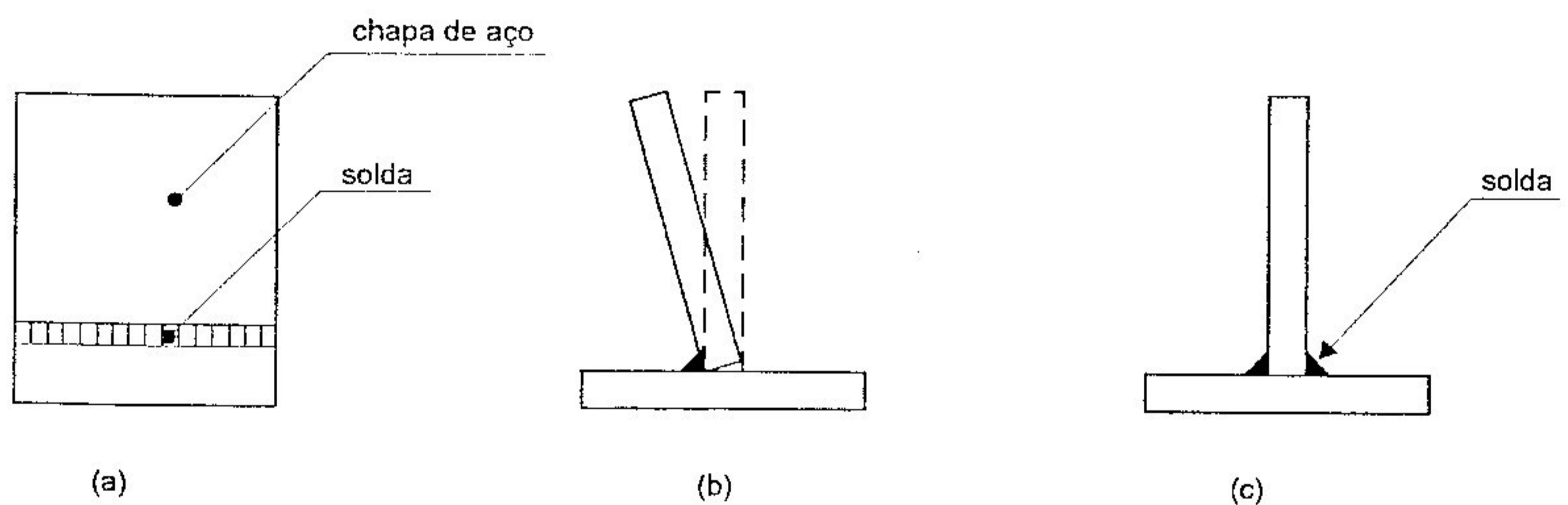


Figura 2.7 - Distorção em chapas devido a processos de soldagem.

O resfriamento, após a soldagem, provoca uma maior retração ao longo da região onde foi depositado o eletrodo. Se não houver resistência ao movimento da chapa vertical, mostrada na figura 2.7-b, ao se executar um filete de solda no outro lado, como na figura 2.7-c, esse tende a deslocar a chapa para sua posição original. Esta retração introduz tensões elevadas e a chapa se aproxima da posição vertical.

Analogamente, a figura 2.8 apresenta situações de distorção em chapas soldadas.

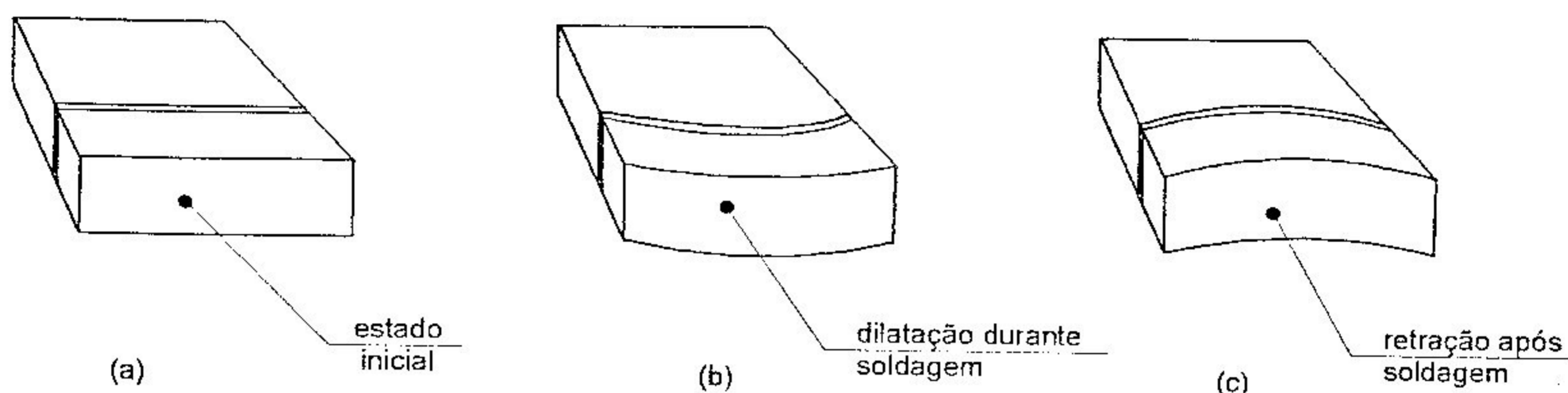


Figura 2.8 - Soldagem em chapas de aço

Estas situações apresentadas referem-se, entretanto, à seqüência de soldagem ou efeitos térmicos assimétricos. Se o eletrodo for depositado, formando simultaneamente dois filetes de solda, a distorção da chapa vertical seria eliminada e as tensões residuais seriam minimizadas. Várias outras técnicas, porém, podem ser utilizadas para minimizar estes efeitos, tais como solda intermitente, pré-aquecimento de peças, aquecimento pós-soldagem para alívio de tensões, etc.

2.3.1 - Influência das tensões residuais na resistência de colunas

O estudo da resistência de colunas carregadas axialmente pode ser feito considerando-se, em geral, as seguintes hipóteses simplificadoras:

- a) a relação tensão-deformação é constante para toda a seção transversal;
- b) não existem tensões internas iniciais;
- c) a coluna é perfeitamente reta e prismática;
- d) a carga atua segundo o seu centro de gravidade;
- e) as condições de vinculação são conhecidas de tal forma que o comprimento equivalente ao da coluna bi-rotulada pode ser definido;
- f) a teoria das pequenas deformações é aplicável e o efeito de cisalhamento pode ser desconsiderado;

g) não ocorre torção da seção transversal durante a flexão.

Quando tais hipóteses são válidas a resistência da coluna é dada por

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kL}{r}\right)^2} \quad (2.5)$$

onde σ_{cr} é a tensão crítica de flambagem, A é a área da seção transversal, E é o módulo de elasticidade longitudinal do material, L é o comprimento real da coluna, r é o raio de giração da coluna e k é um coeficiente de correção do comprimento da coluna.

A aplicabilidade da equação 2.5 é bastante limitada, uma vez que poucos materiais utilizados na engenharia permanecem elásticos para qualquer nível de tensão. Portanto, na prática, outras situações devem ser analisadas.

Sabe-se, por exemplo, que colunas esbeltas sofrem flambagem elástica, enquanto colunas curtas, quando carregadas, atingem a tensão de escoamento ou mesmo a zona de encruamento do aço (ver item 2.2). Entretanto, na maioria das situações usuais, o colapso ocorre após o escoamento de parte da seção transversal, ou seja, por flambagem inelástica.

A teoria do módulo tangente, aplicável aos problemas de flambagem inelástica, estabelece para a tensão crítica σ_{cr} a equação 2.6.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{kL}{r}\right)^2} \quad (2.6)$$

onde E_t é o módulo tangente correspondente à tensão crítica.

A teoria do módulo tangente fornece a resistência de colunas isentas de tensões residuais. Para aplicá-la, é necessário que se conheça o diagrama tensão-deformação e assim obter a curva tensão crítica x índice de esbeltez. Numerosos testes têm demonstrado que esse procedimento conduz a resultados corretos para colunas cujo material tenha sofrido tratamentos térmicos apropriados sendo então livres de tensões residuais [26]. Nos demais casos, as diferenças entre resultados teóricos e experimentais têm sido atribuídas a causas tais como: curvatura inicial da coluna e excentricidade da carga. Entretanto, em ensaios de laboratório bem conduzidos estas grandezas podem ser mantidas bastante reduzidas.

Vários estudos têm demonstrado que estas diferenças têm como causa principal as tensões residuais, enquanto outros fatores têm um efeito relativamente menor [27].

No caso de um aço estrutural isento de tensões residuais, quando amostras da seção transversal são submetidas à compressão, o diagrama tensão-deformação correspondente aproxima-se de um diagrama "ideal", como mostra a figura 2.9, consistindo em duas linhas retas sendo uma com inclinação definida pelo módulo de elasticidade longitudinal E e outra correspondente à tensão de escoamento.

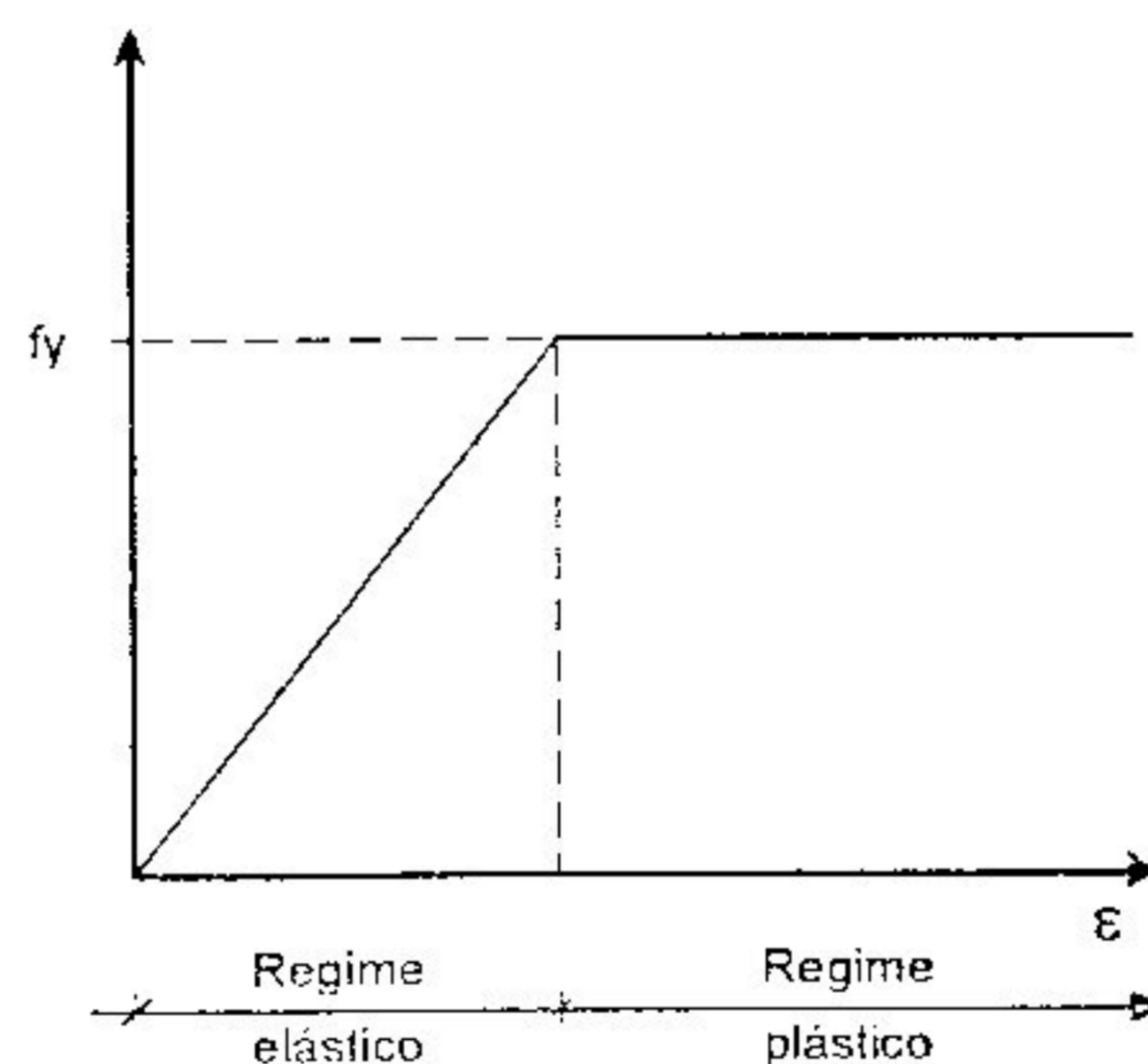


Figura 2.9 - Diagrama tensão-deformação de uma amostra "ideal" sem tensões residuais.

Em um diagrama deste tipo, quando a tensão aplicada a toda seção transversal apresentar valores $\sigma < \sigma_y - \sigma_{rc}$ onde σ é a tensão aplicada, σ_y é a tensão de escoamento e σ_{rc} é a tensão residual de compressão, todos os pontos da seção terão um comportamento elástico.

Aumentando-se a tensão aplicada até o valor $\sigma = \sigma_y - \sigma_{rc}$, as extremidades das abas apresentarão tensões iguais a σ_y , dando início ao escoamento. Acréscimos na tensão aplicada provocarão um aumento nos pontos com tensão

Conhecidas as causas que dão origem às tensões residuais e a influência destas tensões na resistência de colunas, estas informações devem ser utilizadas para a obtenção da curva tensão crítica x índice de esbeltez.

Até o início da década de 50, o projeto de colunas baseava-se em várias fórmulas, sendo que todas elas procuravam, empiricamente, reproduzir o comportamento das colunas obtidos em diversos ensaios. Nos anos seguintes, vários trabalhos foram publicados [28] apresentando métodos para a avaliação da influência das tensões residuais e comparação entre resultados obtidos a partir da utilização destes métodos e de resultados experimentais.

CAPÍTULO 3

O MÉTODO DO FURO CENTRAL

3.1 - Introdução

Dentre os vários métodos comumente empregados para determinação de tensões residuais, o Método do Furo Central tornou-se atualmente um dos mais utilizados em todo o mundo. Isto se deve à sua facilidade e rapidez de execução, ao baixo custo e bons resultados a que conduz, aliado ao fato de permitir, para diversas áreas da engenharia, a realização de ensaios não-destrutivos.

Avanços consideráveis vêm se processando nos últimos anos, tanto no que se refere à diminuição de limitações ao método, quanto nas considerações acerca da interpretação dos resultados.

Adiante serão apresentados o princípio e teoria em que se fundamentam o método e discutidos seus avanços e suas limitações nos últimos anos.

3.2 - Princípio e teoria do método

A medição de tensões residuais em um ponto baseia-se no princípio de que as tensões normais, em qualquer superfície livre, devem ser necessariamente nulas [29].

A abertura de um furo, mesmo de pequeno diâmetro, em uma região onde há presença de tensões, provoca um alívio de deformação em sua vizinhança. Conhecido este alívio de deformação, e utilizando-se as equações da elasticidade que relacionam deformação e tensão, é possível determinar as tensões residuais antes existentes. É importante lembrar que tanto a preparação da superfície quanto a execução do furo não podem

introduzir novas tensões, as quais se superporiam às já existentes, tornando falsos os resultados dos ensaios, como será discutido adiante.

A aplicação do método foi primeiramente proposta por Mathar [30], em 1934. Posteriormente Rendler e Vigness investigaram-no mais profundamente e estabeleceram os parâmetros básicos que permitiram torná-lo uma técnica prática.

O procedimento para medição da deformação aliviada pelo Método do Furo Central consiste em montar um sistema com três extensômetros orientados radialmente na forma de uma roseta, como mostra a figura 3.1.

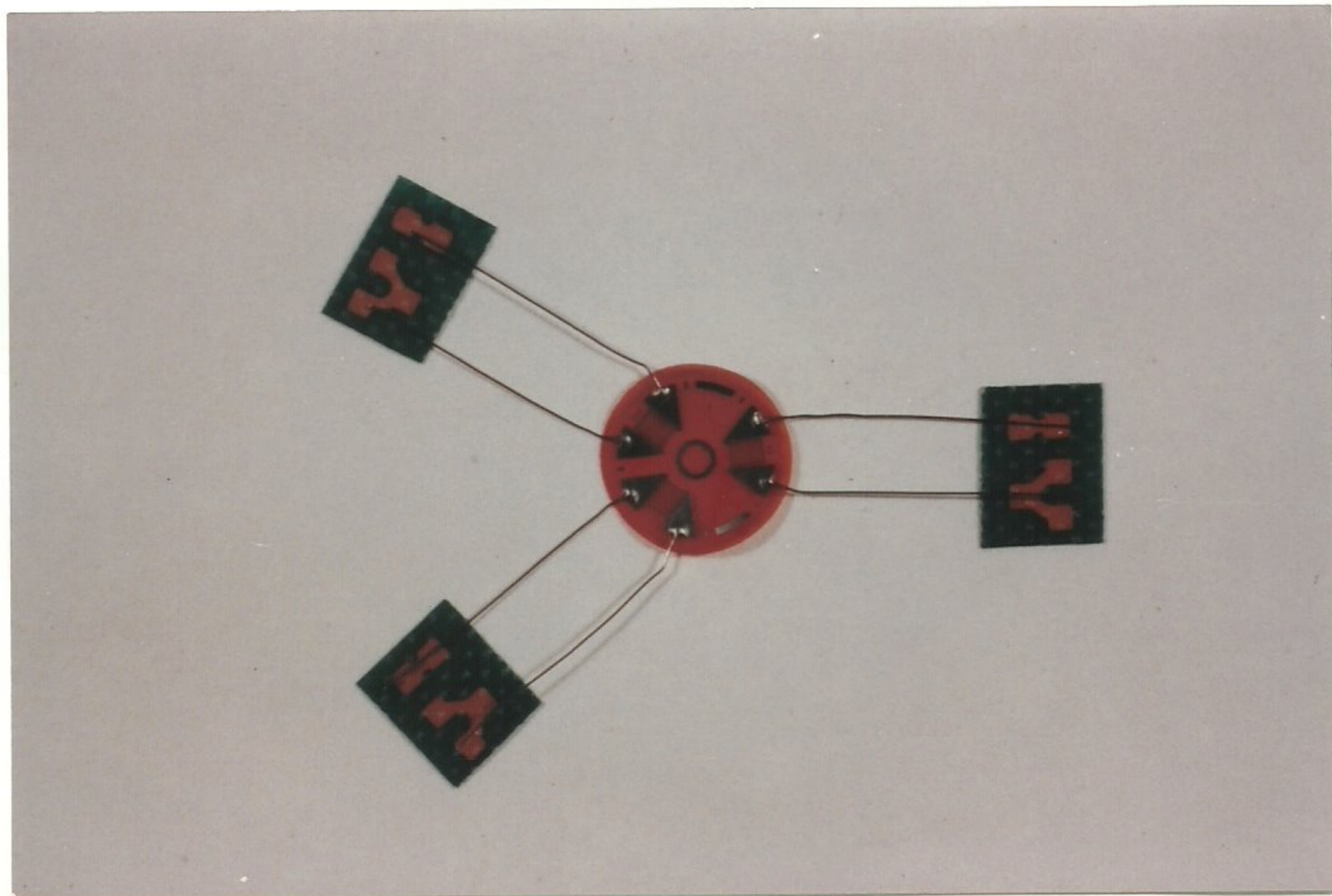


Figura 3.1 - Roseta de deformação para medição de tensões residuais

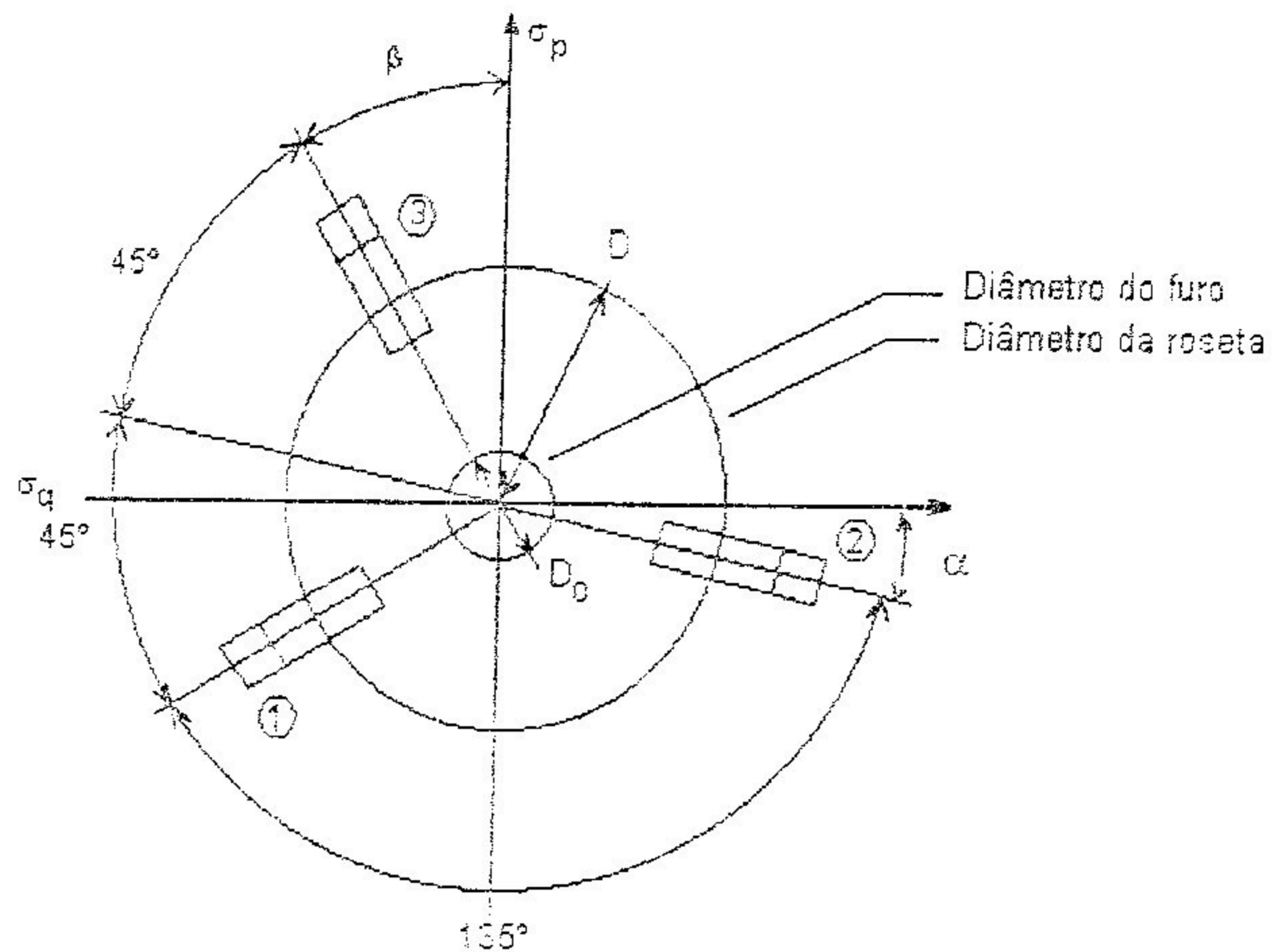


Figura 3.2 - Esquema de roseta de deformação para medição de tensões residuais

Apesar de os ângulos entre extensômetros poderem ser arbitrários, mas conhecidos, a disposição, como mostrada na figura 3.2, permite medições em direções diferentes em torno do furo, além de conduzir a expressões analíticas bastante simples. Ademais, tornou-se a configuração comercial mais empregada.

Considere-se então a abertura de um furo de pequeno diâmetro D_0 ($D_0 = 2R_0$), localizado no centro de uma roseta de deformação, fixada em uma região contendo inicialmente tensões residuais.

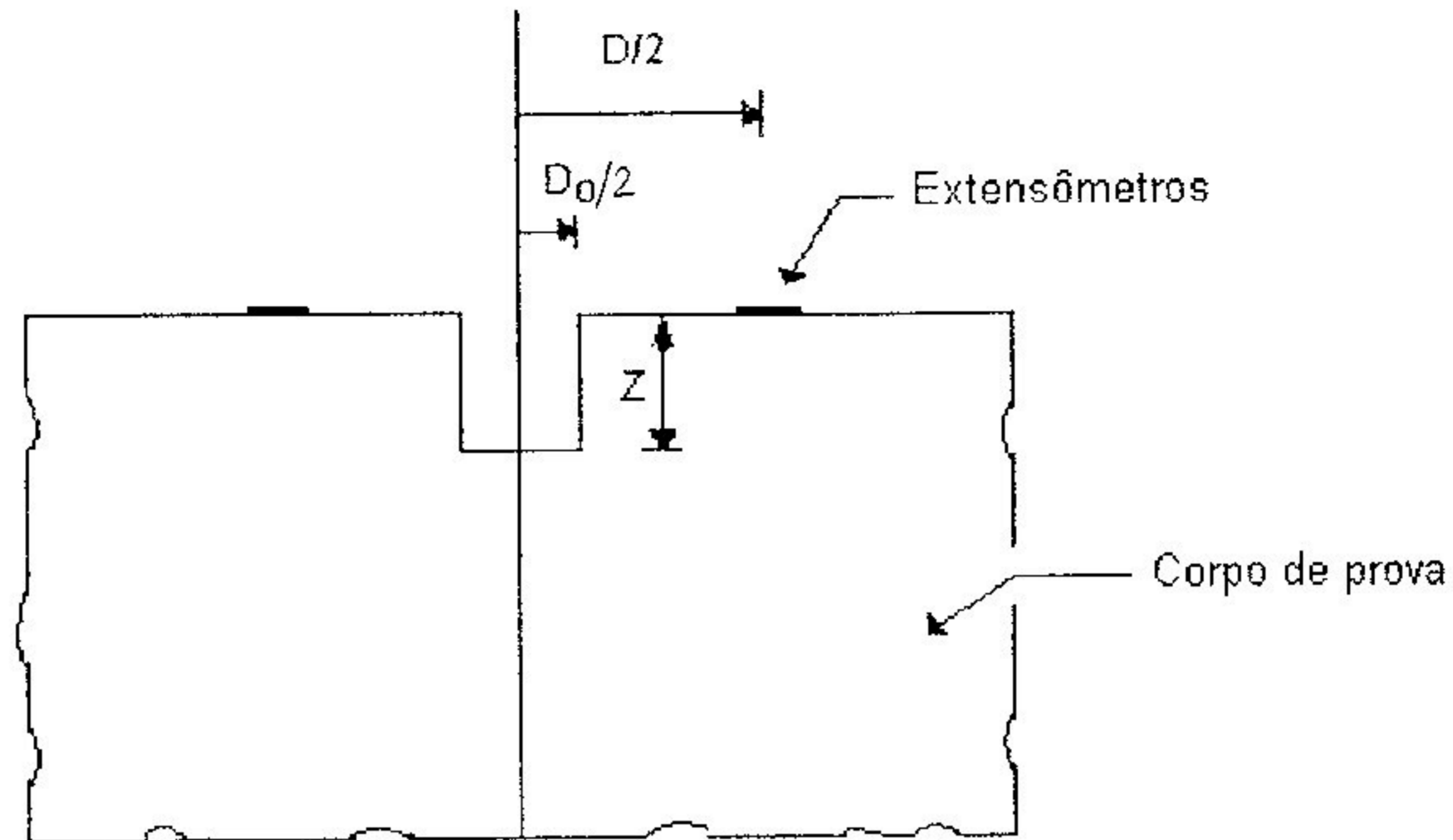


Figura 3.2 - Configuração de um furo no corpo de prova

A deformação aliviada em um ponto nas proximidades do furo será função das tensões principais σ_p e σ_q no local do furo e das relações geométricas entre o ponto e o furo, e o ponto e os eixos principais de tensões.

A solução de Kirsch [31] para uma distribuição de tensões em uma chapa fina a uma distância R em torno de um furo de raio R_0 , em um estado uniaxial de tensões é dada por

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{2} \left[\left(1 - \frac{1}{r^2} \right) + \left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2} \right) \cos 2\alpha \right] \quad (3.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma}{2} \left[\left(1 + \frac{1}{r^2} \right) - \left(1 + \frac{3}{r^4} \right) \cos 2\alpha \right] \quad (3.2)$$

onde σ_r e σ_θ são componentes de tensão radial e tangencial, respectivamente; r é um parâmetro adimensional definido pela relação R/R_0 e α é o ângulo entre a direção de medida e a direção da tensão uniaxial existente.

A distribuição de deformação radial ε_{rf} em um ponto P em torno do furo é dada por

$$\varepsilon_{rf} = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta) \quad (3.3)$$

onde E e μ são respectivamente o módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson do material.

A distribuição de deformação radial, antes da abertura do furo, é dada por

$$\varepsilon_{ri} = \frac{\sigma}{E}(\cos^2 \alpha - \mu \sin^2 \alpha) \quad (3.4)$$

A abertura do furo provoca então um alívio de deformação ε_r dado pela diferença entre ε_{rf} e ε_{ri} , ou seja,

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{rf} - \varepsilon_{ri} \quad (3.5)$$

Substituindo as equações 3.1 e 3.2 na equação 3.3, e levando na equação 3.5, obtém-se

$$\varepsilon_r = -\sigma \left(\frac{1+\mu}{2E} \right) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \left(\frac{4}{1+\mu} \right) \frac{1}{r^2} \cos 2\alpha \right] \quad (3.6)$$

A equação 3.6 mostra que a deformação radial ε_r varia senoidalmente com uma circunferência de raio R e pode ser representada por

$$\varepsilon_r = \sigma(A + B \cos 2\alpha) \quad (3.7)$$

onde A e B são função apenas de propriedades físicas do material e do parâmetro adimensional r, definido anteriormente pela relação R/R₀ (ou D/D₀).

Comparando as equações 3.6 e 3.7 temos que

$$A = -\frac{1+\mu}{2E} \left(\frac{1}{r^2} \right) \quad (3.8)$$

$$B = -\frac{1+\mu}{2E} \left[\left(\frac{4}{1+\mu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right] \quad (3.9)$$

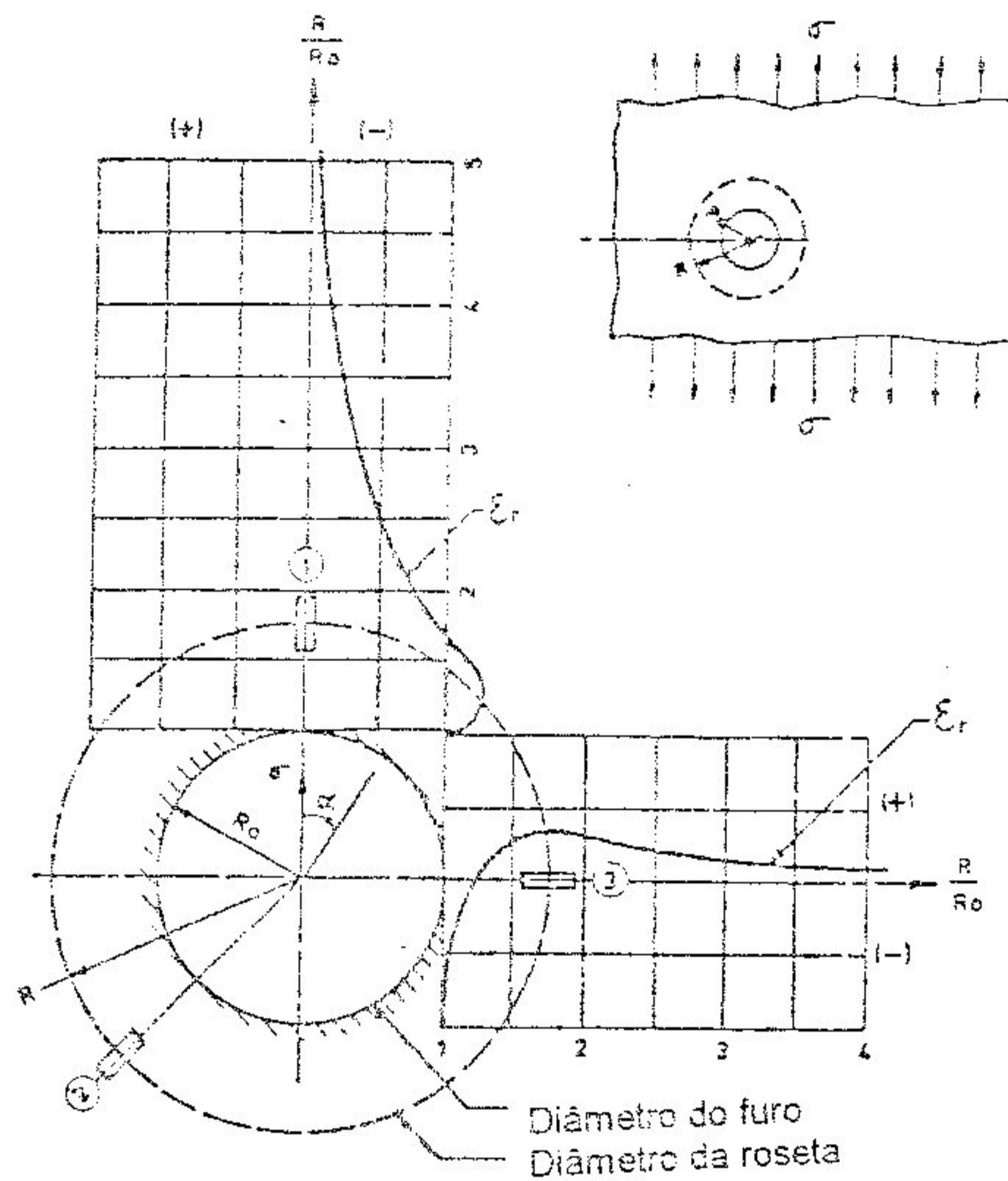


Figura 3.4 - Relação entre deformação aliviada e distância ao furo em um estado uniaxial de tensões [33].

No caso do estado duplo ou biaxial de tensões, com tensões σ_p e σ_q presentes simultaneamente, a deformação aliviada é dada por

$$\varepsilon_r = \sigma_p (A + B \cos 2\alpha) + \sigma_q \left[A + B \cos 2\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (3.10)$$

Como mostrado na figura 3.1, três extensômetros são orientados radialmente e instalados a uma distância R do centro segundo ângulos conhecidos, sendo

$$\alpha_3 = \beta \text{ (arbitrário)} \quad (3.11)$$

$$\alpha_2 = \beta + 45^\circ \quad (3.12)$$

$$\alpha_1 = \beta + 90^\circ \quad (3.13)$$

Substituindo estes ângulos α_3 , α_2 e α_1 e as correspondentes deformações medidas ε_3 , ε_2 e ε_1 na equação 3.10, forma-se um sistema de três equações e obtem-se as incógnitas σ_p , σ_q e β para o ponto no qual se fez as medidas de deformação.

Resolvendo o sistema de equações tem-se

$$\sigma_p = \frac{\varepsilon_3(A + B) \cos 2\beta - \varepsilon_1(A - B \cos 2\beta)}{4 A B \cos 2\beta} \quad (3.14)$$

$$\sigma_q = \frac{\varepsilon_1(A + B \cos 2\beta) - \varepsilon_3(A - B \cos 2\beta)}{4 A B \cos 2\beta} \quad (3.15)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \text{arc tg } \frac{\varepsilon_3 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (3.16)$$

3.3 - Avanços e limitações do método

Estudos recentes determinaram consideráveis avanços na utilização do Método do Furo Central. São apresentados a seguir alguns destes avanços e discutidas suas limitações.

3.3.1 - Alívio máximo de deformação

Uma das maiores limitações do Método do Furo Central é a de que apenas parte da tensão residual existente em um ponto pode ser medida. Isto pode ser verificado matematicamente.

A máxima deformação aliviada em um estado uniaxial de tensões pode ser obtida através da equação 3.6. Fazendo-se $\alpha = 90^\circ$ teremos

$$\varepsilon_r = -\sigma_p \left(\frac{1+\mu}{2E} \right) \left[\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} - \left(\frac{4}{1+\mu} \right) \frac{1}{r^2} \right] \quad (3.17)$$

Derivando-se a equação 3.17 em relação a r, tem-se

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial r} = -\frac{\sigma_p}{2 E r^3} \left[-2(1+\mu) - 12 \frac{(1+\mu)}{r^2} + 8 \right] \quad (3.18)$$

Igualando a equação 3.18 a zero tem-se

$$-\frac{\sigma_p}{2 E r^3} \left[-2(1+\mu) - 12 \frac{(1+\mu)}{r^2} + 8 \right] = 0 \quad (3.19)$$

Supondo $\sigma_p \neq 0$ (estado uniaxial de tensões) tem-se

$$-2(1+\mu) - 12 \frac{(1+\mu)}{r^2} + 8 = 0 \quad (3.20)$$

Considerando-se corpos de prova de aço ($\mu = 0,30$), obtém-se $r = \sqrt{3}$. Portanto, a deformação aliviada será máxima para $r = \sqrt{3}$, ou seja, quando R for $\sqrt{3}$ vezes o raio do furo. Levando r na equação 3.17 tem-se

$$\varepsilon_r = 0,22 \frac{\sigma_p}{E} \quad (3.21)$$

Isto significa que apenas 22% da deformação causada por σ_p será aliviada, portanto, mesmo pequenas variações nas medições têm efeito significativo na precisão dos resultados.

3.3.2 - Efeito da profundidade do furo

Quando as tensões residuais são uniformes, ao longo da profundidade, o máximo de deformação aliviada na vizinhança do furo ocorre quando a profundidade atinge, aproximadamente, o valor do diâmetro.

A figura 3.4 ilustra os resultados de vários testes [33] mostrando o aumento da deformação aliviada *versus* aumento da profundidade do furo.

Uma contribuição importante do trabalho de Rendler e Vigness [34] foi a demonstração de que, para materiais de mesma propriedade mecânicas, os coeficientes A e B são função simplesmente geométricas e, portanto, constantes para rosetas de mesma configuração geométrica. Vários estudos têm, entretanto procurado eliminar de A e B a dependência das propriedades do material. Uma proposição de Schafer [35] introduziu dois novos coeficientes a e b, definidos por

$$a = \frac{2 E A}{1 + \mu} \quad (3.22)$$

$$b = - 2 E B \quad (3.23)$$

Desta forma, as equações 3.14 e 3.15 podem ser reescritas como

$$\sigma_{max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4 A} - \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)^2}}{4 B} \quad (3.24)$$

$$\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4 A} + \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)^2}}{4 B} \quad (3.25)$$

Os valores de a e b são fornecidos a seguir para diferentes relações Z/D e D_o/D pelos gráficos 3.1 e 3.2.

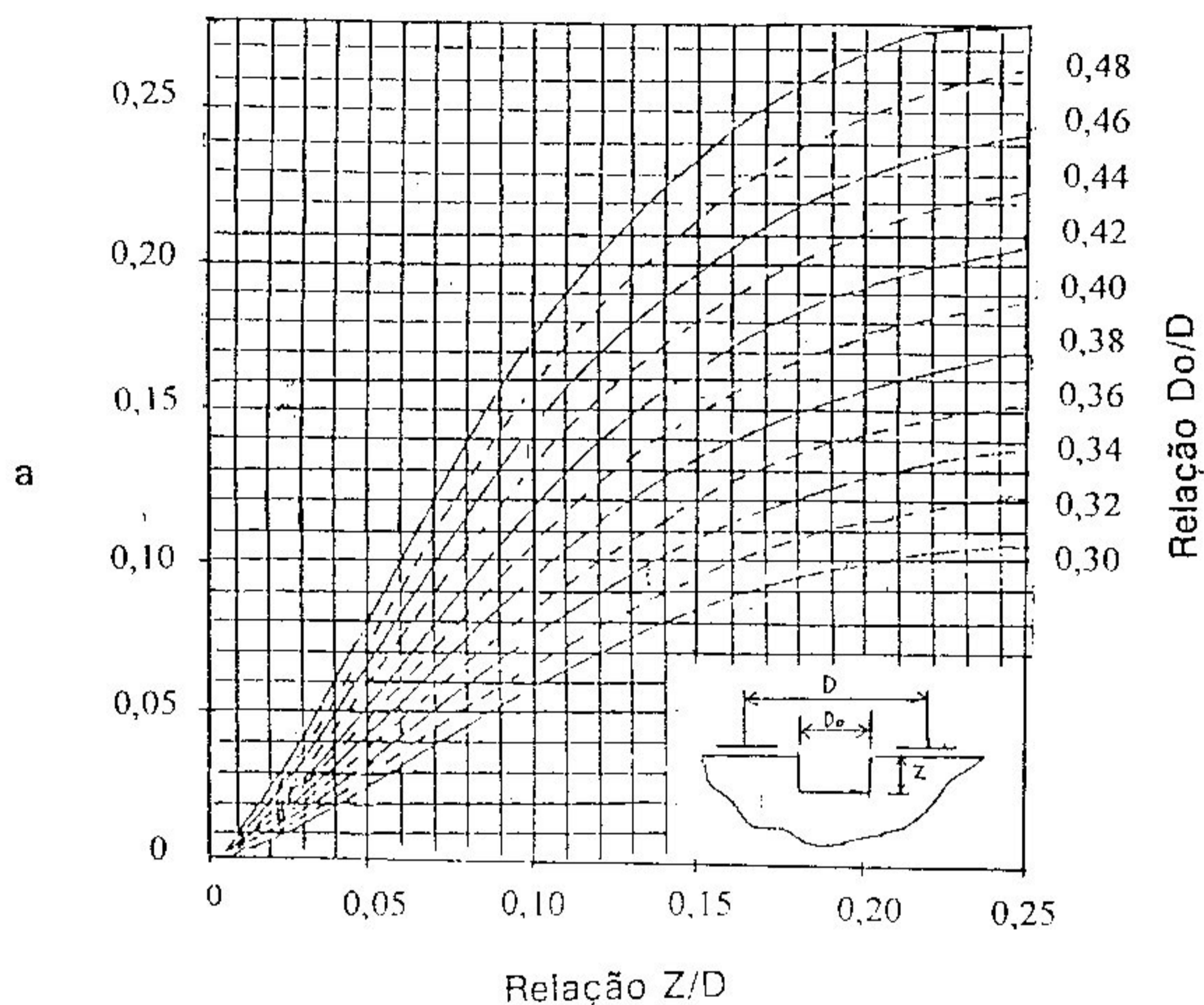


Gráfico 3.1 - Valores de constante a em função de Z/D e D_o/D [35].

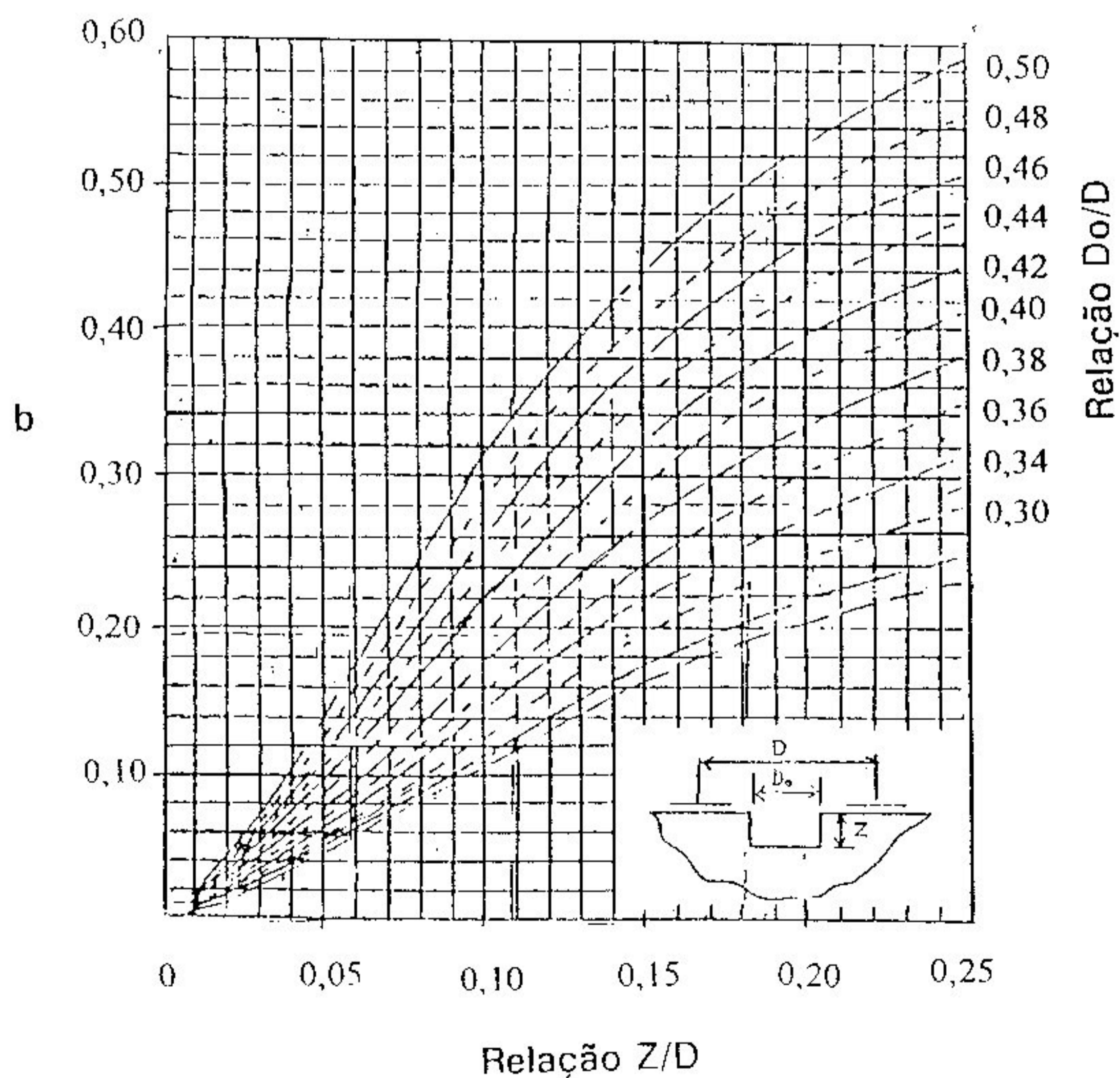


Gráfico 3.2 - Valores de constante b em função de Z/D e D_o/D [35].

Ao se medir tensões residuais que são uniformes com a profundidade, o furo deve ser feito continuamente até atingir a profundidade desejada. Entretanto, quando houver um gradiente de tensão na direção Z o furo deve ser feito em incrementos (figura 3.5), ou seja, através de pequenos acréscimos ΔZ na profundidade. A cada incremento ΔZ corresponderá um alívio $\Delta \varepsilon$ de deformação. Estes valores são registrados e utilizados para determinação de tensões residuais em qualquer ponto ao longo da profundidade Z. Segundo Kelsey [33], resultados de tensões obtidos para profundidade de até aproximadamente D/2 apresentam uma boa precisão.

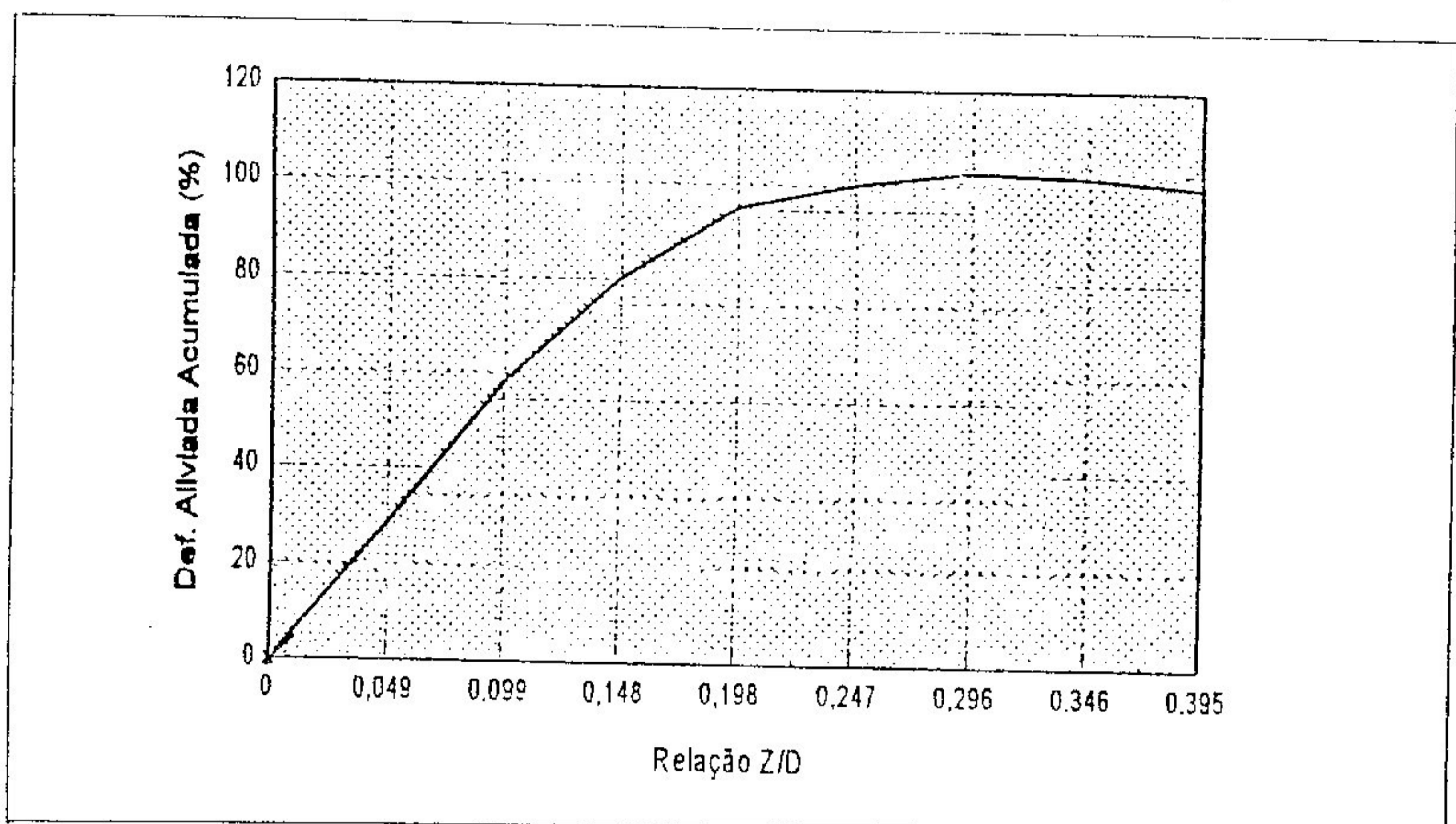


Figura 3.5 - Variação da deformação medida em relação a profundidade sob tensão uniforme

3.2.3 - Utilização de furação incremental

A técnica, utilizando furação incremental requer outros procedimentos de medição, assim como um maior cuidado na execução do furo. Portanto esta técnica deve ser reservada para somente aqueles casos nos quais a informação sobre variação das tensões residuais com a profundidade for considerada importante.

O processo de medição consiste nas seguintes etapas:

- a) Depois de cada incremento no furo as deformações, indicadas pelos três extensômetros, são registradas e marcadas em um gráfico de porcentagem de deformação aliviada no incremento *versus* porcentagem perfurada em relação a D. Assume-se a hipótese de que para Z/D a deformação aliviada é máxima.
- b) Quando for atingida a profundidade de aproximadamente $Z/D = 0,4$, a broca de perfuração é retirada e é feita a medição do diâmetro Do do furo com um microscópio.
- c) A porcentagem de deformação aliviada é marcada no gráfico *versus* a relação adimensional Z/D . Se a curva de porcentagem de deformação aliviada *versus* a relação Z/D não for similar àquela indicando variações de tensões residuais com a profundidade, então as deformações são tratadas como uniformes apenas nos incrementos.
- d) As tensões residuais para qualquer incremento na profundidade é então obtida pelo tratamento da variação da deformação medida naquele incremento como se ela fosse uniforme, calculando as deformações equivalentes para Z/D e determinando-se a tensão residual equivalente.

Este procedimento será exemplificado no capítulo 5.

CAPÍTULO 4

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE TENSÕES RESIDUAIS

4.1 - Programa de testes

Foram ensaiados dois perfis soldados de aço tipo I, cortados à maçarico, sendo um perfil VS 300 x 200 x 12,5 x 6,5 (perfil 01) e um perfil CS 420 x 240 x 32 x 12,5 (perfil 02), mostrados na figura 4.1.



Figura 4.1 - Perfis ensaiados

Para o perfil 01 foram instrumentados 15 pontos, explorando-se sua simetria para obtenção do diagrama de tensões. Os pontos foram posicionados a uma distância tal que permitisse o traçado de uma curva representativa da distribuição de tensões residuais ao longo da seção transversal.

Para o perfil 02 foram instrumentados 18 pontos devido às suas dimensões, maiores que as do perfil 01.

O comprimento dos perfis foi de 1500 mm para que a seção transversal ensaiada não sofresse influência das deformações plásticas decorrentes do gradiente de temperatura durante o corte de suas extremidades.

As medições foram feitas em pontos localizados nas partes superior e inferior da mesa e nas laterais da alma do perfil, como mostram as figuras 4.2 e 4.3.

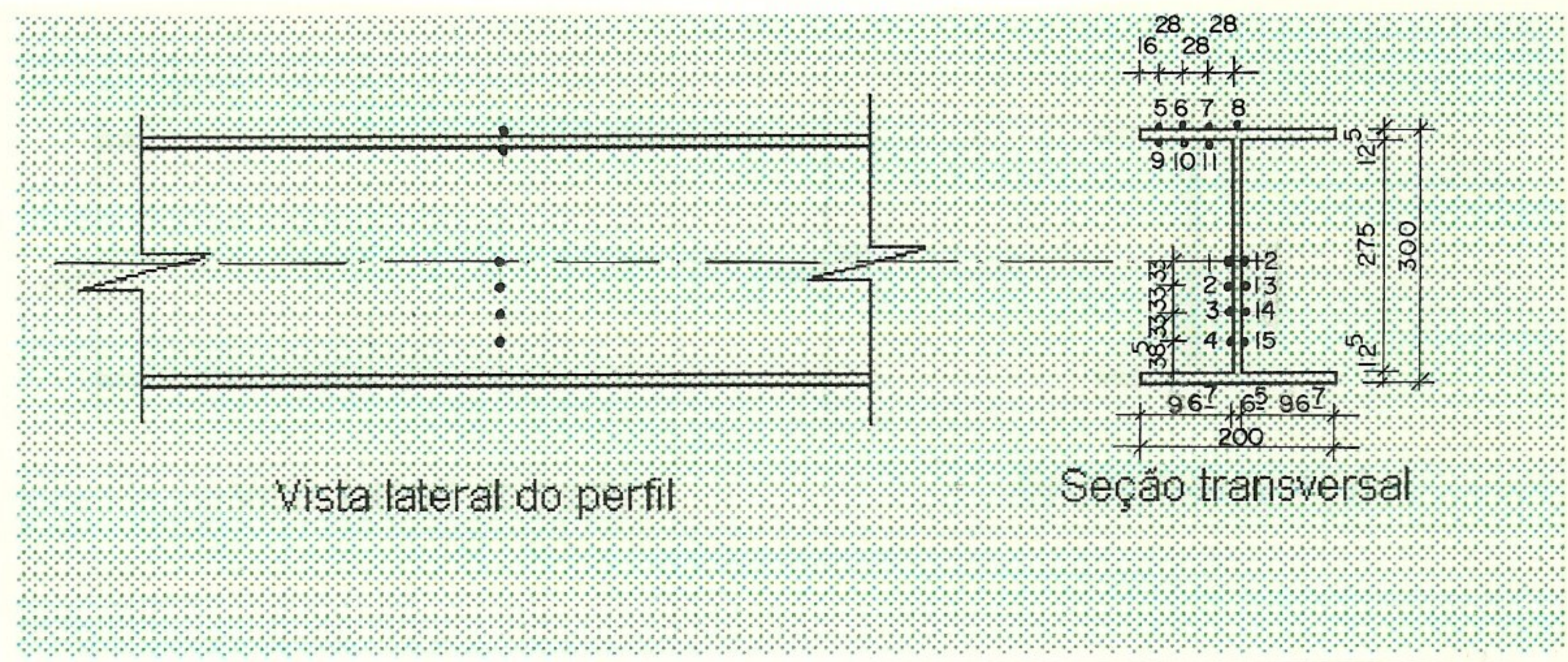


Figura 4.2 - Localização dos pontos ensaiados para o perfil 1

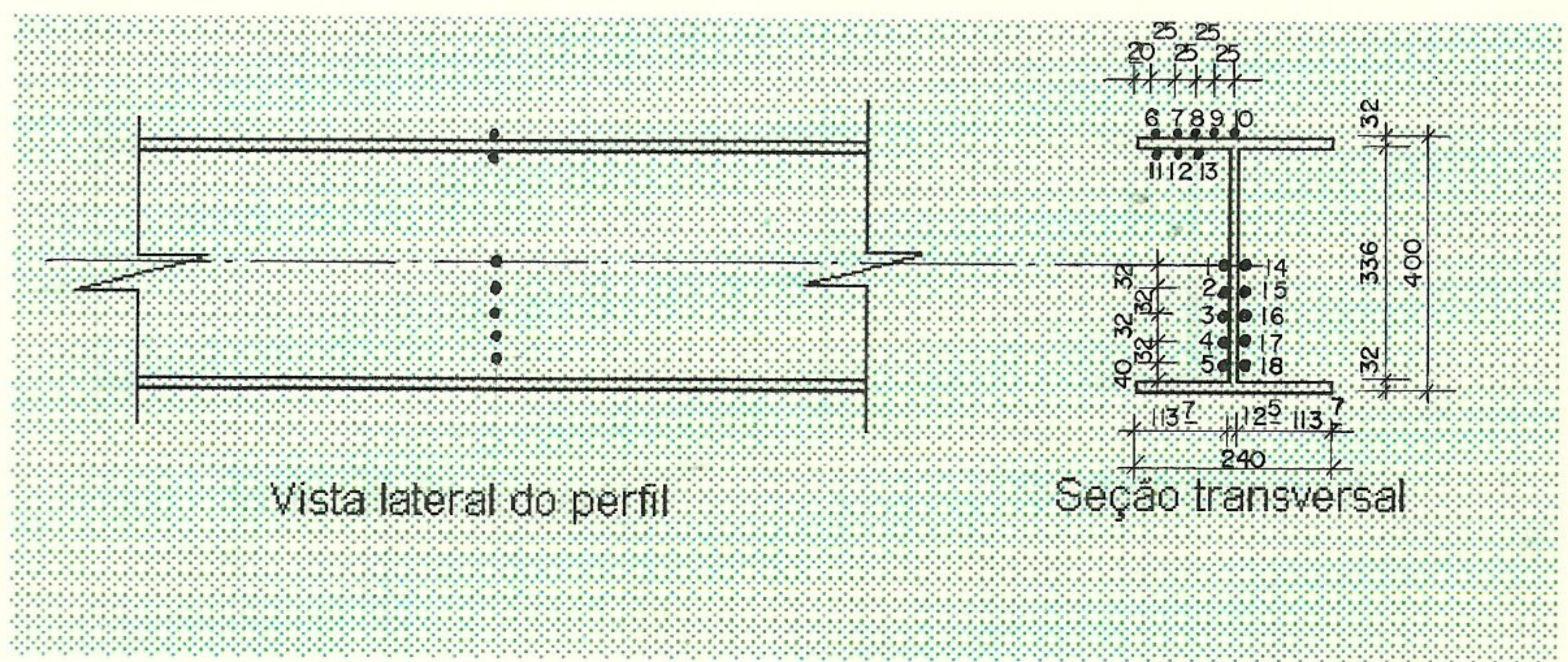


Figura 4.3 - Localização dos pontos ensaiados para o perfil 2

Para os pontos 09, 10 e 11 do perfil 01 e 11, 12 e 13 do perfil 02, foi necessária a execução de corte da mesa superior para instalação do aparelho de alinhamento e usinagem do furo. Para se avaliar possíveis alterações nas tensões residuais, em pontos da mesa oposta (onde seriam executados os ensaios), foi feita uma medição da variação de temperatura e de deformações durante o corte. Os resultados serão apresentados no capítulo 5.

4.1.1 - Materiais

Os materiais empregados nos trabalhos experimentais foram:

a) Lixa d'água

Foram utilizadas lixas de número 80, 120, 150, 180, 220 e 320 para preparação manual da superfície de colagem das rosetas de deformação.

c) Rosetas de deformação

Foram utilizadas rosetas de deformação tipo FRS-2-11 fabricadas pela TML-Tokyo Sokki Co. Ltd.. O comprimento do elemento sensor dos extensômetros empregados era de 1,5 mm, com resistência elétrica de 120 Ω e coeficiente de sensibilidade de 2,02.

d) Terminais de conexão

Os terminais de conexão empregados foram do tipo T-F3, fabricados por Kyowa, com comprimento de 10 mm e são mostrados na figura 4.4.

e) Adesivo

Foi utilizada cola tipo Loctite 496, à base de cianocrilato e com tempo de cura de aproximadamente 10 minutos.

f) Cabos de ligação

A ligação dos terminais aos instrumentos de medição foi feita por meio de cabos AF 3 x 1 x 28AWG-KMP, de fabricação Pirelli.



Figura 4.4 - Roseta de deformação e terminais de conexão

g) Eletrodo para solda

A solda de união da roseta aos terminais e cabos de ligação foi feita utilizando-se eletrodo tipo Trifluxo, de fabricação CESBRA.

h) Cobertura protetora

A cobertura de proteção da roseta contra umidade foi feita utilizando M-Coat-A fabricado pela Micro Measurements Ltd..

i) Brocas de perfuração

Para usinagem dos furos foram utilizadas brocas Carbide FG-37 de fabricação Union Carbide Ltd.

j) Perfis de aço MR 250, cortados e soldados por maçarico, com tensão de escoamento de 317 MPa, obtida experimentalmente (Certificado de Ensaio CDTN RC-AT1-027/95 – ver Apêndice IV).

Foram utilizados ainda cotonetes e acetona para limpeza da superfície, além de fita adesiva tipo durex.

4.1.2 - Equipamentos

Para realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

a) Aparelho para alinhamento e usinagem do furo tipo RS-200 Milling Guide, fabricado pela Micro-Measurements, adaptado para corte a alta velocidade (aproximadamente 300.000 rpm), como mostram as figuras 4.5 e 4.6.

b) Voltímetro digital de marca Fluke e ECB com resolução $1\mu\text{V}$, alimentação 110-220 V.

c) Centralizador com fonte de alimentação interna, fabricado pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), com saída para 03 canais.

d) Termopar para temperatura de até 1500°C , com precisão de 2°C .

e) Compressor de ar de fabricação White Martins e pressão de 90 MPa.

f) Aparelho de solda tipo EC 1001, de fabricação Weller, com variação de 0 a 700°C , alimentação 110 V.

g) Maçarico e oxiacetileno.

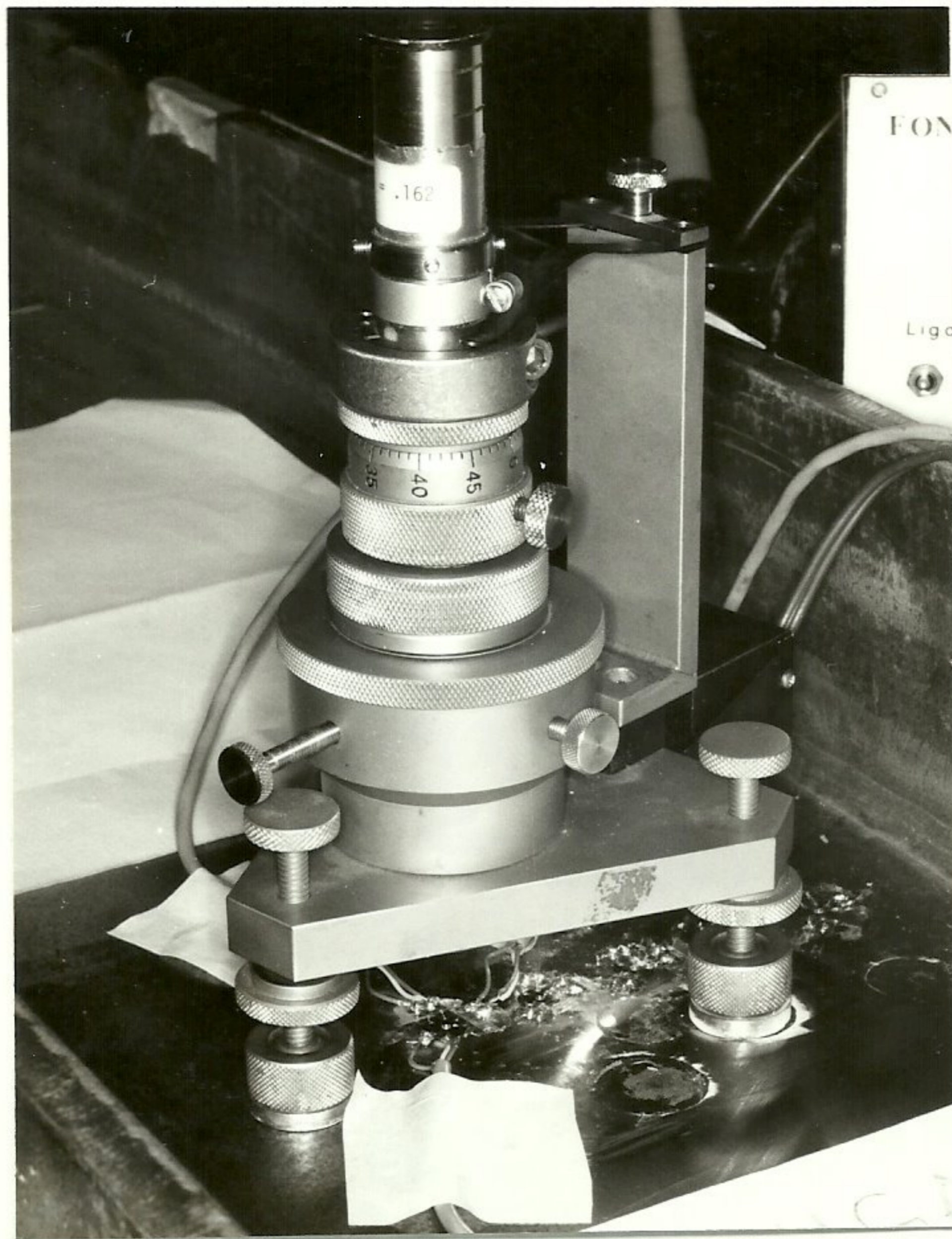


Figura 4.5 - Aparelho com microscópio para alinhamento do furo



Figura 4.6 - Aparelho com acessório para usinagem do furo

4.1.3 - Constantes de calibração

Constantes de calibração teóricas podem ser obtidas pelas equações 3.8 e 3.9, que consideram as leis da elasticidade, ou através do Método dos Elementos Finitos considerando-se o efeito de variação da geometria durante a execução do furo [35]. Estas constantes podem ser verificadas experimentalmente procedendo-se a ensaios em corpos de prova submetidos a estados de tensão conhecidos. Ensaio bem conduzidos têm fornecido resultados bastantes próximos de valores teóricos para constantes de calibração [36].

O procedimento para determinação das constantes pode ser simplificado utilizando-se um corpo de prova submetido a estado simples (uniaxial) de tensões. Instalando-se um extensômetro na direção da tensão principal σ_p , teremos β e σ_q nulos.

Neste trabalho foram empregados valores teóricos para constantes de calibração uma vez que várias medições experimentais foram feitas no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) [37] utilizando-se os mesmos materiais, equipamento e procedimentos aqui relacionados, e cujos resultados foram muito próximos de valores teóricos.

4.2 - Metodologia de ensaio

A obtenção de resultados experimentais tecnicamente confiáveis é possível somente com a utilização de materiais apropriados e instrumentação adequada.

No método do Furo Central os principais fatores determinantes da precisão e confiabilidade dos resultados são [38]:

- a) preparação da superfície para instalação da roseta;
- b) escolha e instalação da roseta de deformação;
- c) instrumentação para leitura de deformações;
- d) conhecimento das propriedades mecânicas do material ensaiado;

A seguir, é apresentada a metodologia empregada nos ensaios, obedecendo-se sempre às especificações da ASTM E 837/94 [39].

4.2.1 - Instalação das rosetas de deformação

A instalação de extensômetros isolados, orientados radialmente, não é fácil nem aconselhável, uma vez que pequenas variações de alinhamento, ângulos e distância ao centro do furo produzem grandes erros nas tensões residuais calculadas.

Utilizou-se nestes ensaios conjuntos de extensômetros (roseta de deformação), projetados especificamente para medição de tensões residuais. Essas rosetas de deformação, pelo fato de manterem constantes os ângulos entre extensômetros, permitiram uma fácil instalação, tendo, para isto, sido adotado o seguinte procedimento, recomendado pelo fabricante e pela Norma ASTM E 837/94.

- a) Lixamento manual da superfície com lixa d'água 80, 120, 150, 180, 220 e 320 nos sentidos transversal e perpendicular, alternadamente, até a superfície tornar-se totalmente polida, plana e espelhada.
- b) Marcação da superfície com linhas de referência para alinhamento das rosetas, utilizando-se caneta de ponta esferográfica.
- c) Limpeza da superfície utilizando-se algodão (cotonete) e acetona, retirando-se todas as partículas de poeira. Esta limpeza foi feita sempre em direção e sentido únicos.
- d) Preparação das rosetas de deformação e terminais para colagem, como mostrado na figura 4.7.

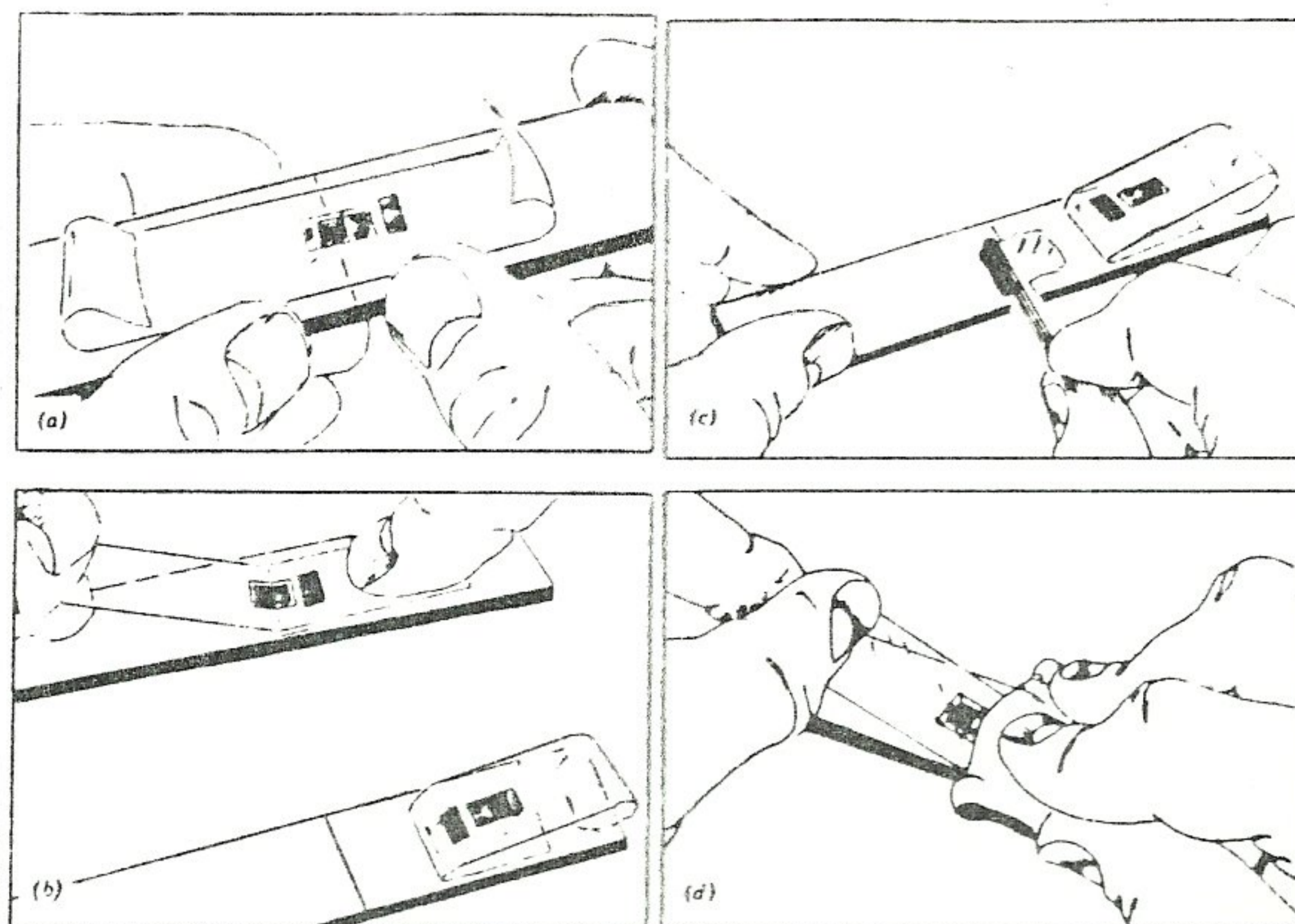


Figura 4.7 - Preparação de rosetas de deformação para colagem

e) Aplicação de uma gota de adesivo no verso da roseta de deformação e terminais. Utilizou-se uma folha de papel teflon para pressioná-la com o dedo polegar por 60 segundos, aproximadamente, até o início do tempo de pega do adesivo.

f) Soldagem roseta-terminais-cabos de ligação (figura 4.8).



Figura 4.8 - Ligação dos cabos à roseta de deformação

g) Aplicação de cobertura protetora contra umidade tipo M-Coat-A.

4.2.2 - Alinhamento e usinagem do furo

Rendler e Vigness [40] observaram que a precisão dos resultados no método do furo central está diretamente relacionada com a capacidade de o operador executar a furação no centro da roseta. É necessário, portanto, que o equipamento empregado possua um microscópio para permitir o alinhamento, ajustando o aparelho ao furo. Os dispositivos do aparelho para este alinhamento são apresentados na Norma ASTM E 837/94.

Para o alinhamento do furo faz-se a fixação do tripé sobre o ponto a ser ensaiado e ajusta-se os dispositivos de alinhamento do aparelho (figura 4.9). Em seguida é feita a furação como indicado na figura 4.10.

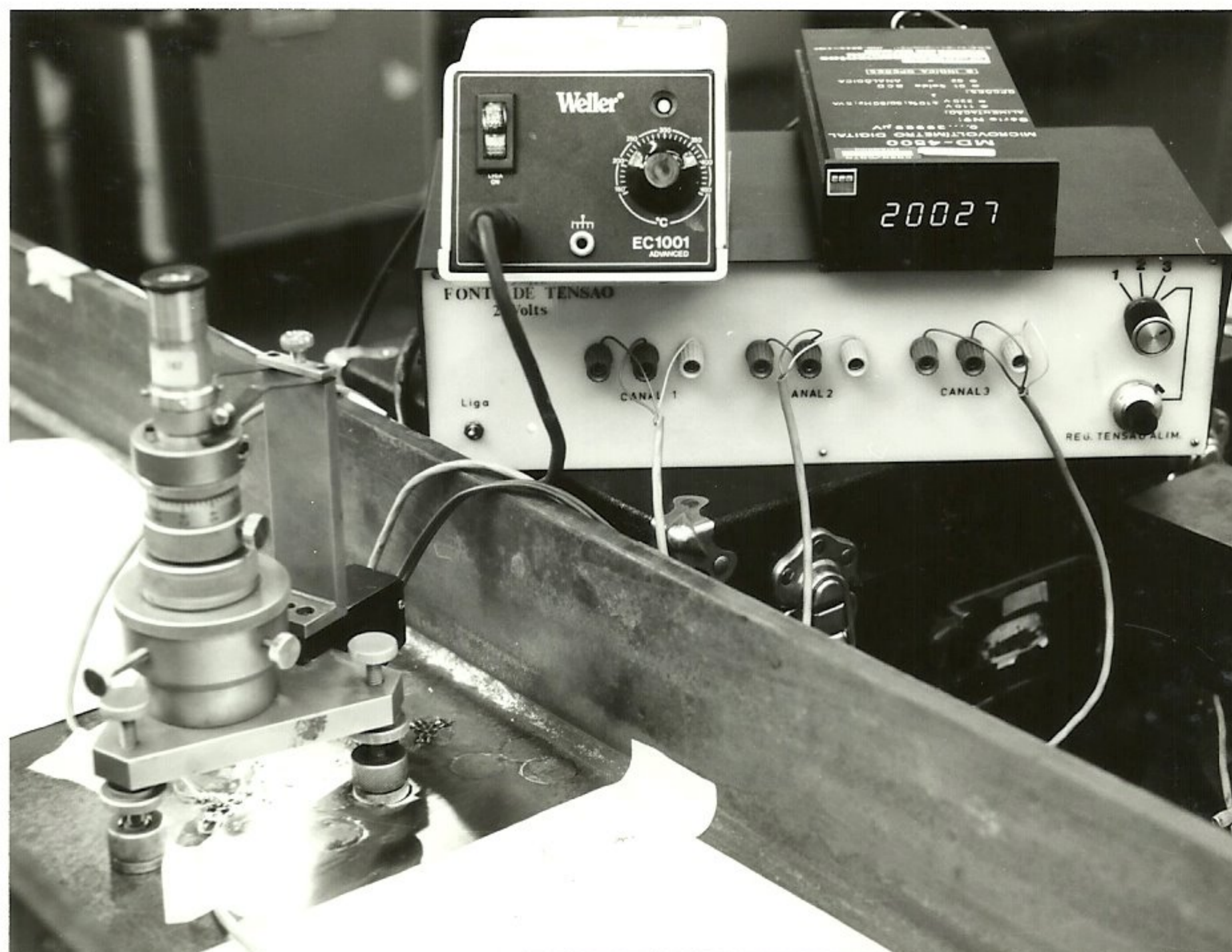


Figura 4.9 - Instalação do aparelho para alinhamento do furo



Figura 4.10 - Usinagem do furo

4.2.3 - Ensaios e aquisição de dados

A pesquisa, cujos resultados são aqui relatados, demandou um grande esforço de preparação e execução, principalmente, em sua parte experimental.

O elevado custo de cada ensaio, requerendo material importado, apresentou-se como problema inicial, uma vez que os recursos disponíveis eram reduzidos.

A utilização de equipamentos e infraestrutura existentes no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) permitiu, entretanto, que estes recursos, escassos, pudessem ser alocados para materiais de consumo, tornando possível a execução de um número significativamente maior de ensaios.

Herzog [41] apresentou, em 1987, um resumo de resultados de medição de tensões residuais para diversos tipos de perfis. Até então a literatura internacional relatava o ensaio de 409 pontos, sendo que para perfis soldados este número reduzia -se a apenas 11 ensaios. Neste trabalho foram ensaiados 33 pontos, o que representa aproximadamente três vezes o número de casos relatados.

Os valores apresentados, embora não consistam em amostra que mereça tratamento estatístico, permitem avaliar qualitativamente a distribuição de tensões residuais em perfis fabricados no Brasil, utilizando um processo comum de corte e soldagem, mas que difere significativamente do de outros países, como foi exposto no item 1.2.

Buscando uma maior proximidade com a realidade do mercado, escolheu-se perfis bastante empregados no projeto de vigas e colunas de edifícios, sendo um com espessura de alma e mesa elevadas (perfil 02) e outro com dimensões menores (perfil 01).

Os pontos ensaiados foram localizados no meio de cada perfil de comprimento 1500 mm. Assim, o processo de corte nas extremidades do comprimento não exerceu influência sobre os valores de tensões residuais que se pretendiam avaliar.

A leitura em pontos "internos" (09, 10 e 11 do perfil 01 e 11, 12 e 13 do perfil 2) nas mesas foi feita visando a obter valores médios de dois pontos opostos pela espessura uma vez que valores esperados das tensões em cada par desses pontos eram diferentes entre si.

Dentre as dificuldades encontradas para realização destes ensaios, uma referia-se à instalação do aparelho com microscópio para alinhamento e usinagem do furo (figuras 4.5 e 4.6). Devido à sua altura não era possível instalá-lo entre as duas mesas de um perfil para leitura dos pontos "internos". A solução adotada foi, após o ensaio de todos os demais pontos do perfil, efetuar-se o corte a maçarico da aba oposta, instrumentando-se a viga com termopares e extensômetros (roseta de deformação) para avaliação da variação de temperatura e de tensões

residuais (ver Apêndice IV). A figura 4.11 mostra o perfil após o corte.

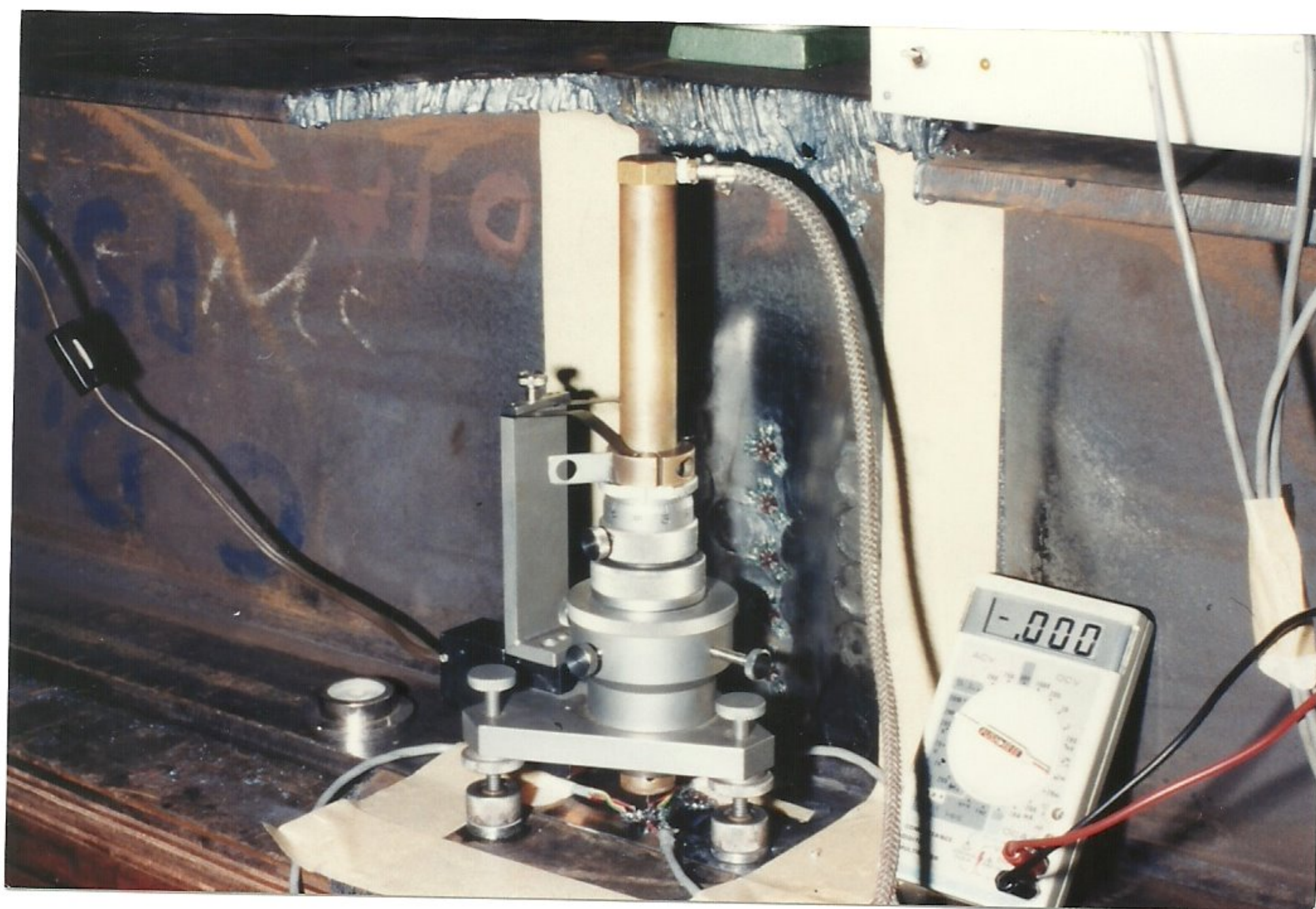


Figura 4.11 - Perfil após o corte da mesa

A distância dos pontos próximos às quinas dos perfis (pontos 04 e 15 do perfil 01 e 05 e 18 do perfil 02), também foi limitada pelas dimensões do tripé (base do aparelho para alinhamento e usinagem do furo), impossibilitando maior aproximação das bordas.

Para o perfil 01, com pequena espessura de mesa (6,3 mm), como consequência das distorções durante o processo de soldagem, surgiu uma depressão em sua parte superior como mostra a figura 4.12.

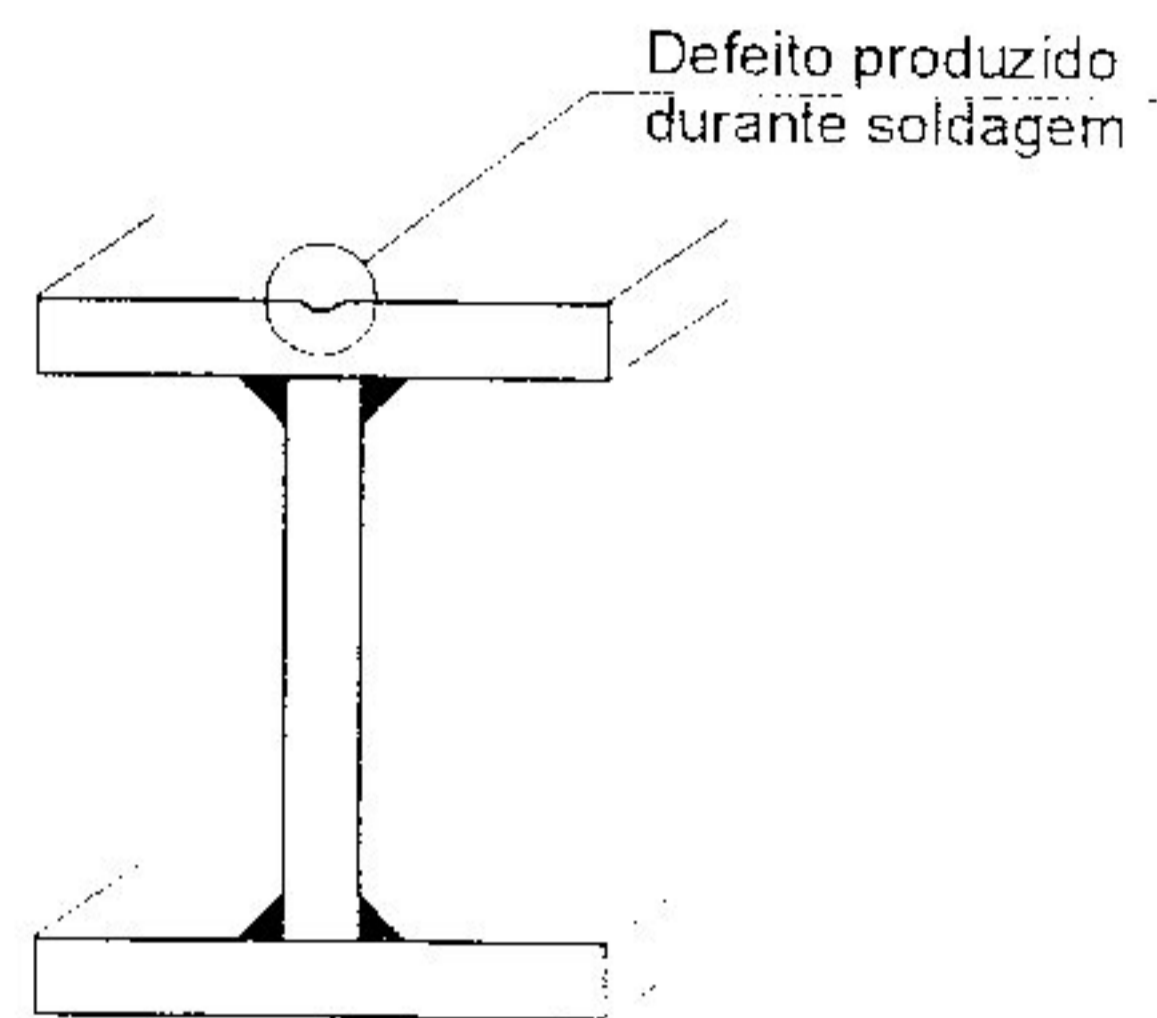


Figura 4.12 - Depressão no perfil devida à soldagem

Como a preparação da superfície exigia tornar plana a área, sem introdução ou alívio de tensões, foi feito o lixamento manualmente, o que demandou grande esforço e tempo. Da mesma forma, a furação somente foi feita um dia após a colagem de rosetas e terminais para que houvesse uma aderência perfeita entre superfície e extensômetros.

O tempo total consumido para realização dos ensaios, não incluído planejamento, foi de aproximadamente cinco meses, com uma média de um ensaio para cada três dias de trabalho de laboratório.

A aquisição de dados foi feita manualmente, coletando-se, aproximadamente 1100 dados para o total de ensaios, executados incrementalmente até a estabilização dos instrumentos de monitoração.

Para cada roseta foi verificada a resistência elétrica (120 Ohms) especificada pelo fabricante, utilizando-se um multímetro digital. Não houve problemas neste teste, embora quatro rosetas (13% do total utilizado) fossem danificadas durante a colagem (duas) e furação (duas).

Durante todo o trabalho de pesquisa, seja em seu planejamento, seja em sua execução propriamente dita, houve uma

grande preocupação com um possível alívio ou introdução de tensões que pudessem "mascarar" os resultados. Para isto, foram tomados diversos cuidados, dentre os quais podemos listar:

- a) Lixamento de toda a superfície manualmente, alterando-se o sentido toda vez que se reduzia a rugosidade da lixa d'água.
- b) Fabricação de perfis com grande comprimento (1500 mm) e localização dos pontos para ensaio na sua parte central.
- c) Furação a alta rotação (300.000 rpm), com baixa velocidade de perfuração para evitar aumento de temperatura.
- d) Utilização de óleo lubrificante em cada incremento de profundidade para redução do atrito e, portanto, evitar aumento de temperatura.
- e) Leitura de dados somente após a estabilização da voltagem.
- f) Corte do perfil monitorado com termopares e roseta de deformação para avaliação de variação de temperatura e deformações.
- g) Execução do ensaio sob temperatura constante (pequeno tempo de furação).

Para facilitar a aquisição manual de dados foi preparada uma planilha, anotando-se as informações necessárias à posterior análise dos resultados. A planilha e as informações detalhadas de suas linhas e colunas são apresentadas a seguir.

Tabela 4.1 - Planilha para aquisição de dados de ensaio

LOCAL DO ENSAIO:	(01)
NÚMERO DO PONTO:	(02)
POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO (03)	

PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traces	Z (mm)	V1 (μ V)	V2 (μ V)	V3 (μ V)	
0	0,000				Coefficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : (09)
10	0,254				Tensão de alimentação da roseta (em V): (10)
20	0,508				Diâmetro característico da roseta (D): 5.14 mm (11)
30	0,762				Diâmetro do furo (D_0): (12)
40	1,016				
50	1,270				
60	1,524				
70	1,778				
80	2,032				Módulo de elasticidade do material (E): (13)
90	2,286				Coefficiente de Poisson do material (ν): (14)
100	2,540				Roseta segundo Norma ASTM E 837/94 (15)
(04)	(05)	(06)	(07)	(08)	

A tabela 4.1 (Planilha para aquisição de dados de ensaio) refere-se a informações gerais da peça ensaiada para determinação das tensões residuais e direções principais, incluindo características da roseta e propriedades elásticas do material. Nessa planilha, as informações relacionadas são:

(01) Local do ensaio: indica o local (laboratório) onde foram realizados os ensaios

- (02) Número do ponto: indica o número do ensaio, em seqüência cronológica de execução.
- (03) Posicionamento dos extensômetros - pontos ensaiados: fornece, através de croquis, a posição em planta e corte do ponto ensaiado. São indicadas todas as dimensões importantes para sua localização na peça.
- (04) Profundidade do furo (Z), em traços: a profundidade é fornecida em traços. A profundidade em traços é dada diretamente pelo aparelho durante a furação incremental.
- (05) Profundidade do furo (Z), em mm. Cada traço corresponde a 0,0254 mm. Portanto, para obtenção desta coluna (em mm) deve-se multiplicar a anterior (coluna 04) por 0,0254.
- (06), (07) e (08) Leitura de voltagem dos extensômetros: V1, V2 e V3 (em μV) são as voltagens lidas nos três canais do voltímetro digital com resolução de $1\mu\text{V}$. Para os canais 1, 2 e 3, anotou-se a voltagem nas colunas 06, 07 e 08 da planilha, respectivamente, para cada incremento de furo. Fez-se ainda a anotação de leitura inicial, antes do início da furação, ou seja, para $Z = 0$.
- (09) Coeficiente de sensibilidade da roseta (Fator gage): depende de características geométricas da roseta e do material utilizado na sua fabricação. É fornecido pelo fabricante.
- (10) Tensão de alimentação: é a voltagem produzida pela passagem de corrente no voltímetro. Foi obtida por leitura digital.
- (11) Diâmetro característico da roseta: é fornecido pelo fabricante. Pode ser aferido utilizando-se o microscópio.
- (12) Diâmetro do furo: é o diâmetro do furo executado, medido com microscópio do aparelho de alinhamento e usinagem do furo. O

diâmetro é obtido determinando-se o número de divisões existentes na lente do microscópio e multiplicando-se por 0,041148 mm, conforme recomendação do fabricante.

(13) Módulo de elasticidade longitudinal: propriedade elástica do material ensaiado, utilizada na interpretação dos resultados.

(14) Coeficiente de Poisson: propriedade elástica do material ensaiado, utilizado na interpretação dos resultados.

Para cada ensaio obteve-se uma tabela como a descrita anteriormente. A tabela com os dados obtidos para o ponto 01 do perfil 01 é apresentada no capítulo 5. As demais foram incluídas no Apêndice I.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 - Introdução

Neste capítulo, são apresentados resultados experimentais de tensões residuais obtidos através de ensaios de perfis de aço e é feita uma análise para determinação de seus valores e de suas direções principais.

No item seguinte, apresenta-se um exemplo de cálculo manual das tensões e direções principais, explicando cada uma de suas etapas. Por este cálculo, perceber-se-á a praticidade do método, o qual permite a utilização de procedimento de cálculo sistematizado, através de planilhas, como será mostrado adiante.

Ademais, permitirá ao leitor verificar, de forma mais amena e em leitura corrente, a utilização das equações que regem o princípio e a teoria do método, como mostradas no capítulo 3.

Nos cálculos ora apresentados, as constantes de calibração empregadas foram obtidas pelo Método dos Elementos Finitos, como apresentadas por Schafer [42], considerando as deformações no ponto de instalação dos extensômetros da roseta, devido a variações na geometria do furo durante sua usinagem.

Finalmente, apresentar-se-á um programa para microcomputadores visando determinar estas tensões e direções principais, como será discutido adiante.

5.2 - Tensões e direções principais

5.2.1 - Determinação manual

Para facilitar a aplicação das equações mostradas no capítulo 3, as quais representam o princípio e teoria do Método do Furo Central, e apresentar de forma sistematizada o cálculo de tensões residuais e direções principais, será feito, manualmente, um exemplo de cálculo, explicando cada uma de suas etapas.

Os dados utilizados referem-se ao ponto 01 do perfil 01 (figura 4.2), cujos dados experimentais obtidos são mostrados na figura 5.1.

Tabela 5.1 - Dados experimentais obtidos para o ponto 01 do perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN					
NUMERO DO PONTO: 01					
POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSALADO					
PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traces	Z (mm)	V1 (μ V)	V2 (μ V)	V3 (μ V)	
0	0,000	1506	2342	2346	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_V : 2,02
10	0,254	1482	2321	2355	
20	0,508	1432	2286	2366	Tensão de alimentação da roseta: 3,000 V
30	0,762	1389	2256	2380	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	1358	2235	2389	
50	1,270	1342	2227	2396	Diâmetro do furo (D_o): 40 divisões
60	1,524	1334	2222	2401	
70	1,778	1326	2220	2404	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	1326	2221	2408	
90	2,286	1323	2224	2411	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	1325	2225	2412	
					Roseta segundo Norma ASTM E-837 94

Durante a usinagem do furo, para cada incremento na profundidade Z (figura 3.2), obteve-se a leitura de voltagem (em μV) para cada extensômetro da roseta. Para que sejam determinados os valores de deformação medida, entretanto, deve-se fazer uma correção dos valores de voltagem lidos, em função do circuito elétrico utilizado, do coeficiente de sensibilidade da roseta e da tensão de alimentação do circuito, obtendo-se a deformação medida.

Esta correção será calculada, para cada incremento de profundidade, da seguinte forma:

$$\text{Deformação medida } (\mu\epsilon) = \frac{(V_f - V_i) 4}{F_k V \cdot 10^5} \quad (5.1)$$

onde V_f é o valor final de voltagem lido após usinagem do incremento de furo, em Volts; V_i é o valor inicial de voltagem, em μV , lido antes da usinagem; 4 é um valor constante que depende do circuito elétrico empregado; F_k é um coeficiente de sensibilidade da roseta fornecido pelo fabricante e $V \cdot 10^5$ é a tensão de alimentação (excitação) do circuito, em μV .

As rosetas empregadas apresentavam coeficiente de sensibilidade de 2,02. A tensão de alimentação do circuito variou de 2,0 a 3,0 V e o circuito elétrico utilizado foi uma Ponte de Wheatstone em 1/4 de ponte (Apêndice III).

Os incrementos de profundidade (Z) foram feitos a cada 10 traços (0,254 mm) existentes no aparelho de alinhamento e usinagem do furo, marcados pelo próprio fabricante.

Como o diâmetro da roseta (D) empregada era de 5,14 mm (valor fornecido pelo fabricante), o diâmetro do furo (D_o) deveria ser tal que a relação D_o/D ficasse dentro de limites estabelecidos pela Norma ASTM E 837/94, ou seja, $0,30 \leq D_o/D \leq 0,50$. No caso do ponto analisado, o diâmetro do furo foi de 40 divisões (0,041148 mm/divisão) do aparelho, correspondendo a 1,65 mm. Portanto, $D_o/D = 0,32$.

Para facilitar o cálculo das tensões residuais e direções principais (equações 3.14 a 3.16), preencheu-se a tabela 5.2, utilizando-se o seguinte procedimento:

Coluna 01: Anotou-se a profundidade Z do furo, em mm, após usinagem de cada incremento. Este valor foi determinado durante o ensaio, sendo transcrito para a planilha de dados da tabela 5.1.

Coluna 02: Apresenta o cálculo da relação Z/D para cada incremento, onde Z é a profundidade usinada e D é o diâmetro da roseta. No exemplo, para Z=0,254 mm, temos

$$\frac{Z}{D} = \frac{0,254 \text{ mm}}{5,14 \text{ mm}} \therefore \frac{Z}{D} = 0,049 \quad (5.2)$$

Em seguida, faz-se, analogamente, o cálculo para as demais profundidades Z.

Coluna 03: Para a profundidade Z=0, a deformação medida será nula uma vez que não houvera alívio de deformação. Após o primeiro incremento de furação, a deformação medida será dada pela equação 5.1, sendo os valores das variáveis de cálculo apresentados na planilha de dados da tabela 5.1.

Para a profundidade Z = 0,254 mm, temos

$$\varepsilon_1 = \frac{(1482 - 1506) \cdot 4}{2,02 \cdot 3,0 \cdot 10^6} \mu\varepsilon \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_1 = -16 \mu\varepsilon \quad (5.4)$$

Coluna 04: O cálculo é feito de forma análoga ao da coluna 01.
Neste caso temos

$$\varepsilon_2 = \frac{(2321 - 2342) \cdot 4}{2,02 \cdot 3,0 \cdot 10^6} \mu\varepsilon \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_2 = -14 \mu\varepsilon \quad (5.6)$$

Coluna 05: Analogamente à coluna 03, temos que

$$\varepsilon_3 = \frac{(2355 - 2346) \cdot 4}{2,02 \cdot 3,0 \cdot 10^6} \mu\varepsilon \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_3 = 6 \mu\varepsilon \quad (5.8)$$

Coluna 06: É determinada somando-se, algebricamente, os valores de ε_3 e ε_1 de cada profundidade Z. Para Z = 0,254 mm teremos

$$\varepsilon_3 + \varepsilon_1 = 6 + (-16) \mu\varepsilon \quad (5.9)$$

$$\varepsilon_3 + \varepsilon_1 = -10 \mu\varepsilon \quad (5.10)$$

Coluna 07: Obtém-se de forma análoga ao cálculo da coluna 06, subtraindo-se da coluna 05 a coluna 03.

$$\varepsilon_3 - \varepsilon_1 = 6 - (-16) \mu\varepsilon \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_3 - \varepsilon_1 = 22 \mu\varepsilon \quad (5.12)$$

Coluna 08: Deve ser calculado, para cada incremento o valor de $\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$

Para $Z = 0,254$ mm temos que

$$\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 = 6 + (-16) - 2(-14) \text{ } \mu\varepsilon \quad (5.13)$$

$$\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 = 18 \text{ } \mu\varepsilon \quad (5.14)$$

Colunas 09 e 10: São anotadas as constantes de calibração a e b para cada incremento, obtidas através das figuras 5.1 e 5.2, em função das relações Do/D e Z/D .

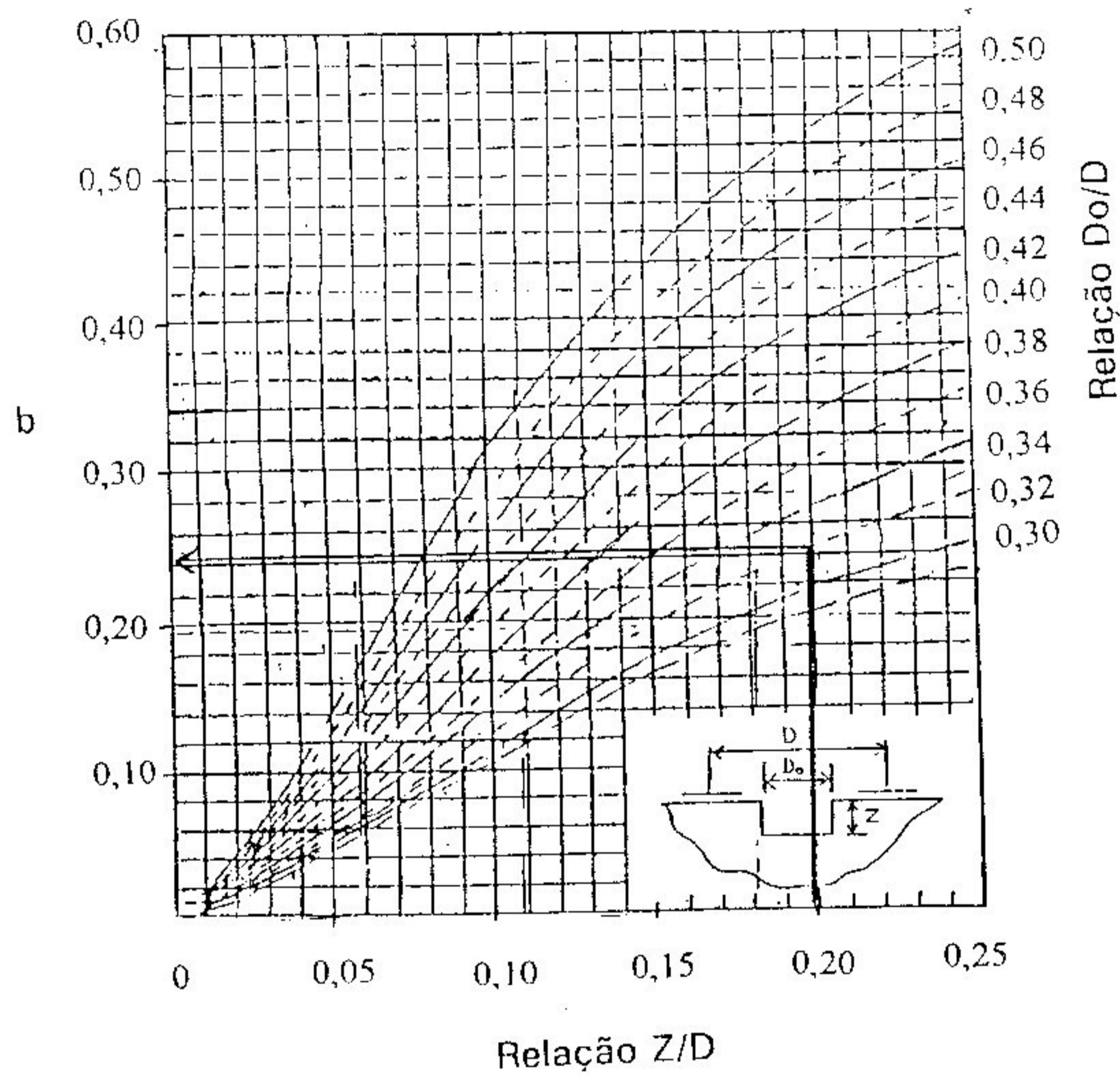


Figura 5.1 - Constantes de calibração obtidas através do Método dos Elementos Finitos, considerando a relação Z/D e Do/D [42].

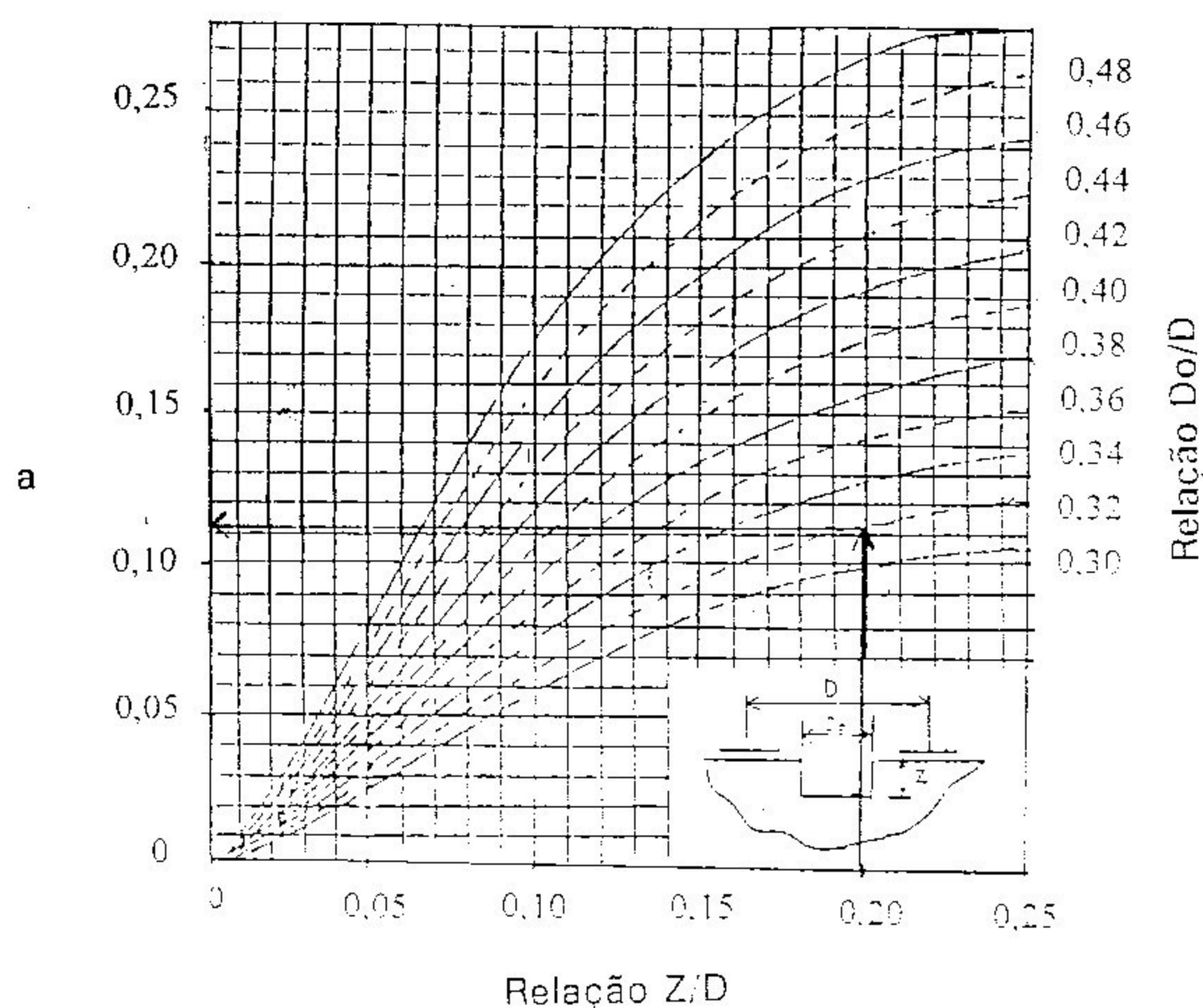


Figura 5.2 - Constantes de calibração obtidas através do Método dos Elementos Finitos, considerando a relação Z/D e Do/D [42].

Como há um grande número de curvas convergindo para a origem no gráfico, será tomado, neste exemplo manual, um valor mais elevado para Z, com a finalidade apenas de facilitar a sua leitura.

Assim sendo, para $Z = 1,016$ mm temos que $Do/D = 0,32$ e $Z/D = 0,198$, portanto $a = 0,113$ e $b = 0,243$, como indicadas nas figuras 5.1 e 5.2.

Para as demais profundidades, os valores de \underline{a} e \underline{b} são anotados na tabela 5.2.

Colunas 11 e 12: Para determinar as constantes A e B, devem ser levados em conta as propriedades elásticas do material, como se apresenta nas equações 5.15 e 5.16.

$$A = \frac{1+\nu}{2E} \cdot a \quad (5.15)$$

$$B = \frac{1}{2E} \cdot b \quad (5.16)$$

Para o aço temos que $\nu = 0,29$ e $E = 208.000$ MPa. Portanto, para $Z=1,016$ temos

$$A = \frac{1+0,29}{2 \times 208.000} \times 0,112 \quad \therefore \quad A = 3,48 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1} \quad (5.17)$$

$$B = \frac{1}{2 \times 208.000} \times 0,241 \quad \therefore \quad B = 5,81 \times 10^{-7} \text{ MPa}^{-1} \quad (5.18)$$

Para os demais incrementos de profundidade, o cálculo é feito analogamente.

Coluna 13: Nesta coluna faz-se o cálculo das direções principais, utilizando-se a equação 3.16, transcrita a seguir, e os dados obtidos nas colunas 07 e 08 (tabela 5.2).

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (5.19)$$

Para $Z = 0,254$ mm temos que

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{18}{22} \quad (5.20)$$

$$\alpha = 20^\circ \quad (5.21)$$

Colunas 14 e 15: As tensões máxima e mínima são dadas pelas equações 3.14 e 3.15, transcritas a seguir.

$$\sigma_{\text{máx, min}} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{4A} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{4B} \quad (5.22)$$

Todas as variáveis desta equação foram calculadas nas colunas 06 a 12 da tabela 5.2. Para a profundidade $Z= 0,254$ mm tem-se

$$\sigma_{\text{máx, min}} = \frac{-10 \times 10^{-6}}{4 \times 9,020 \times 10^{-8}} \pm \frac{\sqrt{(22 \times 10^{-6})^2 + (18 \times 10^{-6})^2}}{4 \times 1,374 \times 10^{-7}} \text{ MPa} \quad (5.23)$$

Portanto

$$\sigma_{\text{máx}} = 24 \text{ MPa} \quad (5.24)$$

$$\sigma_{\text{min}} = -79 \text{ MPa} \quad (5.25)$$

A tabela 5.2, para estas profundidades, bem como para as demais, é apresentada a seguir.

Tabela 5.2 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	-16	-14	6	-10	22	18	0,029	0,057	9,02098E-08	1,37449E-07	20	-79	24
0,508	0,099	-33	-23	7	-26	40	20	0,063	0,122	1,95973E-07	2,94189E-07	13	-71	6
0,762	0,148	-28	-20	9	-19	38	20	0,094	0,195	2,92404E-07	4,70219E-07	14	-39	6
1,016	0,198	-20	-14	6	-15	26	13	0,112	0,241	3,48396E-07	5,81143E-07	13	-23	2
1,270	0,247	-11	-5	5	-6	15	5	0,12	0,28	3,73282E-07	6,75187E-07	9	-10	2
1,524	0,296	-5	-3	3	-2	9	5	0,125	0,31	3,88835E-07	7,47528E-07	15	-5	2
1,778	0,346	-5	-1	2	-3	7	-1	0,13	0,322	4,04389E-07	7,76465E-07	-4	-4	0
2,032	0,395	0	1	3	3	3	1	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	9	1	3
2,286	0,445	-2	2	2	0	4	-4	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	-23	-2	2
2,540	0,494	1	1	1	2	-1	1	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	-23	1	1

Como se trata de cálculos repetitivos, foi desenvolvido um programa para microcomputadores, em linguagem Pascal, para análise automática dos dados (ver Apêndice II), obedecendo-se às especificações da Norma ASTM E 837/94. O programa permite a entrada de dados por tela ou por arquivo. Para isto, devem ser fornecidas os dados de entrada, da seguinte maneira:

a) Entrada por arquivo:

Deve ser aberto um arquivo com o nome Dados.dat, digitando-se, em formato livre, os seguintes dados:

1a. linha: Número do ponto ensaiado.

2a. linha: Nome da peça ensaiada.

3a. linha: Localização do ponto ensaiado na peça.

4a. linha: Diâmetro do furo, em número de traços do aparelho.

5a. linha: Tensão de alimentação do circuito, em V.

6a. linha: Profundidade dos incrementos (em traços do aparelho) e voltagem lida para cada extensômetro naquela profundidade.

A seguir, apresenta-se como exemplo, um arquivo Dados.dat. Os dados são os mesmos utilizados no cálculo manual mostrado no item 5.2, bem como os valores mostrados na figura 5.1.

Laboratório CDTN

01

2.02

3.00

5.14

38

208000

0.29

0	1506	2342	2346
10	1482	2321	2355
20	1432	2286	2366
30	1389	2256	2380
40	1358	2235	2389
50	1342	2227	2396
60	1334	2222	2401
70	1326	2220	2404
80	1326	2221	2408
90	1323	2224	2411
100	1325	2225	2412

b) Entrada por tela:

O programa cria automaticamente um arquivo Dados.dat. Os dados de entrada são colocados no arquivo na mesma sequência em que são solicitados.

O formato da tela é o mesmo apresentado na tabela 5.1, ou seja, a planilha para aquisição de dados de ensaio.

O programa emite ainda um relatório de dados para conferência, como mostrado a seguir:

ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS - DADOS PARA CONFERÊNCIA

Local do ensaio: Laboratório CDTN
Número do ponto: 01
Coeficiente de sensibilidade: (F_K): 2,02
Tensão de alimentação da roseta: 3,00 V
Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29

Prof.	V_1 (μV)	V_2 (μV)	V_3 (μV)
0	1506	2342	2346
10	1482	2321	2355
20	1432	2285	2366
30	1389	2256	2380
40	1358	2235	2389
50	1342	2227	2396
60	1334	2222	2401
70	1326	2220	2404
80	1326	2221	2408
90	1323	2224	2411
100	1325	2225	2412

Para cada ponto ensaiado são apresentados os valores de tensão máxima e mínima e direções principais, ao longo da profundidade, como mostra a tabela 5.2.

5.2.2 - Valores de tensões residuais máxima e mínima

Neste sub-item, será feita uma avaliação gráfica da distribuição de tensões residuais ao longo da profundidade e uma verificação de sua uniformidade.

A análise para o ponto 01 do perfil será discutida buscando estabelecer, para os pontos seguintes, um critério para determinação dos valores de tensão residual em cada um dos pontos ensaiados.

Utilizando-se furação incremental obtém-se valores de tensões máxima e mínima para cada incremento. No gráfico 5.1, valores de tensões para o ponto 01 do perfil 01 foram marcados em função da relação Z/D. Para os demais pontos ensaiados, os gráficos são apresentados no Apêndice I.

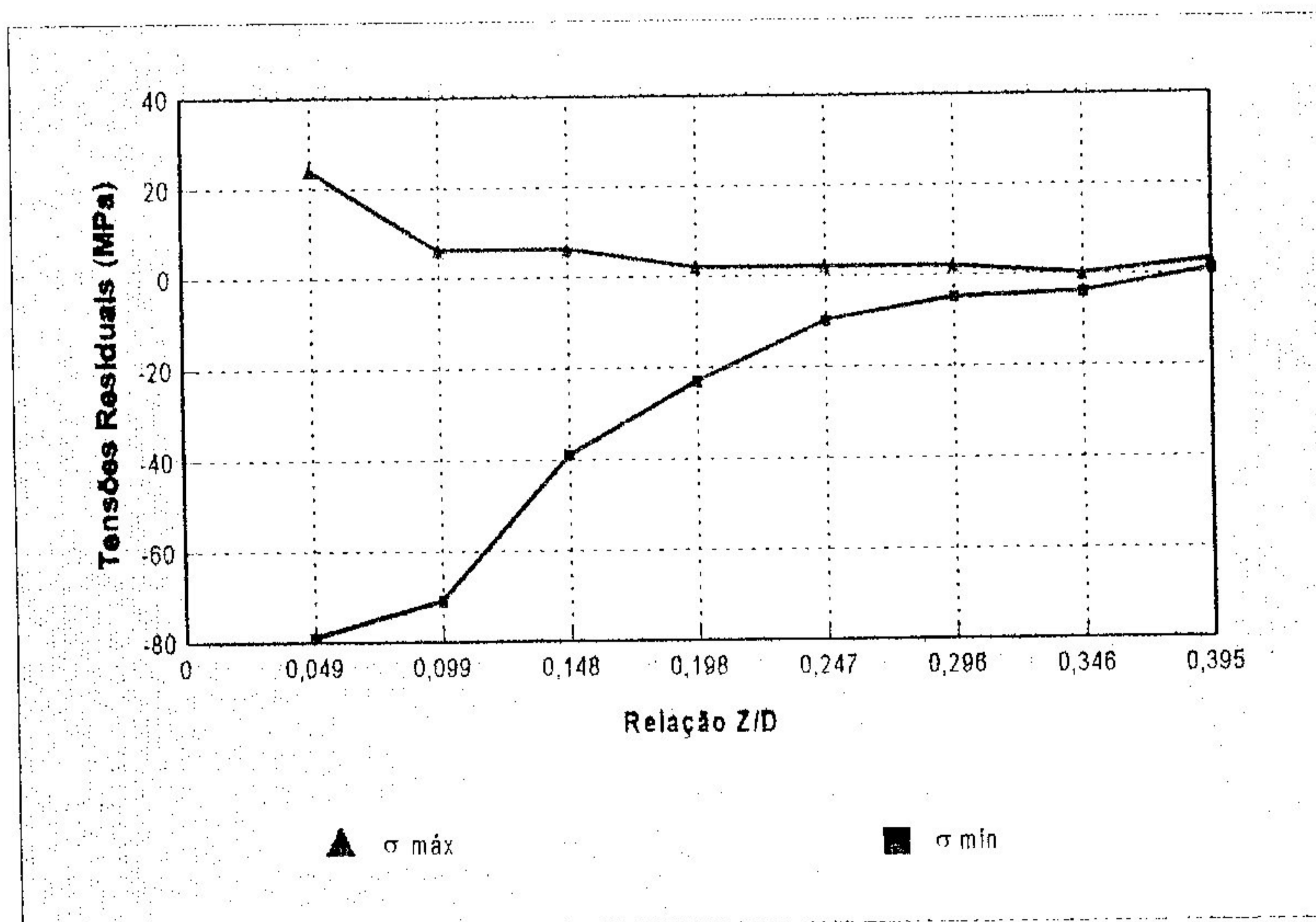


Gráfico 5.1 - Valores máximos e mínimos de tensões residuais para o ponto 01 do perfil 01

Quando a direção principal da tensão residual é mais próxima à direção do extensômetro 2 da roseta (figura 3.1) do que da dos extensômetros 1 e 3, a soma das deformações $\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$ será algebricamente maior que $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$. Neste caso, a porcentagem de deformação aliviada a ser plotada no gráfico deve ser $\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$, ao invés de $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$ [44].

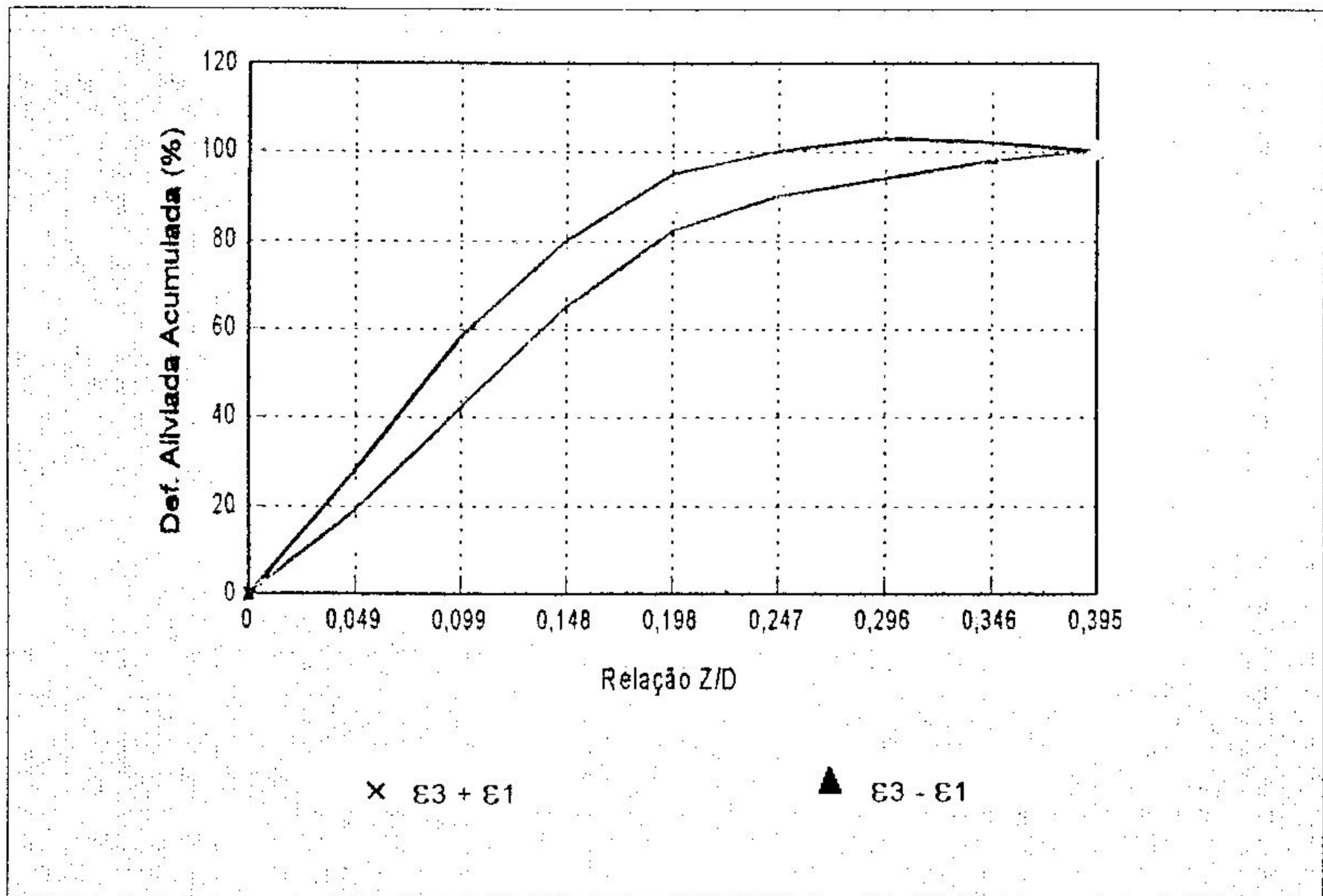


Gráfico 5.2 - Curva de porcentagem aliviada x relação Z/D para avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais ao longo da profundidade do furo.

Pontos obtidos fora da faixa entre as duas curvas indicam não-uniformidade de tensões ao longo da profundidade. Neste caso, a tensão nas camadas abaixo da superfície, calculadas com coeficientes a e b, mostrados nos gráficos 5.1 e 5.2, não representam a tensão residual real, mas a tensão residual uniforme equivalente, a qual, por definição, produziria a mesma deformação aliviada naquela profundidade. Os valores calculados de tensão residual uniforme equivalente fornecem, entretanto, informação qualitativa a respeito da variação de tensão com a profundidade. Além disso, para o primeiro incremento de furo, o valor de tensão residual uniforme equivalente representa a melhor estimativa para o valor de tensão

residual real média naquela camada [44]. Neste caso a tensão uniforme equivalente para o segundo incremento e para os subsequentes são cada vez menos sujeitos a interpretação quantitativa. Isto se deve ao fato de a deformação aliviada acumulada ser afetada de forma complexa pelas tensões aliviadas em todas as camadas anteriores. De acordo com recomendações da Norma ASTM E 837/94 a furação deve ser feita incrementalmente, registrando-se as deformações medidas e a profundidade perfurada para cada um dos incrementos. Estas informações são necessárias para se avaliar a forma como as tensões se distribuem ao longo da profundidade.

Segundo alguns autores [43, 44], não existe critério absoluto para verificação desta uniformidade de distribuição de tensões ao longo da profundidade. Estes autores indicam o uso da furação incremental para detectar a não uniformidade das tensões. Deve ser calculado, para cada incremento, a soma e diferença de deformações medidas, ou seja, $\epsilon_3 + \epsilon_1$ e $\epsilon_3 - \epsilon_1$ respectivamente. Em seguida, calcula-se a porcentagem de alívio correspondente em cada incremento até atingir, como recomendado pela referida Norma, $Z/D \sim 0.4$ (quando supõe-se aliviado o máximo de tensões).

Para o ponto 01 do perfil 01 foram calculados os alívios de deformação $\epsilon_3 + \epsilon_1$, $\epsilon_3 - \epsilon_1$ e $\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2$ para cada incremento, até $Z/D = 0,398$ e, em seguida, marcou-se, como exposto anteriormente os pontos calculados na curva padrão (gráfico 5.2), obtendo-se o gráfico 5.3.

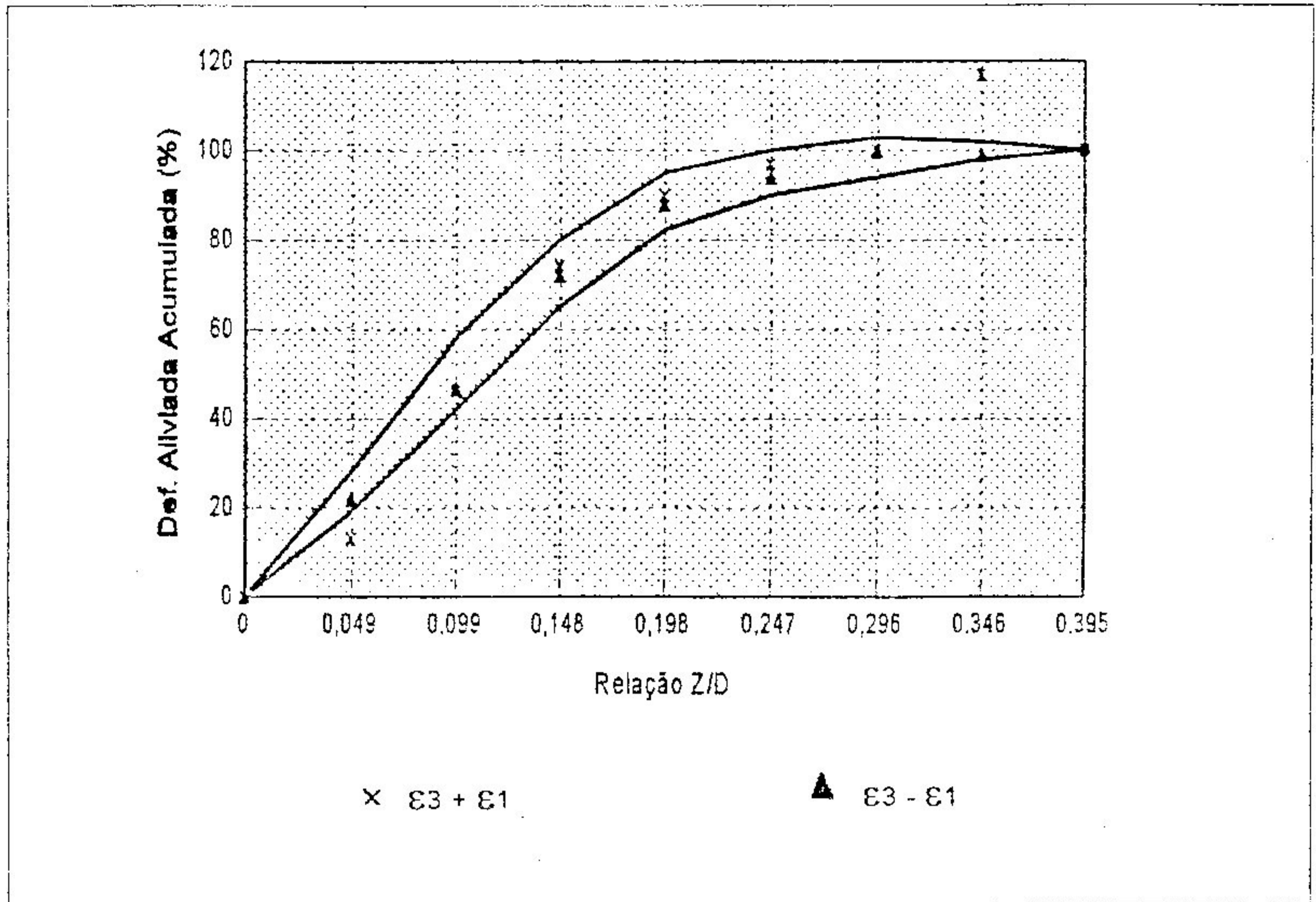


Gráfico 5.3 - Avaliação da uniformidade da distribuição de tensões residuais para o ponto 01 do perfil 01.

Pela análise do gráfico 5.3, é possível avaliar, qualitativamente, que as tensões residuais neste ponto são praticamente uniformes uma vez que mais de 80% dos pontos encontra-se na faixa limitada pelas curvas-limite. Estes valores devem ser plotados na curva padrão, (gráfico 5.2) recomendada pela ASTM E 837/94.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

6.1 - Generalidades

Além dos dados e de sua interpretação apresentada no capítulo 5, foi feita a determinação dos valores de tensões residuais e direções principais para cada ponto ensaiado. Para esta determinação considerou-se o alívio de deformação até uma relação $Z/D = 0,395$ ($\sim 0,40$) para os casos de tensão residual uniforme, desconsiderando-se os dados de alívio de deformação nos incrementos (o que equivale a uma furação não-incremental). Os resultados (obtidos de forma análoga à mostrada no item 5.2.1) são apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2.

Tabela 6.1 - Distribuição de tensões residuais para o perfil 01

Ponto	Posição	Tensões Principais e Direções Principais			Tensões para $\alpha = 0^\circ$		
		σ mín. (MPa)	σ máx. (MPa)	α (Graus)	σ mín. (MPa)	σ máx. (MPa)	τ_{xy} (MPa)
1	Alma	4	110	2	4	110	-4
2	Alma	10	108	-7	9	109	12
3	Alma	5	99	2	5	99	-3
4	Alma	7	104	2	7	104	-3
5	Mesa	0	177	-9	-5	182	29
6	Mesa	-49*	18*	25	-68*	37*	-40
7	Mesa	*	*	*	*	*	*
8	Mesa	-104	10	14	-112	18	-30
9	Mesa	*	*	*	*	*	*
10	Mesa	29	140	-26	-6	175	71
11	Alma	-13	70	-2	-13	70	3
12	Alma	21*	105*	5	20*	106*	-7
13	Alma	22	169	1	22	169	-3
14	Alma	-7	171	-3	-7	171	9
15	Alma	12*	128*	2	12*	128*	-4

(*) Tensão residual não-uniforme

Tabela 6.2 - Distribuição de tensões residuais para o perfil 02

Ponto	Posição	Tensões Principais e Direções Principais			Tensões para $\alpha = 0^\circ$		
		σ mín. (MPa)	σ máx. (MPa)	α (Graus)	σ mín. (MPa)	σ máx. (MPa)	τ_{xy} (MPa)
1	Alma	13	96	15	7	102	-24
2	Alma	10	104	12	6	108	-21
3	Alma	19	134	15	10	143	-33
4	Alma	10	145	10	6	149	-25
5	Alma	22	158	13	14	166	-33
6	Mesa	-155*	-22*	-10	-159*	-18*	24
7	Mesa	47	184	-8	44	187	20
8	Mesa	-29	130	-14	-40	141	42
9	Mesa	-259	10	1	-259	10	-5
10	Mesa	-233*	-141*	5	-234*	-140*	-8
11	Mesa	-58	-23	37	-104	23	-61
12	Mesa	45	169	5	44	170	-11
13	Mesa	21*	12*	1	21*	12*	0
14	Alma	85	164	-1	85	164	1
15	Alma	27	73	40	-82	182	-130
16	Alma	33	79	31	7	105	-43
17	Alma	40	89	21	32	97	-22
18	Alma	15	85	25	-4	104	-42

(*) Tensão residual não-uniforme

Pode-se comprovar a influência do corte das bordas da chapa e da ligação soldada mesa-alma. Isto pode ser explicado, como exposto no capítulo 2, pelo corte efetuado e pela variação de temperatura durante o processo de soldagem, que gera um gradiente de temperatura, alterando a distribuição de tensões residuais.

Para os perfis 01 e 02, observa-se, nas regiões de extremidade da alma, uma redistribuição de tensões, como mostram os diagramas das figuras 6.1 e 6.3.

Tais pontos ocorreram principalmente na região da solda e nas extremidades das mesas, onde foi efetuado o corte.

Para ambos os perfis, obteve-se valores de tensões significativamente elevados, comparados à tensão de escoamento do material ensaiado.

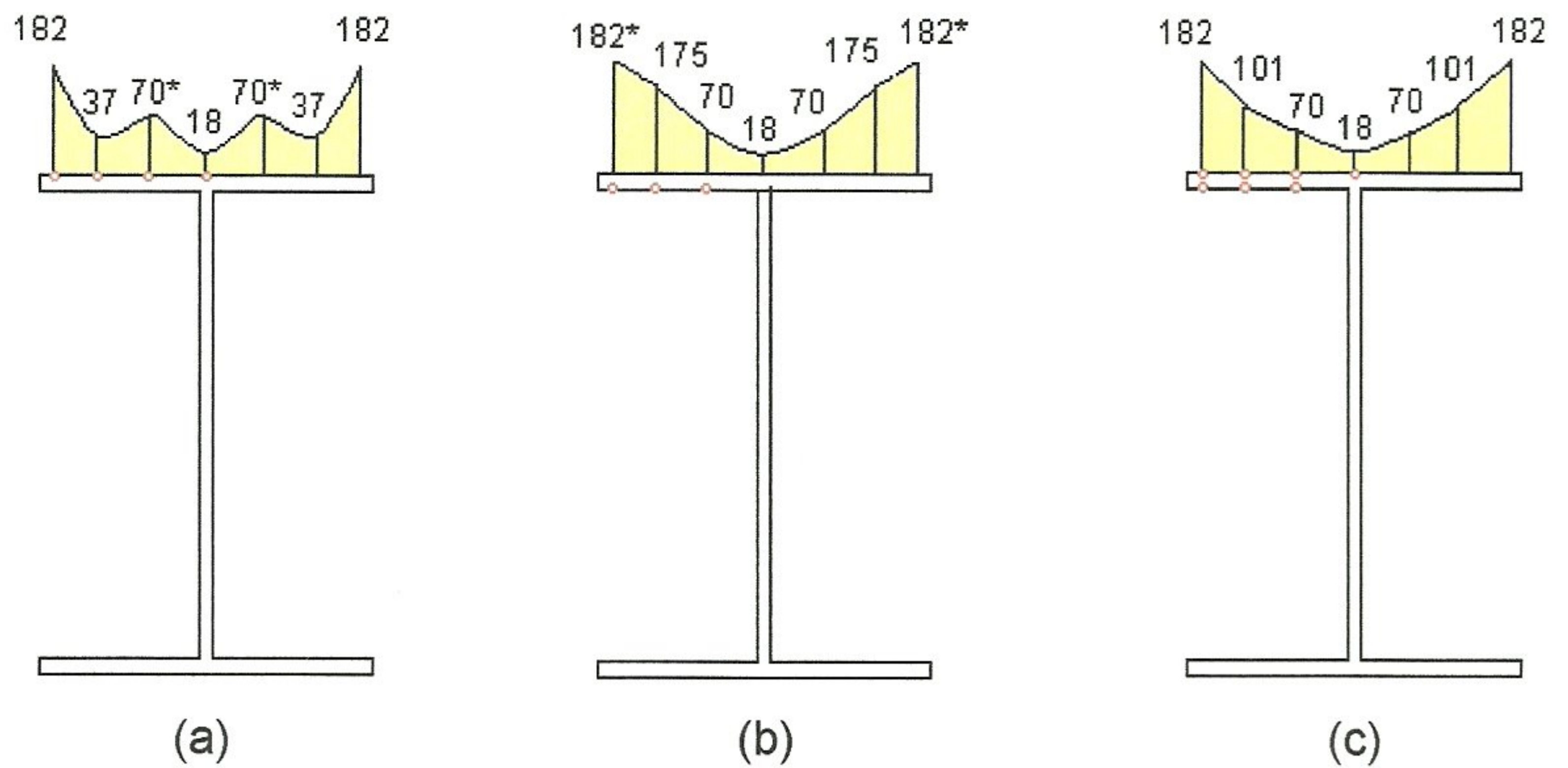


Fig. 6.1 - Diagrama de distribuição de tensões residuais máximas para $\alpha = 0^\circ$ na face superior da mesa (a), face inferior (b) e valores médios (c) obtidos para o perfil 01.

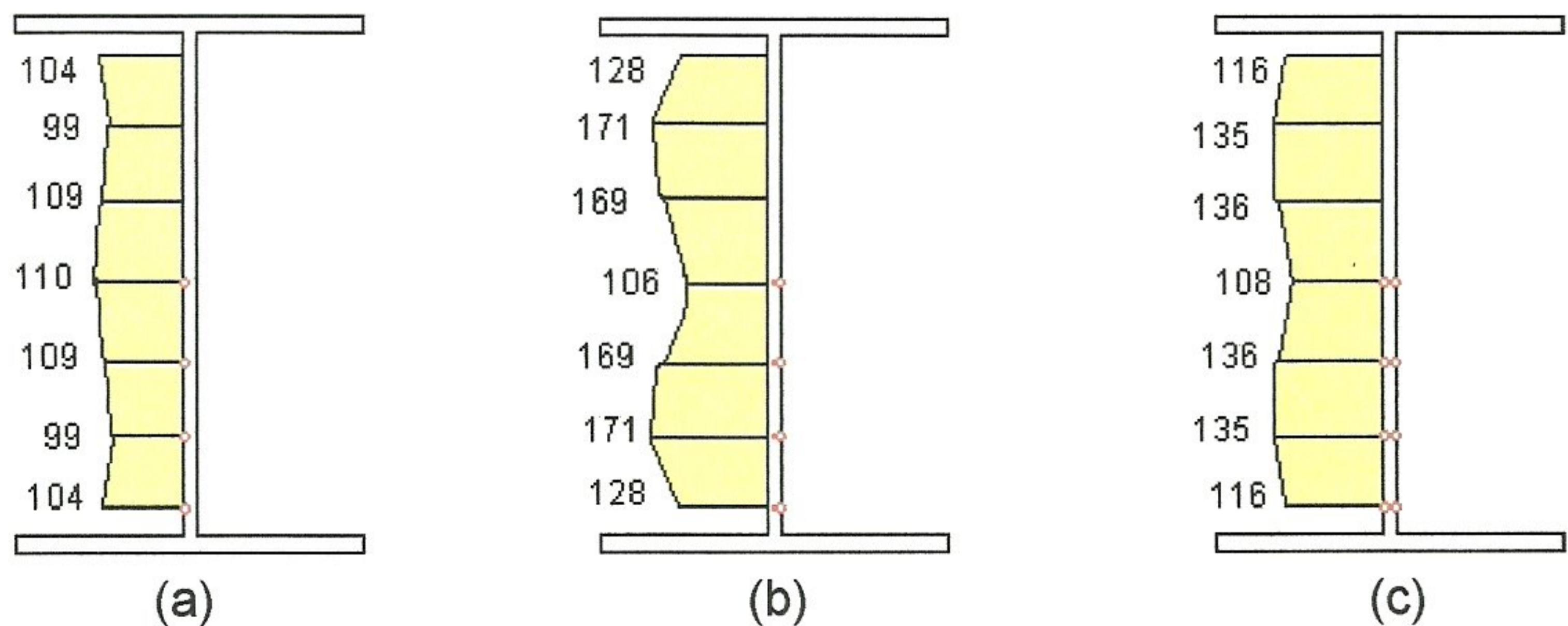


Fig. 6.2 - Diagrama de distribuição de tensões residuais máximas na alma para $\alpha = 0^\circ$ nos pontos 01 a 04 (a), nos pontos 12 a 14 (b) e valores médios (c) obtidos para o perfil 01.

Nas figuras 6.1-a e 6.1-b, os valores indicados com asterisco (*) referem-se a medições de tensões feitas nas faces inferior e superior da mesa, respectivamente. Os diagramas foram traçados considerando a simetria do perfil, indicando-se, em cada um, a localização do ponto ensaiado (ver figuras 4.2 e 4.3).

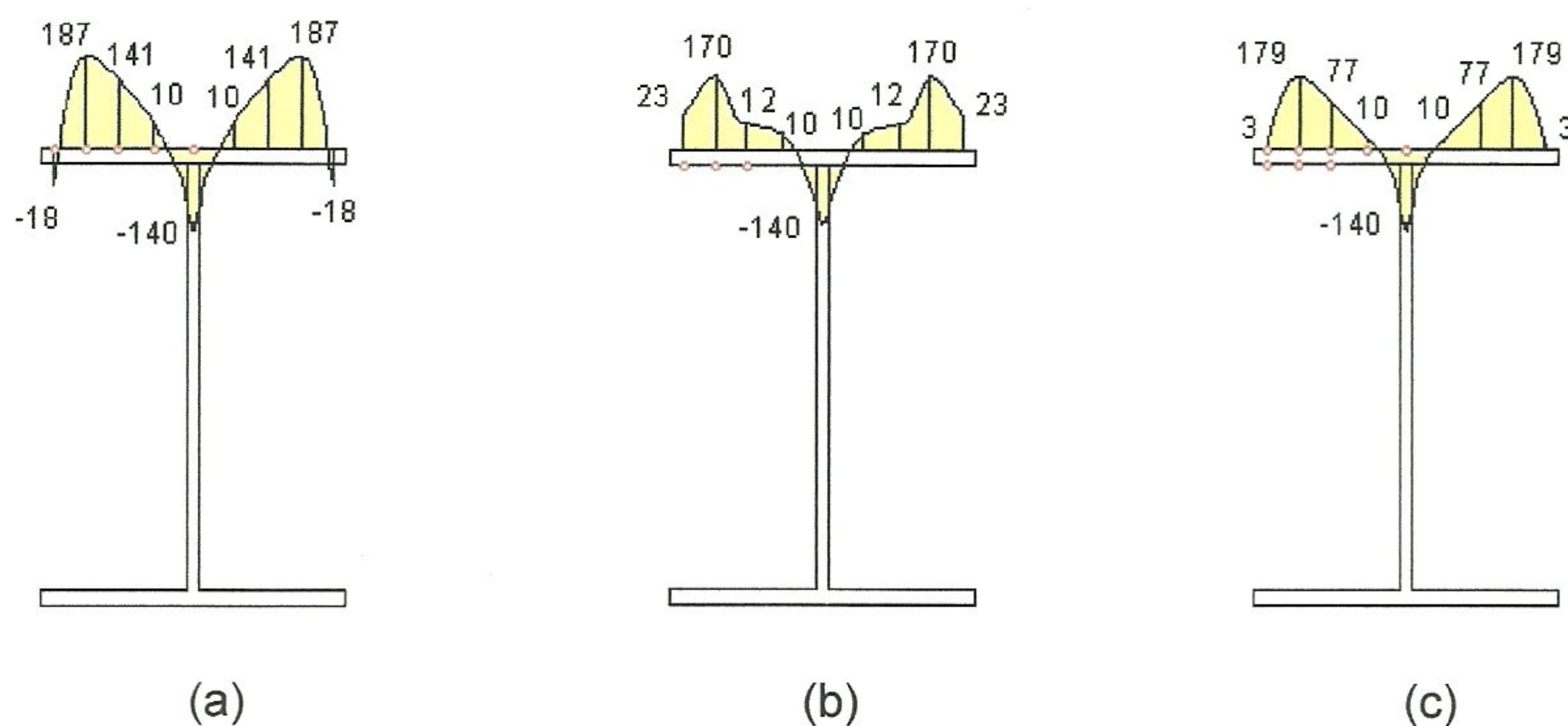


Fig. 6.3 - Diagrama de distribuição de tensões residuais máximas para $\alpha = 0^\circ$ na face superior da mesa (a), na face inferior (b) e valores médios (c) obtidos para o perfil 02.

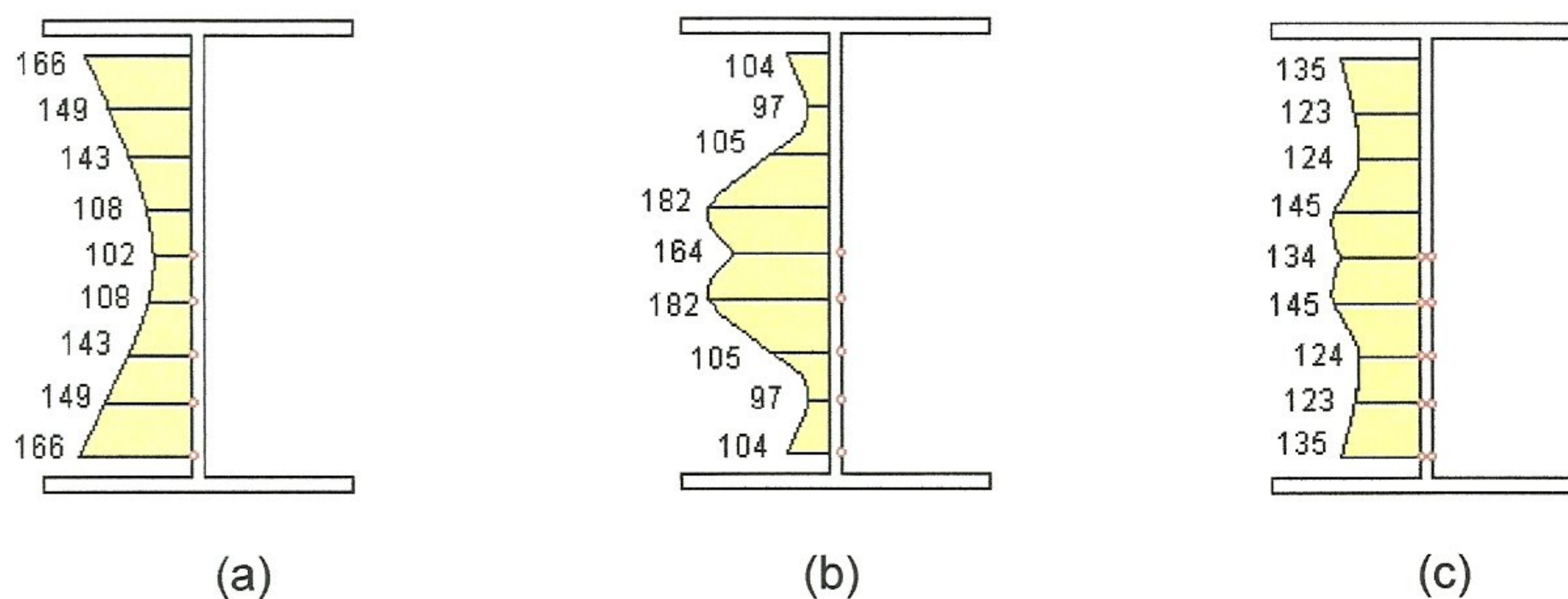


Fig. 6.4 - Diagrama de distribuição de tensões residuais máximas na alma para $\alpha = 0^\circ$ nos pontos 01 a 05 (a), nos pontos 14 a 18 (b) e valores médios (c) obtidos para o perfil 02.

Com relação ao Método do Furo Central, a sua utilização permitiu quantificar valores através de um processo relativamente simples, em ensaio que pode ser considerado não-destrutivo para a maior parte dos casos, mostrando ser viável sua utilização para execução de ensaios adicionais. Deve-se, entretanto, em estudos posteriores, promover ensaios em uma amostra mais representativa das diversas dimensões de perfis utilizados comercialmente para que seja bem caracterizada a distribuição de tensões.

Para os pontos da mesa do perfil 02 observa-se valores médios de tensões elevadas de tração nos pontos 06 e 07 (próximos à borda) e de compressão na ligação mesa-alma. O mesmo fenômeno pode ser observado na mesa do perfil 01 (pontos 06 a 10). Neste caso, entretanto, na ligação mesa-alma ocorre uma redução dos valores de tensão, não ocorrendo inversão de tração para compressão. Para o perfil 02 (que apresenta maiores dimensões da mesa e alma) os valores de tensão de compressão foram significativamente mais elevados.

O ponto 09 do perfil 01 e o ponto 06 do perfil 02, posicionados na borda dos perfis, devido à presença de tensão não-uniforme, não são passíveis de análise quantitativa, bem como os demais indicados nas tabelas 6.1 e 6.2.

As direções de tensões principais definidas pelo ângulo α (medido em relação ao eixo longitudinal da viga – positivo no sentido horário) não apresentaram grandes variações para uma mesma situação, como por exemplo, para a alma do perfil 01 as direções principais variaram entre -7° e 5° . Isto indica a presença de um “fluxo” preferencial de direções principais.

Para a maioria dos pontos, entretanto, através de uma análise visual, pôde-se perceber pelos gráficos traçados para avaliar a uniformidade de distribuição das tensões, que as tensões residuais ao longo da profundidade, na maioria dos pontos, era uniforme permitindo assim uma análise quantitativa utilizando tais resultados experimentais.

Para uma análise qualitativa dos resultados são apresentados os diagramas das figuras 6.1 a 6.4. Os valores de tensões obtidos para ambos os perfis são elevados, como esperado, com base na literatura internacional [08,41, 43]. Isto se deve ao corte e variação de temperatura ocorridos no processo de fabricação. Resultados de medição de tensões residuais em perfis formados por chapas cortadas por maçarico, entretanto, são escassos na literatura, como exposto no item 4.2.3 e não comparáveis aos perfis aqui ensaiados devido a diferentes dimensões e geometrias.

Ainda com relação ao Método, buscou-se apresentá-lo de forma sistematizada de modo a facilitar a análise de resultados que porventura venham a ser executados. Para isto o programa para microcomputadores incorpora os avanços mais recentes do método.

No caso de tensões residuais uniformes com a profundidade os valores obtidos representam o estado de tensão no ponto ensaiado. Entretanto, a utilização do Método do Furo Central em situações de tensão não-uniforme deve ser interpretada com a restrição de que não se obtém a tensão residual no ponto, mas sim uma "tensão residual uniforme equivalente", como definida no Capítulo 5, que será uma informação tanto mais qualitativa quanto menos os pontos marcados no gráfico de avaliação da uniformidade de distribuição de tensões acompanharem as "curvas-padrão", como exemplificado no gráfico 5.3.

Com relação às considerações da NBR 8800/86 da ABNT [13], no que se refere à classificação dos perfis soldados tipo I ou H nas diversas curvas de resistência à flambagem (para definição do fator de resistência ϕ), não se poderá, sem a elaboração de estudos adicionais, propor uma nova classificação para este tipo de perfis, embora os resultados ora relatados sinalizem para uma provável magnitude e distribuição de tensões mais favorável que a de perfis laminados e soldados formados por borda laminada, como exposto anteriormente.

6.2 - Conclusão Final

Embora o custo da realização de ensaios seja bastante elevado, requerendo equipamentos muito sofisticados e muitas vezes sucateados pelo rápido avanço de tecnologias, a pesquisa experimental será sempre necessária, seja para confirmação de simulações numéricas, comprovação de hipóteses, etc., ou mesmo pela impossibilidade de formulação de teorias quando se tem grande quantidade de variáveis a serem controladas.

Desta forma o trabalho experimental dá sua contribuição, não apenas por seu aspecto conclusivo, mas também fornecendo subsídios para estudos teóricos posteriores.

6.3 - Sugestões para trabalhos futuros

As tensões residuais são de grande importância no projeto de estruturas em aço na previsão de falhas por fadiga, ruptura frágil, etc.

Além da continuidade de um estudo experimental para determinação da distribuição e magnitude de uma maior variedade de perfis soldados, poderia ser sugerido:

- a) Estudo da alteração de distribuição de tensões residuais utilizando "pontos de solda" na mesa e/ou alma de perfis visando reforço de estruturas em funcionamento.
- b) Avaliação da integridade de estruturas e equipamentos em processos de manutenção preditiva, utilizando o Método do Furo Central.
- c) Simulação numérica de corte e soldagem de perfis para avaliação teórica de tensões residuais em perfis soldados, comparando com resultados experimentais, e buscando um modelo teórico que incorpore as várias variáveis do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] GALAMBOS, T. V. . **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures (SSRC)**. ed. John Wiley & Sons, .1988.
- [02] Canadian Standards Association. CAN 3-516. 1-M89 : **Steel Structures for Buildings (Limits States Design)**. Ontario, 1989, 148 p.
- [03] YANG, H. C. ; BEEDLE, S. & JONHSTON, B. G. . **Residual Stress and the Yield Strength of Steel Beams**, Progress Report nº. 4, April, 1952.
- [04] Canadian Standards Association. CAN 3-516. 1-M89 : **Steel Structures for Buildings (Limits States Design)**. Ontario, 1989, 148 p.
- [05] GALAMBOS, T. V. . **Inelastic Buckling of Beams**. Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, October, 1963, p. 217-238.
- [06] DELAMETER, W. R. & MAMAROS, T.C. . **Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method**. Sandia National Laboratories Report SAND-77-8006, 1977, 27 pp. (NTIS).
- [07] BIRLEY, S. S. & OWENS, A. . **Blind Hole-Drilling Technique for Residual Stress Measurement: Application in ndt**. NDT International, Vol. 13, No. 2, February, 1980.
- [08] NIKU-LARI, A. J. Lu & MAMAROS, T.C., . **Measurement of Residual Stress Distribution by the Incremental Hole-Drilling Method**. Experimental Mechanics 25, 1985, p.175-185.
- [09] TALL, L. & ESTUAR, F. R. . **Experimental Investigation of Welded Built-up Columns**. Welding Journal, April 1965, p. 164-176.

- [10] KENNEDY, D.J.L., Qureshi, S. . **Design Strengths Beam-Columns: Discussion.** Canadian Journal of Civil Engineering, V. 15, 1988, p. 136-140.
- [11] HERZOG, M. . **Die Größe der Eigenspannungen in walz- und Schweißprofilen nach Messungen.** Der Stahlbau, 46(9): september, 1977, p.283-87.
- [12] Canadian Standards Association. CAN 3-516. 1-M89 : **Steel Structures for Buildings (Limits States Design).** Ontario, 1989, 148 p.
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios (Método dos Estados Limites).** Rio de Janeiro; ABNT, 1986.
- [14] VLASOV, B. Z. . **Pieces Longues en Voiles Minces.** Paris: Editions Eyrolles, 1962, 655 p.
- [15] LAVALL, A. C. . **Análise Estática em 2ª Ordem de Pórticos Plano Metálicos.** Dissertação de Mestrado, E.E.S.C. USP, 1988.
- [16] GALAMBOS, T. V. . **Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures (SSRC).** ed. John Wiley & Sons, (1988).
- [17] BRESLER, B. ; LIN, T. Y. ; SCALZI, J. B. . **Diseño de Estructuras de Acero.** México, Editorial Limusa, 1988, 926 p.
- [18] GALAMBOS, T. V. . **Inelastic Buckling of Beams.** Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, October, 1963, p. 217-238.

- [19] SALMON, C. G. ; JOHNSON, J. E. . **Steel Structures: Design and Behaviour**. New York, Harper & Ron, 1990, 1086 p.
- [20] GOLDBERG, F. . **The Effect of Residual Stress and Quality of the Thermal Cutting Edges and Static Strength of Steel**. Australian Welding Journal: September-October, 1974, p.127-134.
- [21] MACHERAUCH, E. & WOHLFAHRT, H. . **Different Sources of Residual Stress as a Result of Welding**. IN: Conference: Residual Stresses in Welded Construction and Their Effects, London, 1977, p. 267-282.
- [22] LINNERT, G. E. . **Shrinkage and Distortion in Weldments. Application**. Report nº1, Welding Metallurgy, 3rd. Ed., New York, American Welding Society , 1967, Capítulo 11, p.108-140.
- [23] SALMON, C. G. & JOHNSON, J. E. . **Steel Structures: Design and Behaviour**. New York, Harper & Ron, 1990, 1086p.
- [24] YANG, H. C. ; BEEDLE, S. & JOHNSTON, B. G. . **Residual Stress and the Yield Strength of Steel Beams**, Progress Report nº. 4, April, 1952.
- [25] ASM Committee on Residual Stress. **Residual Stresses**. Metal Handbook, August, 1955, p. 89-96.
- [26] Canadian Standards Association. CAN 3-516. 1-M89 : **Steel Structures for Buildings (Limit States Design)**. Ontario, 1989, 148 p.
- [27] GAYLORD, E. H. & GAYLORD, C. N. . **Compression Members - Design of Steel Structures**. 2nd. Ed., Tokyo, McGraw-Hill, Kogkusha, Ltd, 1972. p. 144-250.

- [28] GALAMBOS, T. V. . **Inelastic Buckling of Beams**. Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, October, 1963, p. 217-238.
- [29] TIMOSHENKO, S. P. & GOODIER, J. N. . **Theory of Elasticity**. 2nd. Ed., McGraw-Hill, New York, 1951, 80 p.
- [30] MATHAR, J. . **Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes**. ASME 56, No. 1, 1990.
- [31] **Measurement of Residual Stresses by the Blind Hole Drilling Method**. Technical Data Bulletin, T-403, Measurement Group, Photoelastic Division.
- [32] NAGARAJA R. et alii. **Residual Stresses in Welded Shapes**. Welding Research Supplement, No. 43, 1964, 295-306 p.
- [33] RAO, J. G.; SUNKAR, R. K. & NARAYANAN, R. . **Determination of Calibration Constants for Hole Drilling Technique Using Special Strain Gage Rosete**, .Welding Research Supplement, 1992, p32-37.
- [34] RENDLER, N. J. & I. VIGNESS. **Hole Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses**. Proc. SESA XXIII, No. 2, 1966, p.577-586.
- [35] SCHAFER, G. S. . **Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements**. Journal of Engineering Materials and Technology 103, 1981, p.157-163.
- [36] RAO, J. G.; SANKAR, R. K. & NARAYANAN, R. . **Aplication of Hole Drilling Method for the Meassurement of Residual Stress in Steel I-Beams**, Report ESA-2/84,

Structural Engineering Research Centre, Madras, India, March, 1984.

- [37] ALMEIDA, J. P. . **Aplicação do Método do Furo Central na Análise das Tensões Residuais em Componente do Elemento Combustível (Dissertação de Mestrado)**, Belo Horizonte, Outubro, 1990, 140 p.
- [38] DALLY, J. W. & RILLEY, W. F. . **Experimental Stress Analysis**. McGraw-Hill, 3rd. Ed., 1991.
- [39] **Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method**. ASTM E837-89, 1989, 713-717 p.
- [40] RENDLER, N. J. & I. VIGNESS. **Hole Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses**. Proc. SESA XXIII, No. 2, 1966. p.577-586.
- [41] HERZOG, M. . **Die Größe der Eigenspannungen in walz- und Schweißprofilen nach Messungen**.Der Stahlbow, 46(9): 283-87, Sep. 1977.
- [42] SCHAFER, G. S. . **Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements**. Journal of Engineering Materials and Technology 103:, 1981, p.157-163.
- [43] SCHAFER, G. S., **Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole Drilling Method**. Journal of Engineering Materials and Technology, 110, No. 4: Part I, 338- 343; Part II,1988, p.344-349.
- [44] **Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method**. TN-503-3, Measurements Group, North Carolina, USA, 1990.

BIBLIOGRAFIA

- 01 American Institute for Steel Construction: Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, AISC, 1990.
- 02 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios (Método dos Estados Limites), Rio de Janeiro, 1986.
- 03 BATISTA, E. M. & RODRIGUES F. C. . Tensões Residuais em Perfis de Chapa Dobrada. Revista Brasileira de Engenharia, No. 1, 1990
- 04 BEANEY, E. M. & PROCTER, E. . A Critical Evaluation of the Centre-Hole Technique for the Measurement of Residual Stresses. Strain, Journal of BSSM 10, No. 1, 1974, p.7-14.
- 05 BYNUM, J. E. . Modifications to the Hole-Drilling Technique of Measuring Residual Stresses for Improved Accuracy and Reproducibility. Experimental Mechanics, January, 1981, p.21-23.
- 06 CHEN, W. F. & LUI, E. M. . Stability Design Criteria for Steel Member and Frames in the United States. Journal of Constructional Steel Research, v. 5, 1985, p.31-74.
- 07 DALLY, J. W. & RILLEY, W. F. . Experimental Stress Analysis. McGraw-Hill, 3rd. Ed., 1991.
- 08 European Convention for Construction of Steelwork (ECCS). European Recommendations for Steel Construction. London, 1978, 355p.

- 09 FLAMAN, M.T. . Investigation of Ultra-High Speed Drilling for Residual Stress Measurements by the Center Hole Method. Paper presented at SESA Meeting, Boston, Massachusetts, May, 1960.
- 10 KABIRI, M. . Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Method: Influences of Transverse Sensitivity of the Gages and Relieved Strain Coefficients. *Experimental Mechanics*, 25, September, 1984, p.252-256.
- 11 KENNEDY, D. J.L., PICARD, A. & Beaulieu, D. New Canadian Provision for the Design of Steel Beam-Columns. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 17, 1990, p.873-893.
- 12 LEMOS, F.L. . Análise de Tensões Residuais em Juntas Soldadas. (Dissertação de Mestrado), EE-UFMG, Belo Horizonte, 1984, 68p.
- 13 MARQUES, C.M.C.F.S. & RONDAL, J. . Effet des Imperfections sur les Phénomènes d'Instabilité des Structures en Acier. *Annales de Institut Technique du Batment et des Travau Publics*, n. 451, 1987, p.78-99.
- 14 MAZZOLANI, F.M. . Influenza delle Imperfezioni Strutturali sulla Instabilità delle Colonne in Acciaio. *Costruzioni Metalliche*, n. 6, 1973, p.380-390.
- 15 POPOV, E. P. . Resistência dos Materiais. Rio de Janeiro, Prentice-Hall do Brasil, 1984, 507p.

APÊNDICE I

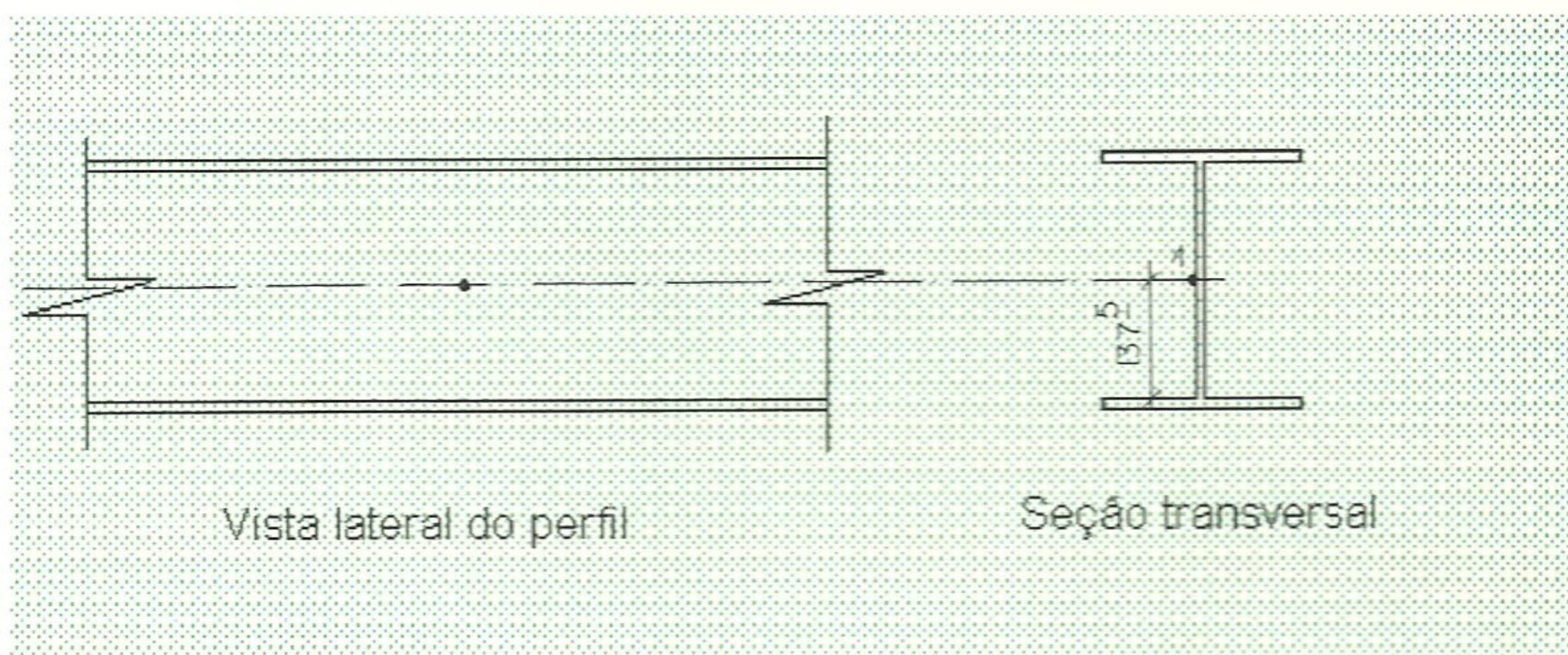
Resultados Experimentais Obtidos

Tabela 01 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 01

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	1506	2342	2346	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	1482	2321	2355	
20	0,508	1432	2286	2366	Tensão de alimentação da roseta: 3,000 V
30	0,762	1389	2256	2380	
40	1,016	1358	2235	2389	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	1342	2227	2396	
60	1,524	1334	2222	2401	Diâmetro do furo (D_o): 41 divisões
70	1,778	1326	2220	2404	
80	2,032	1326	2221	2408	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	1323	2224	2411	
100	2,540	1325	2225	2412	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 02 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	-16	-14	6	-10	22	18	0,029	0,057	9,02098E-08	1,37449E-07	20	-79	24
0,508	0,099	-33	-23	7	-26	40	20	0,063	0,122	1,95973E-07	2,94189E-07	13	-71	6
0,762	0,148	-28	-20	9	-19	38	20	0,094	0,195	2,92404E-07	4,70219E-07	14	-39	6
1,016	0,198	-20	-14	6	-15	26	13	0,112	0,241	3,48396E-07	5,81143E-07	13	-23	2
1,270	0,247	-11	-5	5	-6	15	5	0,12	0,28	3,73282E-07	6,75187E-07	9	-10	2
1,524	0,296	-5	-3	3	-2	9	5	0,125	0,31	3,88835E-07	7,47528E-07	15	-5	2
1,778	0,346	-5	-1	2	-3	7	-1	0,13	0,322	4,04389E-07	7,76465E-07	-4	-4	0
2,032	0,395	0	1	3	3	3	1	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	9	1	3
2,286	0,445	-2	2	2	0	4	-4	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	-23	-2	2
2,540	0,494	1	1	1	2	-1	1	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	-23	1	1

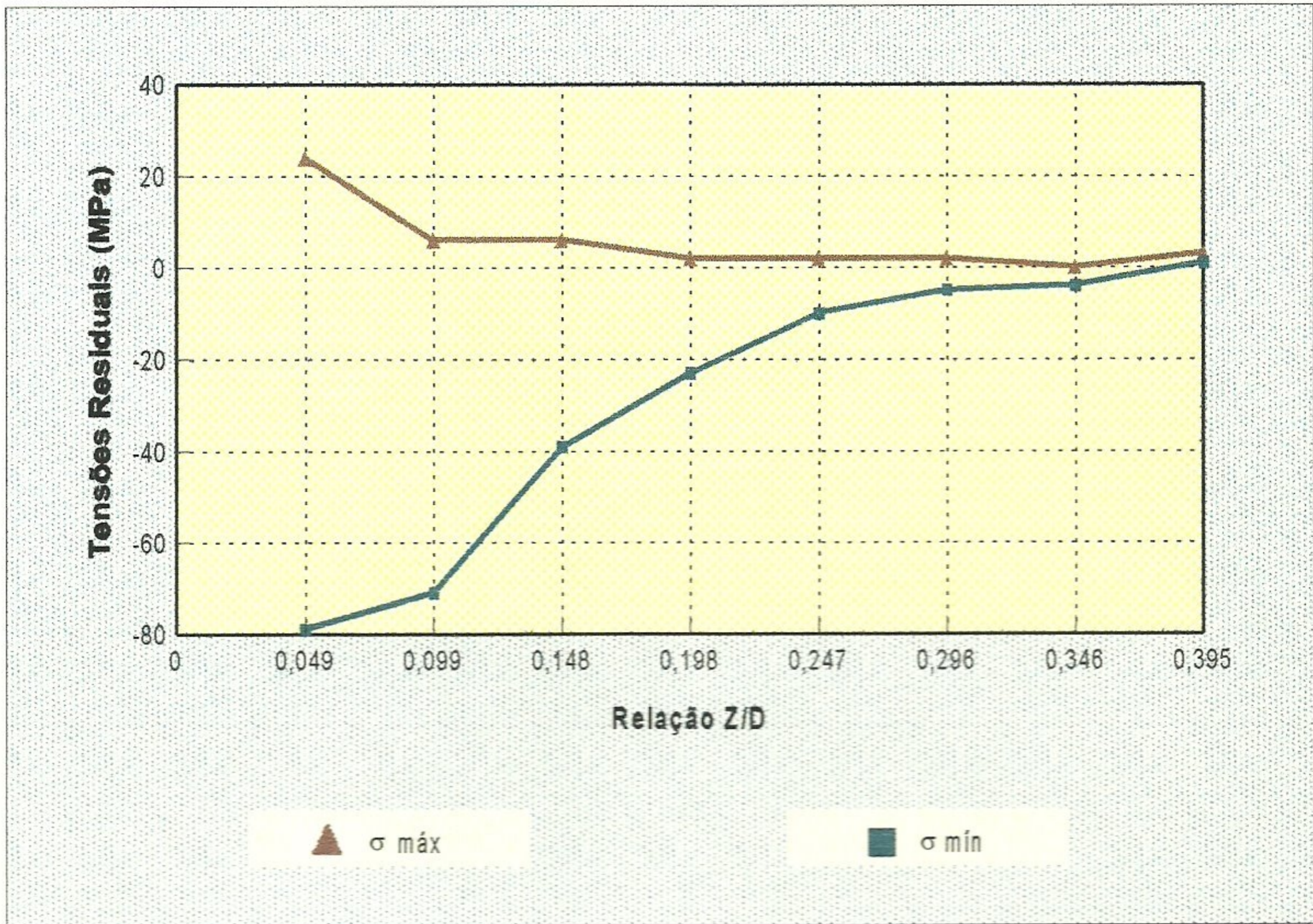


Gráfico 01 - Valores de tensões residuais para o ponto 01 do perfil 01.

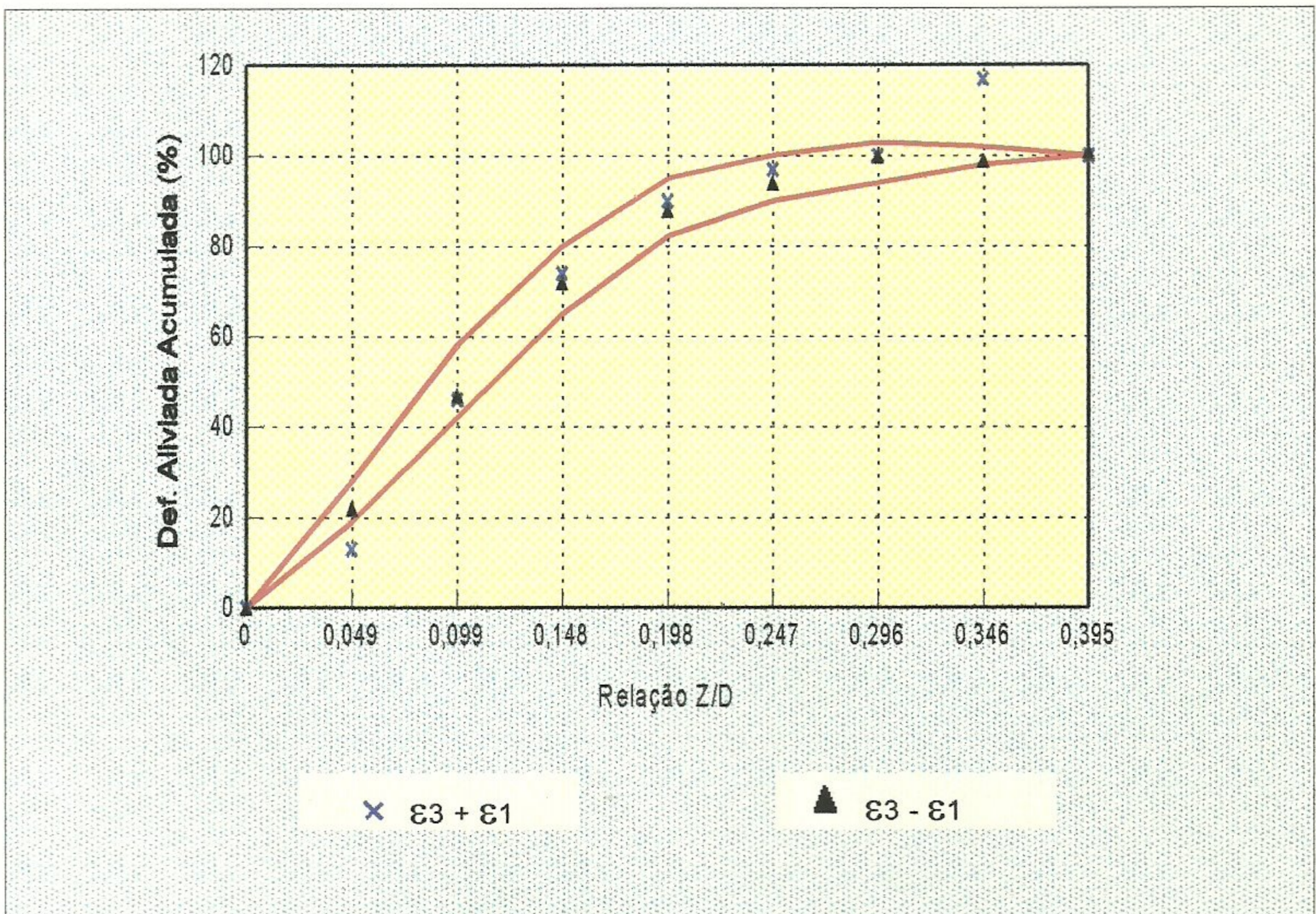


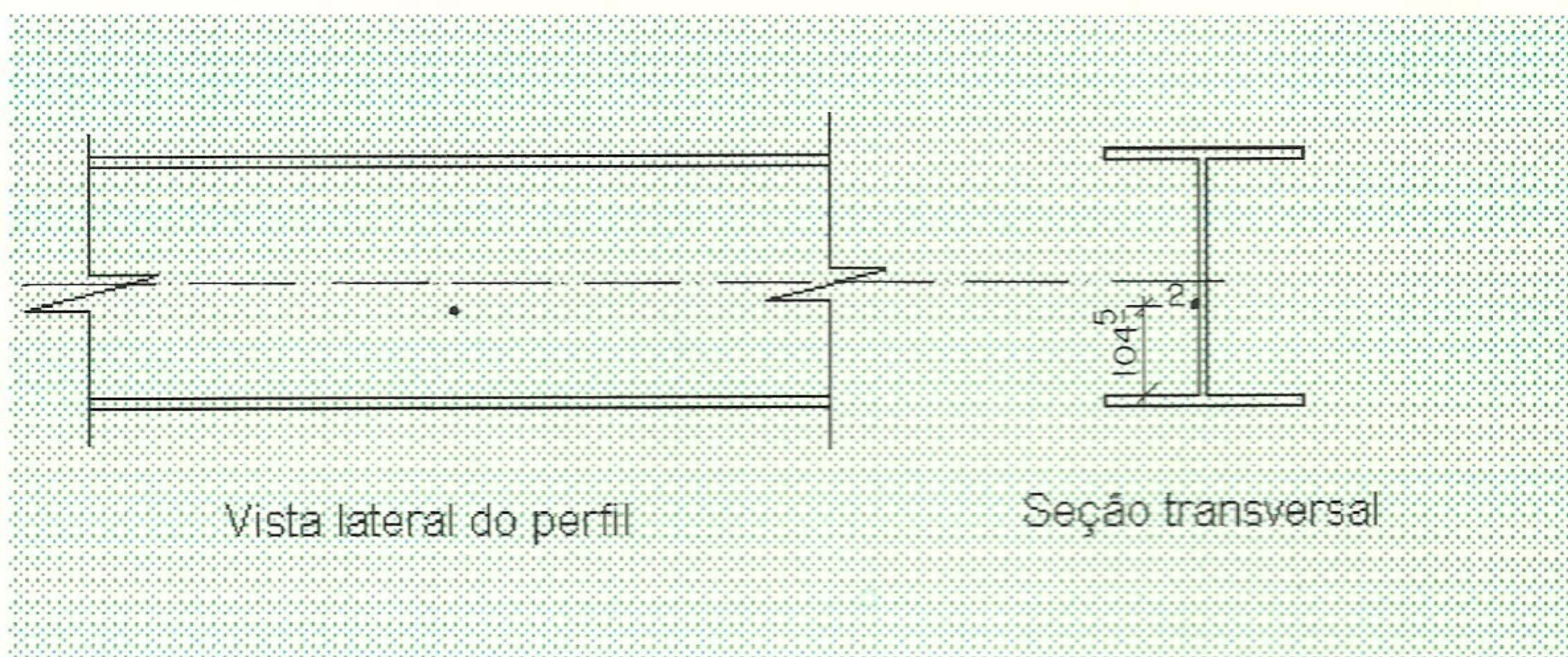
Gráfico 02 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 01 do perfil 01.

Tabela 03 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 02

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	398	104	747	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	429	119	746	
20	0,508	462	133	740	Tensão de alimentação da roseta: 2,0030 V
30	0,762	485	142	732	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	502	145	727	
50	1,270	510	147	721	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
60	1,524	518	148	717	
70	1,778	519	148	714	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	518	146	711	
90	2,286	518	143	709	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	517	141	708	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 04 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente				Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	31	15	-1	30	-32	0	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	39	152
0,508	0,099	33	14	-6	27	-39	-1	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	1	73
0,762	0,148	23	9	-8	15	-31	-3	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	-4	33
1,016	0,198	17	3	-5	12	-22	6	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	-1	20
1,270	0,247	8	2	-6	2	-14	-2	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	-4	7
1,524	0,296	8	1	-4	4	-12	2	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	-2	8
1,778	0,346	1	0	-3	-2	-4	-2	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	-3	0
2,032	0,395	-1	-2	-3	-4	-2	0	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	-4	-2
2,286	0,445	0	-3	-2	-2	-2	4	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-3	0
2,540	0,494	-1	-2	-1	-2	0	2	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-2	-1

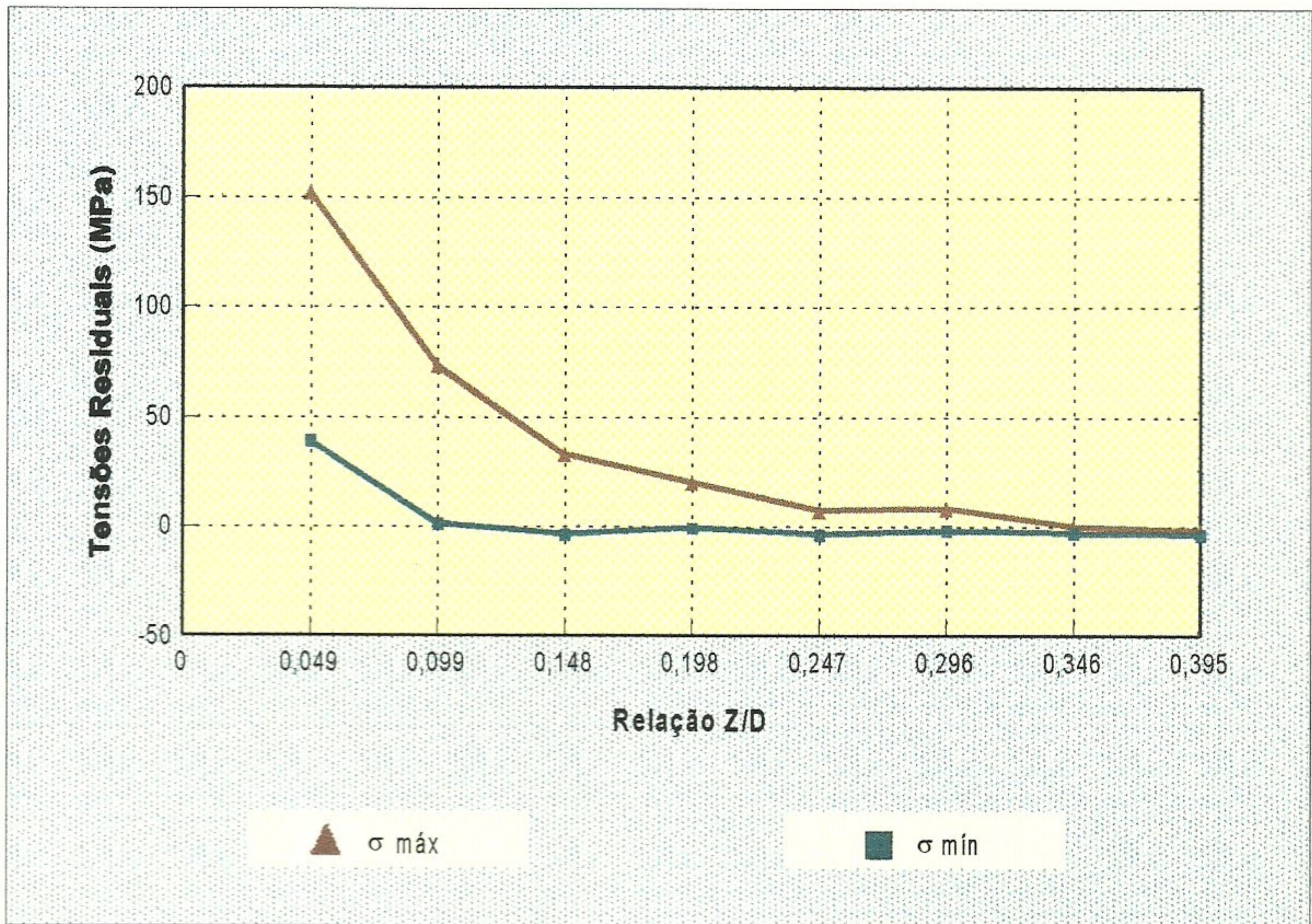


Gráfico 03 - Valores de tensões residuais para o ponto 02 do perfil 01.

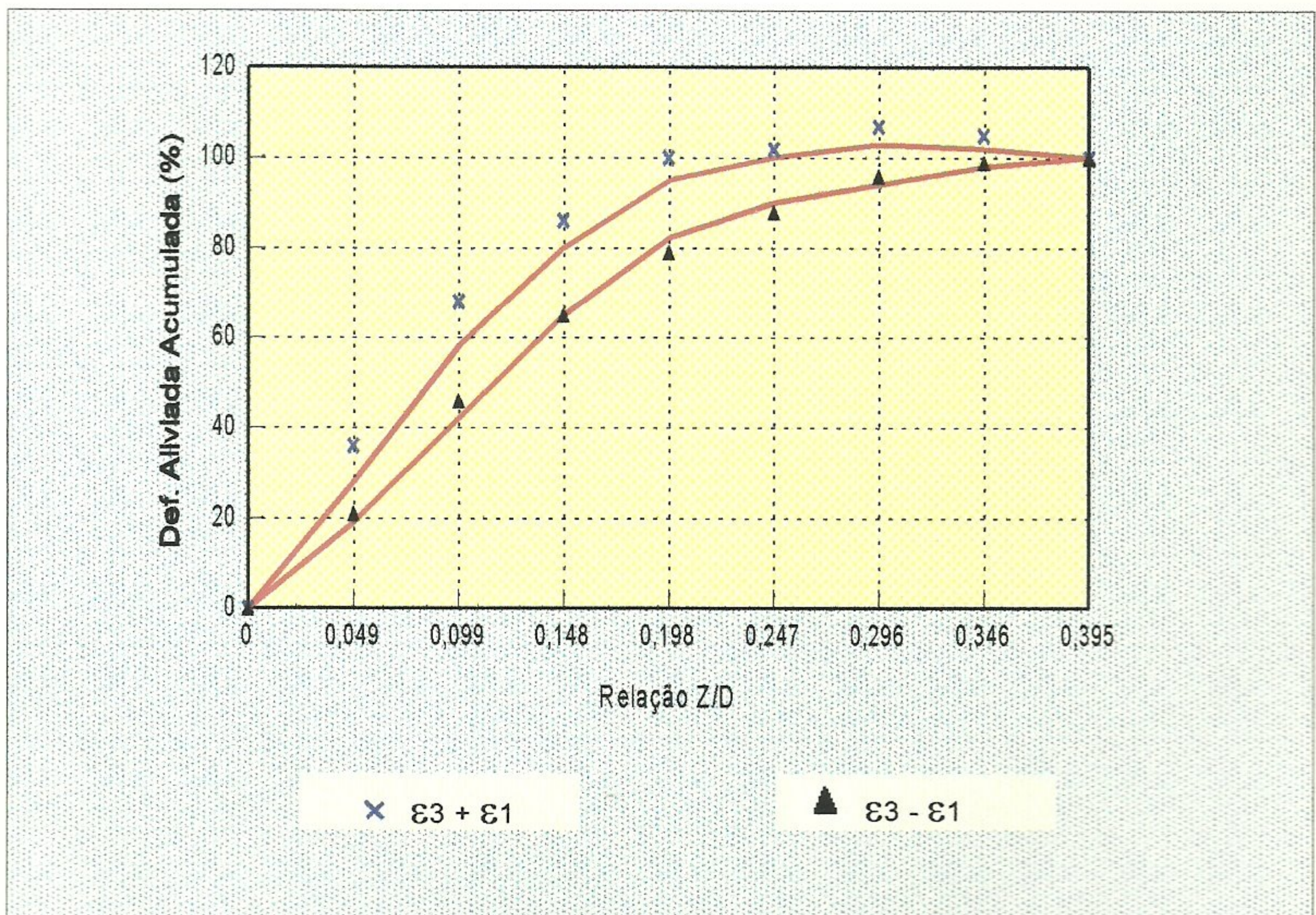


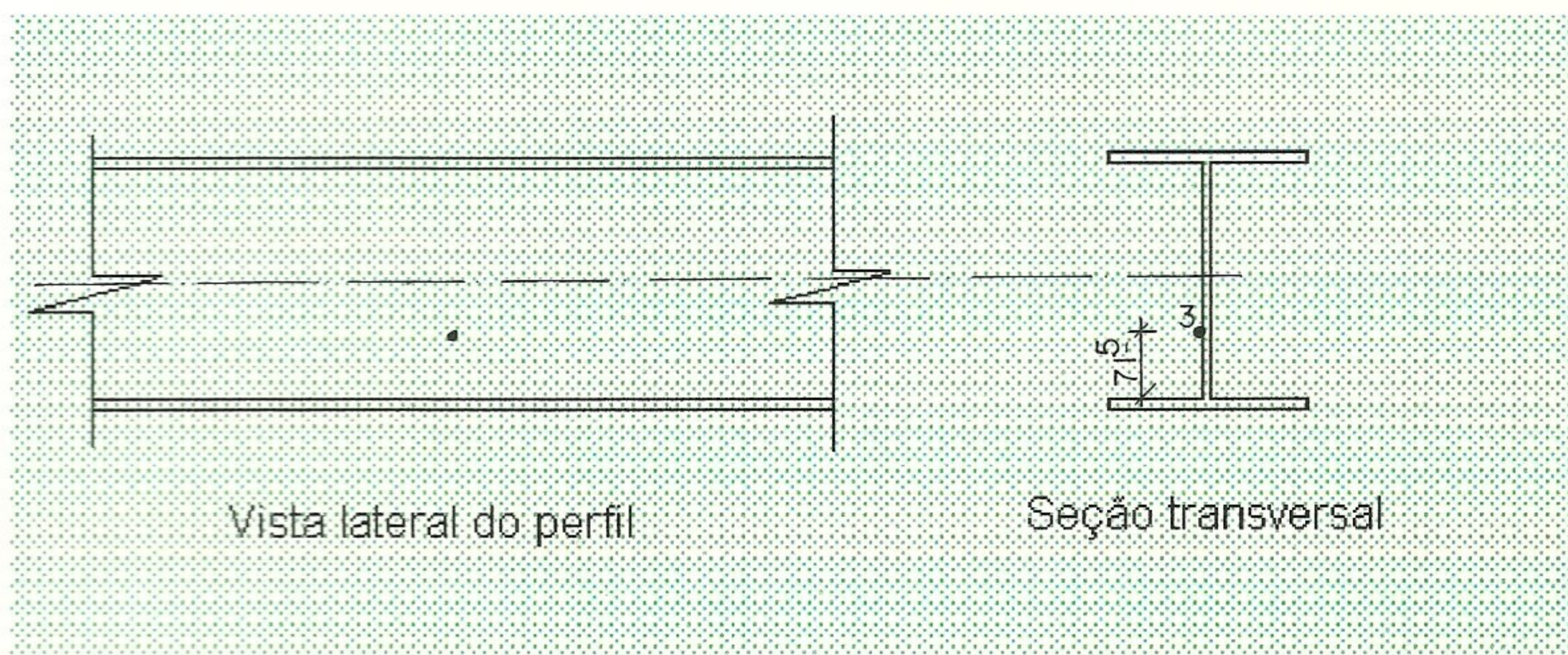
Gráfico 04 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 02 do perfil 01.

Tabela 05 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 03

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	450	232	533	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	470	246	533	
20	0,508	499	259	525	Tensão de alimentação da roseta: 2,0020 V
30	0,762	520	266	520	
40	1,016	539	273	514	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	548	275	508	
60	1,524	556	274	503	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
70	1,778	560	280	501	
80	2,032	561	275	496	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	562	274	494	
100	2,540	562	272	493	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 06 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente				Tensão (MPa)		
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	20	14	0	20	-20	-8	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	11	25	102
0,508	0,099	29	13	-8	21	-37	-5	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	4	-6	63
0,762	0,148	27	9	-5	22	-32	4	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	-4	1	40
1,016	0,198	13	5	-6	7	-19	-3	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	5	-3	15
1,270	0,247	9	2	-6	3	-15	-1	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	2	-4	8
1,524	0,296	8	-1	-5	3	-13	5	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	-11	-3	7
1,778	0,346	4	6	-2	2	-6	-10	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	30	-3	6
2,032	0,395	1	-5	-5	-4	-6	6	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	-23	-6	0
2,286	0,445	1	-1	-2	-1	-3	1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-9	-2	0
2,540	0,494	0	-2	-1	-1	-1	3	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-36	-2	0



Gráfico 05 - Valores de tensões residuais para o ponto 03 do perfil 01.

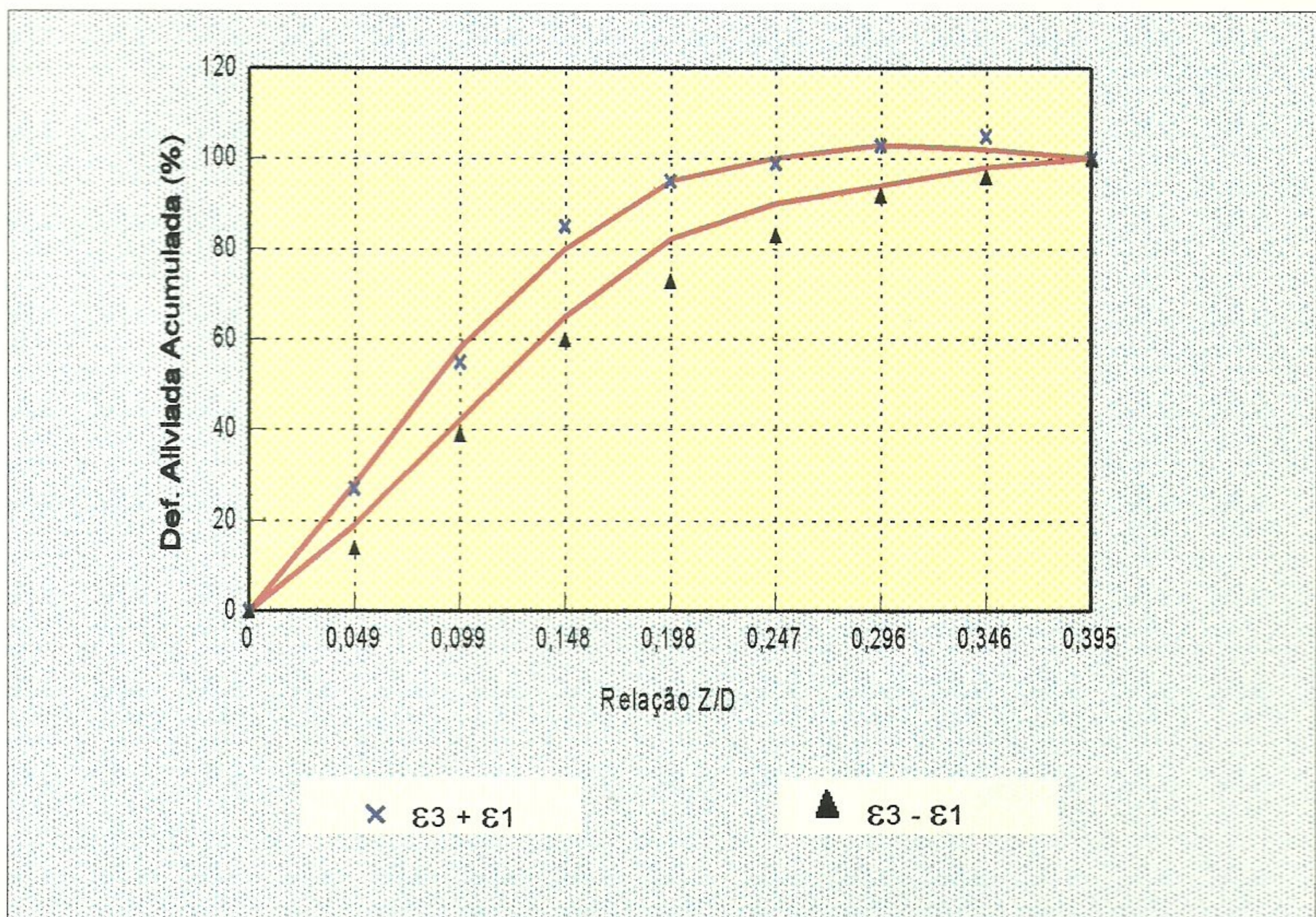


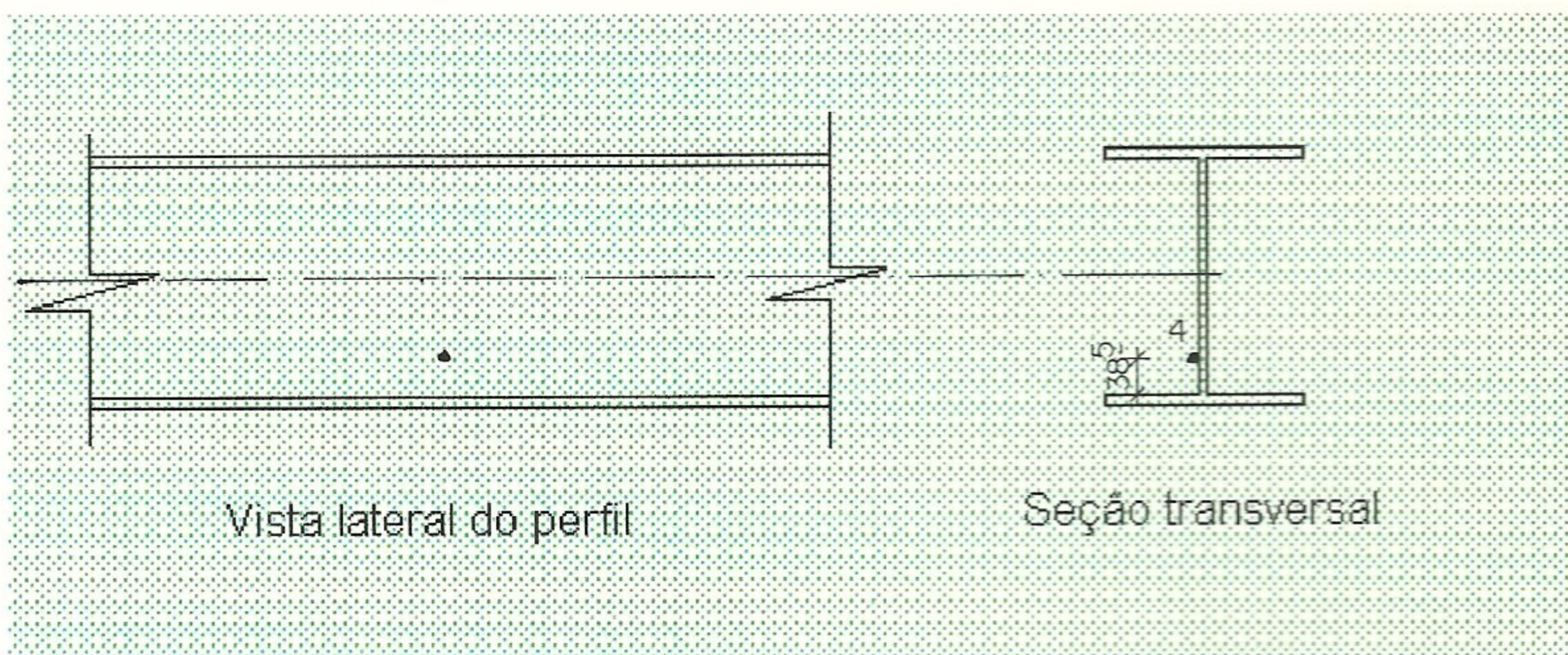
Gráfico 06 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 03 do perfil 01.

Tabela 07 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 04

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	309	-253	156	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	337	-234	157	
20	0,508	369	-219	154	Tensão de alimentação da roseta: 2,0027 V
30	0,762	397	-207	150	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	416	-201	143	
50	1,270	428	-199	140	Diâmetro do furo (D_0): 38 divisões
60	1,524	436	-196	136	
70	1,778	437	-198	131	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	438	-198	128	
90	2,286	437	-199	126	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	436	-202	125	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 08 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade Z(mm)	Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0	19	1	1	1	-37	0,031	0,06	9,64312E-08	1,44683E-07	-44	-61	66
0,508	32	15	-3	29	-35	-1	0,073	0,14	2,2708E-07	3,37593E-07	1	6	57
0,762	28	12	-4	24	-32	0	0,106	0,219	3,29732E-07	5,28093E-07	0	3	33
1,016	19	6	-7	12	-26	0	0,128	0,27	3,98167E-07	6,51073E-07	0	-2	17
1,270	12	2	-3	9	-15	5	0,138	0,313	4,29274E-07	7,54762E-07	-9	0	10
1,524	8	3	-4	4	-12	-2	0,14	0,32	4,35496E-07	7,71642E-07	5	-2	6
1,778	1	-2	-5	-4	-6	0	0,143	0,326	4,44828E-07	7,8611E-07	0	-4	0
2,032	1	0	-3	-2	-4	-2	0,145	0,33	4,51049E-07	7,95756E-07	13	-2	0
2,286	-1	-1	-2	-3	-1	-1	0,145	0,33	4,51049E-07	7,95756E-07	23	-2	-1
2,540	-1	-3	-1	-2	0	4	0,145	0,33	4,51049E-07	7,95756E-07	32	-2	0



Gráfico 07 - Valores de tensões residuais para o ponto 04 do perfil 01.

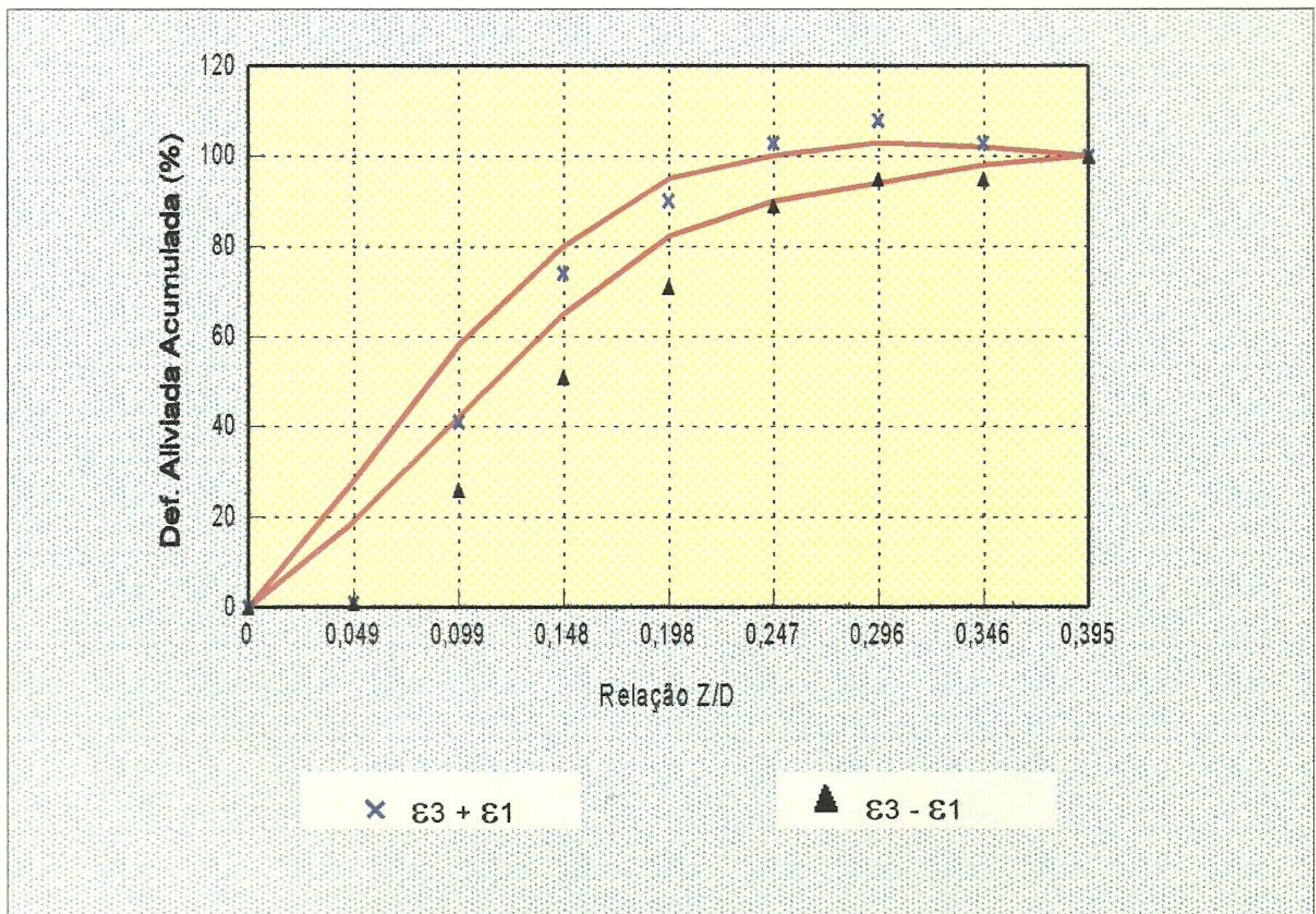


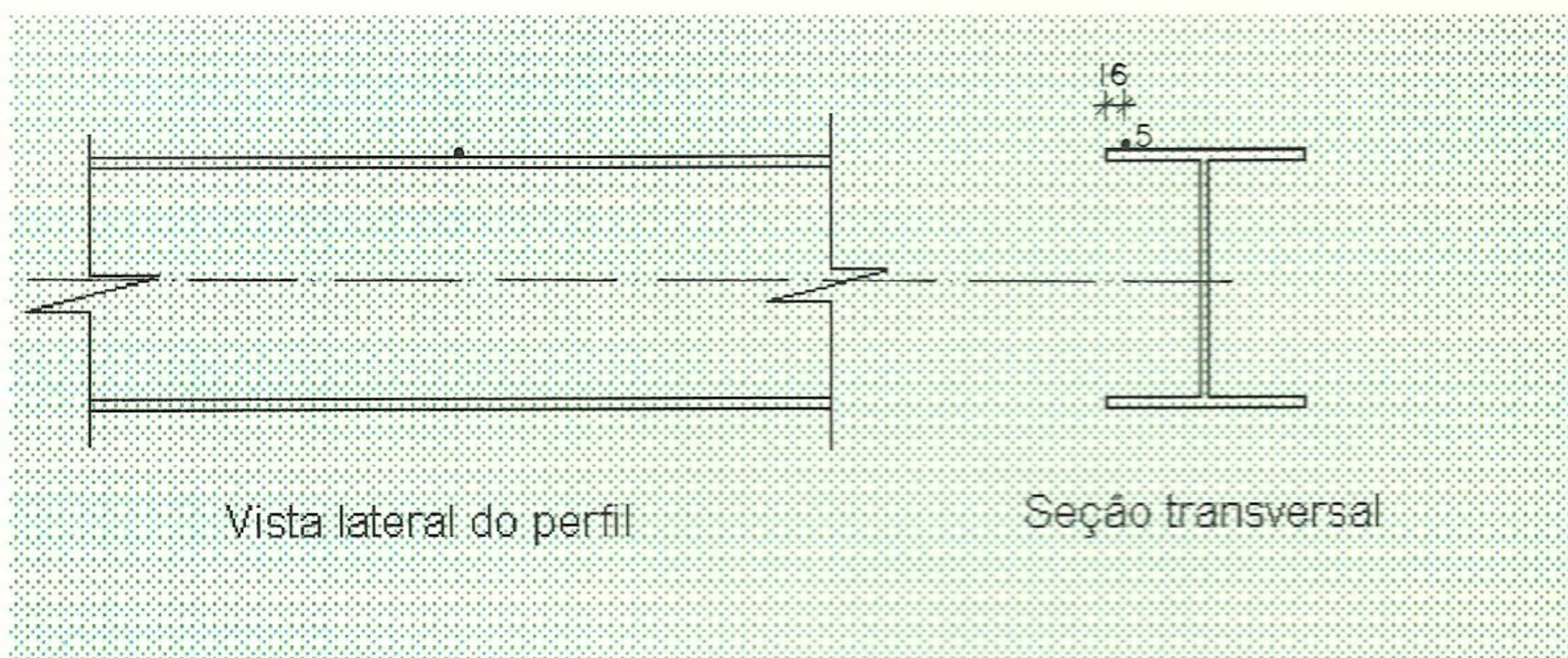
Gráfico 08 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 04 do perfil 01.

Tabela 09 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 05

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	2801	3058	2069	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	2794	3068	2064	
20	0,508	2798	3069	2052	Tensão de alimentação da roseta: 3,000 V
30	0,762	2801	3074	2040	
40	1,016	2811	3083	2026	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	2818	3090	2016	
60	1,524	2824	3095	2008	Diâmetro do furo (D_0): 39 divisões
70	1,778	2827	3096	2004	
80	2,032	2832	3097	2003	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	2833	3098	2000	
100	2,540	2835	3098	2002	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 10 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente				Tensão (MPa)		
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	-5	7	-3	-8	1	-21	0,027	0,059	8,39884E-08	1,42272E-07	-44	-61	14
0,508	0,099	3	1	-8	-5	-11	-7	0,06	0,12	1,86641E-07	2,89366E-07	16	-18	4
0,762	0,148	2	3	-8	-6	-10	-13	0,089	0,181	2,76851E-07	4,3646E-07	26	-15	4
1,016	0,198	7	6	-9	-3	-16	-15	0,105	0,231	3,26622E-07	5,57029E-07	22	-12	8
1,270	0,247	5	5	-7	-2	-11	-11	0,113	0,262	3,51507E-07	6,31782E-07	23	-8	5
1,524	0,296	4	3	-5	-1	-9	-8	0,115	0,295	3,57728E-07	7,11358E-07	21	-5	3
1,778	0,346	2	1	-3	-1	-5	-2	0,118	0,3	3,67061E-07	7,23415E-07	11	-2	1
2,032	0,395	3	1	-1	3	-4	1	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	-7	0	3
2,286	0,445	1	1	-2	-1	-3	-3	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	23	-2	0
2,540	0,494	1	0	1	3	0	3	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	23	1	3

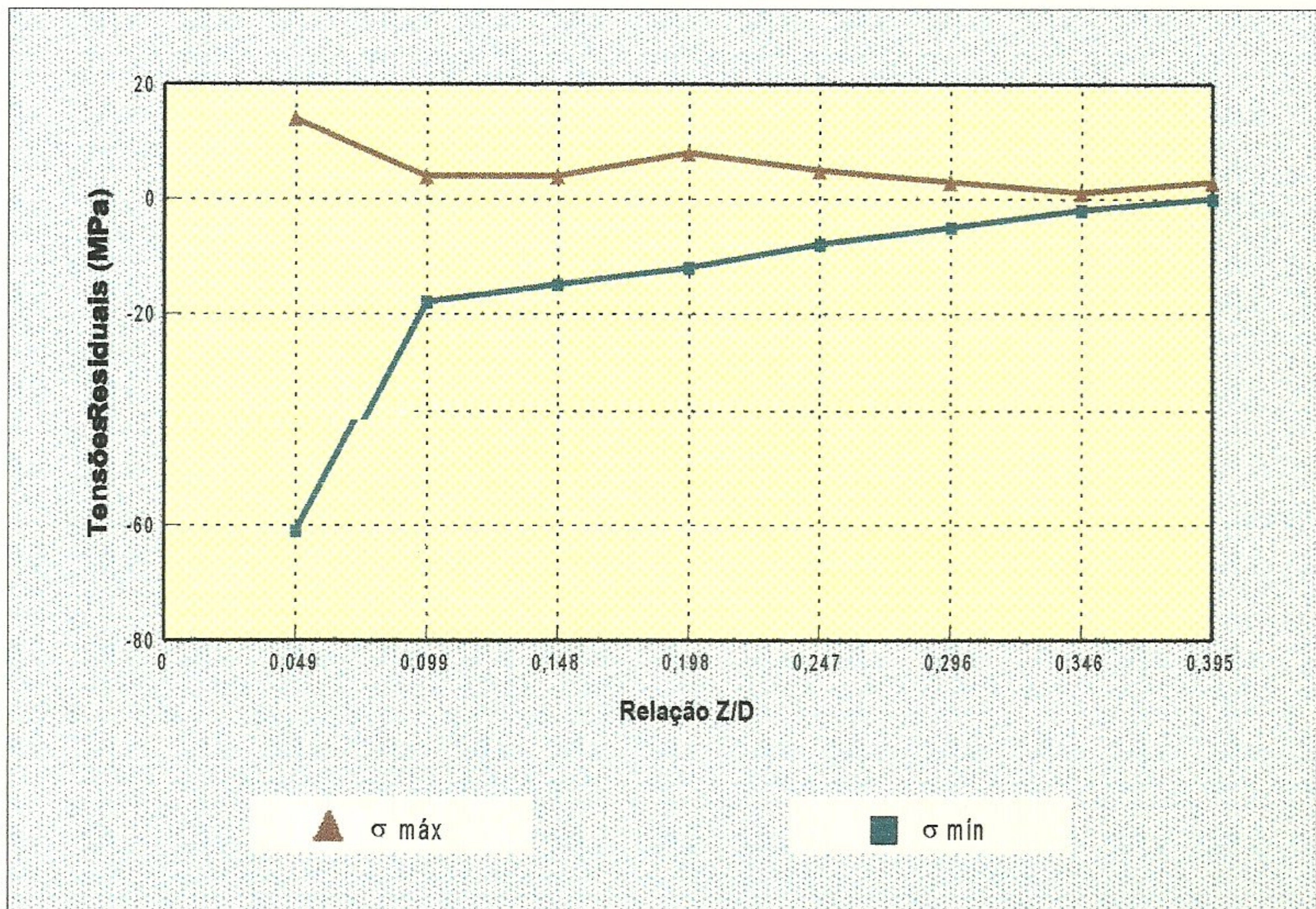


Gráfico 09 - Valores de tensões residuais para o ponto 05 do perfil 01.

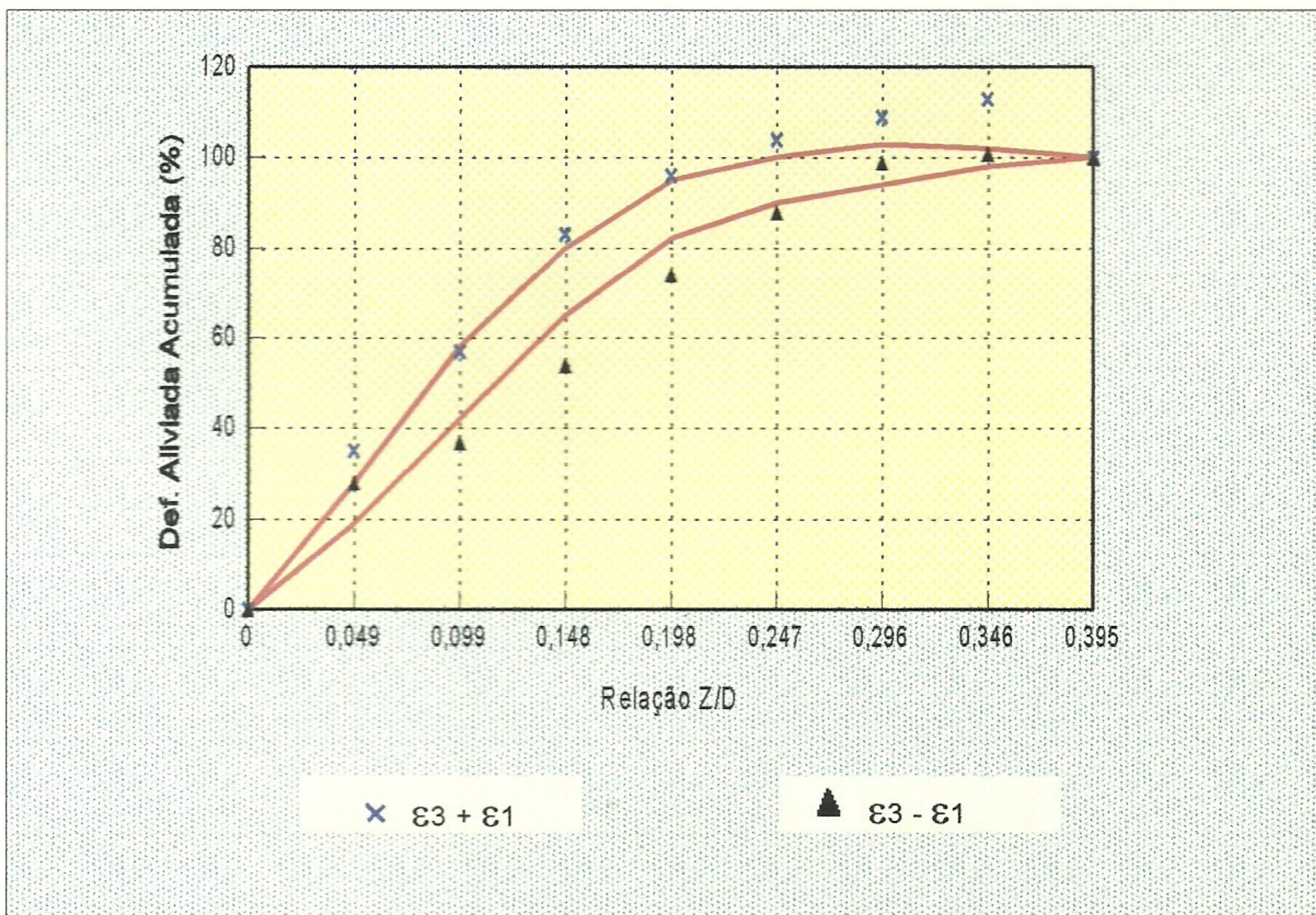


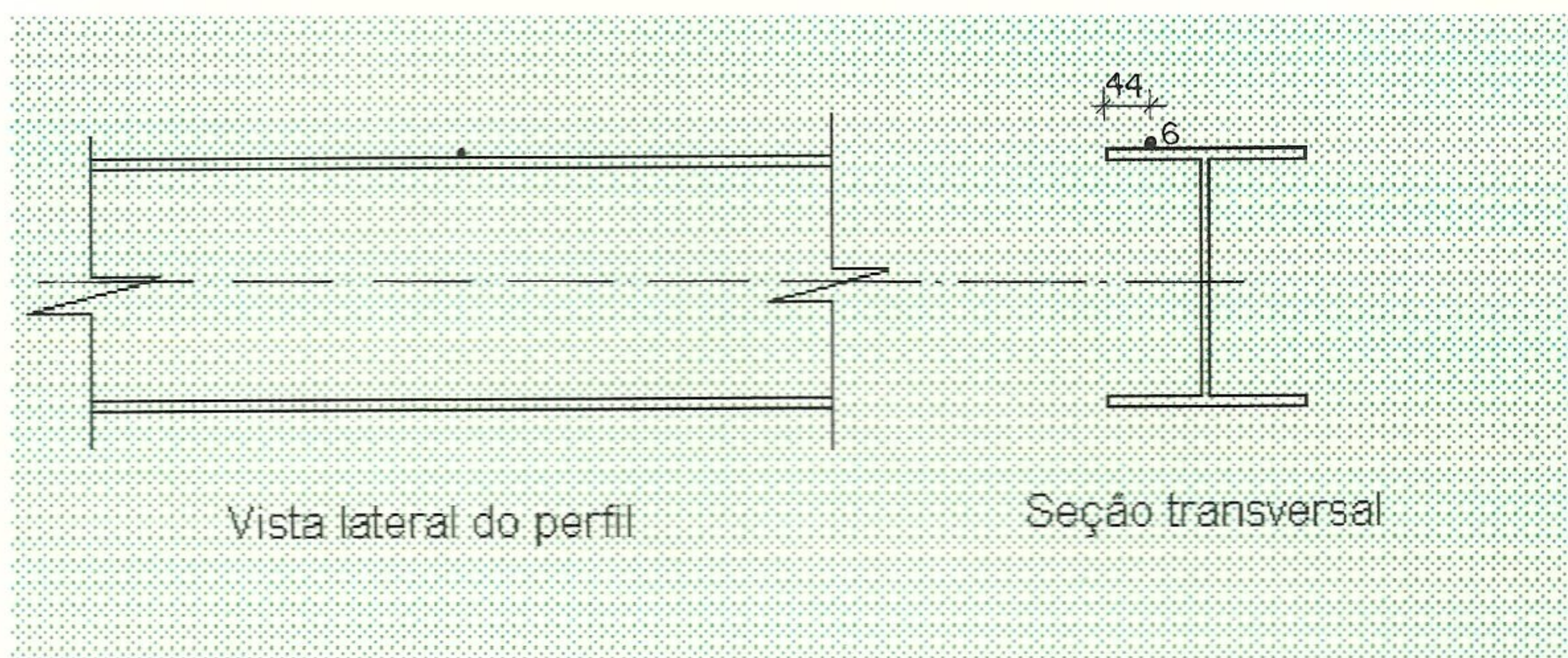
Gráfico 10 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 05 do perfil 01.

Tabela 11 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 06

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	2400	1674	2869	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	2423	1690	2874	
20	0,508	2438	1697	2974	Tensão de alimentação da roseta: 3,000 V
30	0,762	2462	1708	2880	
40	1,016	2489	1718	2877	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	2514	1733	2878	
60	1,524	2538	1743	2876	Diâmetro do furo (D_0): 42 divisões
70	1,778	2564	1754	2874	
80	2,032	2583	1764	2873	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	2596	1772	2871	
100	2,540	2606	1776	2868	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 12 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade	Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)		
	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	15	11	3	18	-12	-3	0,031	0,06	9,64312E-08	1,44683E-07	7	27	69
0,508	0,099	10	5	66	76	56	67	0,073	0,14	2,2708E-07	3,37593E-07	25	19	148
0,762	0,148	16	7	-62	-46	-78	-61	0,106	0,219	3,29732E-07	5,28093E-07	19	-82	12
1,016	0,198	18	7	-2	16	-20	3	0,128	0,27	3,98167E-07	6,51073E-07	-4	2	18
1,270	0,247	17	10	1	17	-16	-3	0,138	0,313	4,29274E-07	7,54762E-07	5	5	15
1,524	0,296	16	7	-1	15	-17	1	0,14	0,32	4,35496E-07	7,71642E-07	-2	3	14
1,778	0,346	17	7	-1	16	-18	1	0,143	0,326	4,44828E-07	7,8611E-07	-2	3	15
2,032	0,395	13	7	-1	12	-13	-1	0,145	0,33	4,51049E-07	7,95756E-07	2	2	11
2,286	0,445	9	5	-1	7	-10	-3	0,145	0,33	4,51049E-07	7,95756E-07	8	1	7
2,540	0,494	7	3	-2	5	-9	-1	0,145	0,33	4,51049E-07	7,95756E-07	3	0	5

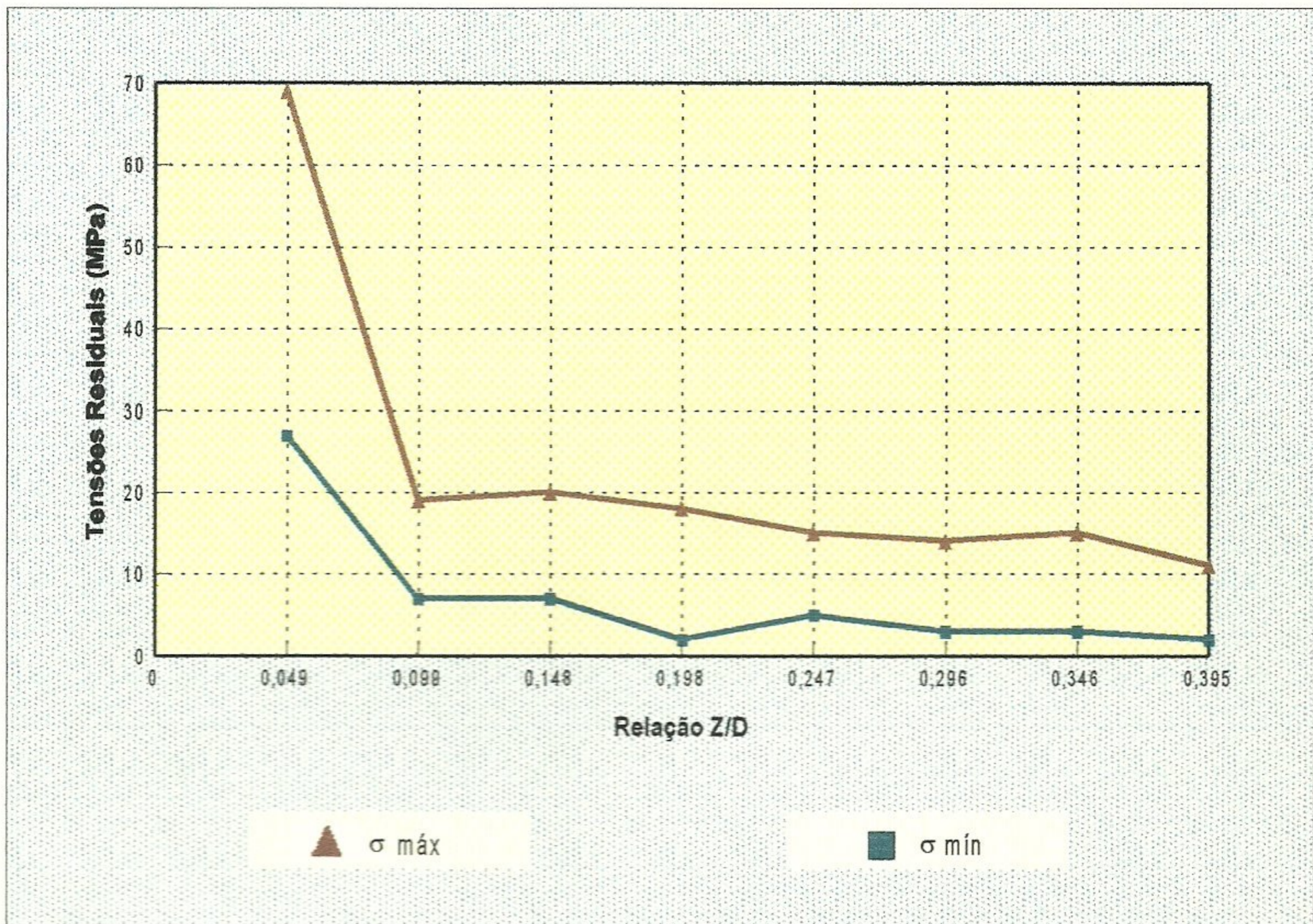


Gráfico 11 - Valores de tensões residuais para o ponto 06 do perfil 01.

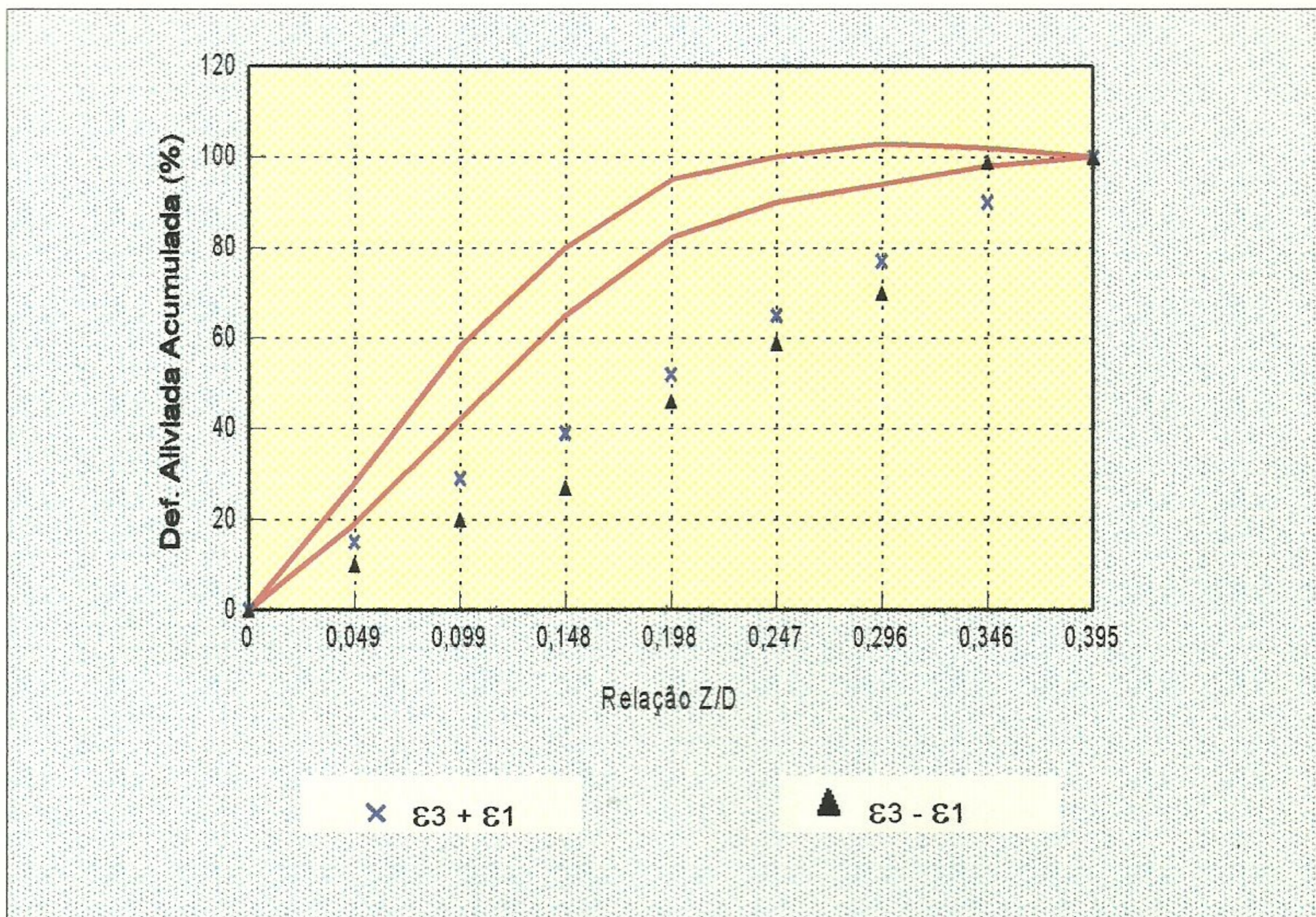


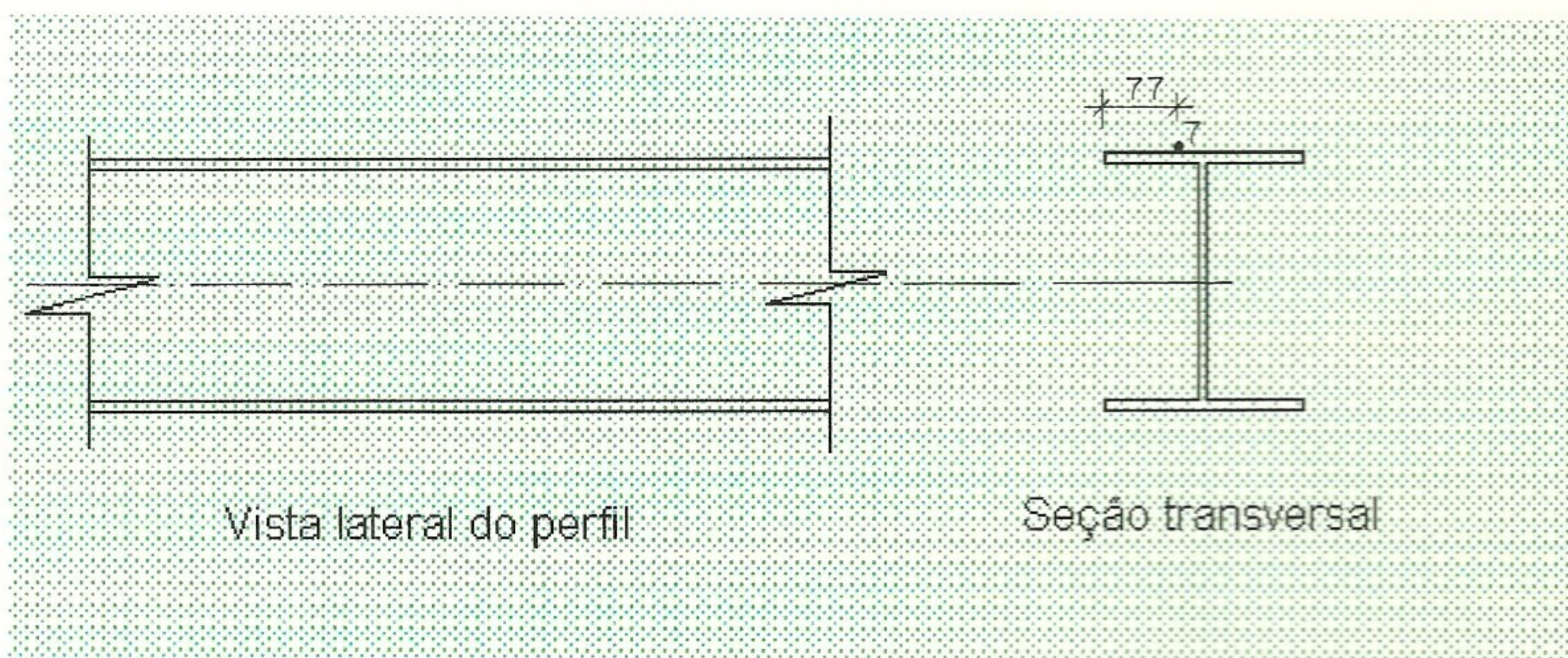
Gráfico 12 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 06 do perfil 01.

Tabela 13 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 07

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μ V)	V2 (μ V)	V3 (μ V)	
0	0,000	-19	1101	296	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	10	1118	295	
20	0,508	42	1130	288	Tensão de alimentação da roseta: 2,0023 V
30	0,762	68	1139	283	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	84	1144	273	
50	1,270	97	1148	268	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
60	1,524	103	1148	260	
70	1,778	105	1149	257	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	106	1147	252	
90	2,286	103	1145	252	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	102	1143	250	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 14 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade Z(mm)	Z/D	Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
		ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	29	17	-1	28	-30	-6	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	6	35	143
0,508	0,099	32	12	-7	25	-39	1	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	1	-2	70
0,762	0,148	26	9	-5	21	-31	3	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	3	1	39
1,016	0,198	16	5	-10	6	-26	-4	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	4	-7	17
1,270	0,247	13	4	-5	8	-18	0	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	0	-1	13
1,524	0,296	6	0	-8	-2	-14	-2	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	4	-7	4
1,778	0,346	2	1	-3	-1	-5	-3	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	15	-3	1
2,032	0,395	1	-2	-5	-4	-6	0	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	0	-5	-1
2,286	0,445	-3	-2	0	-3	3	1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	9	-3	-1
2,540	0,494	-1	-2	-2	-3	-1	1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	23	-3	-2

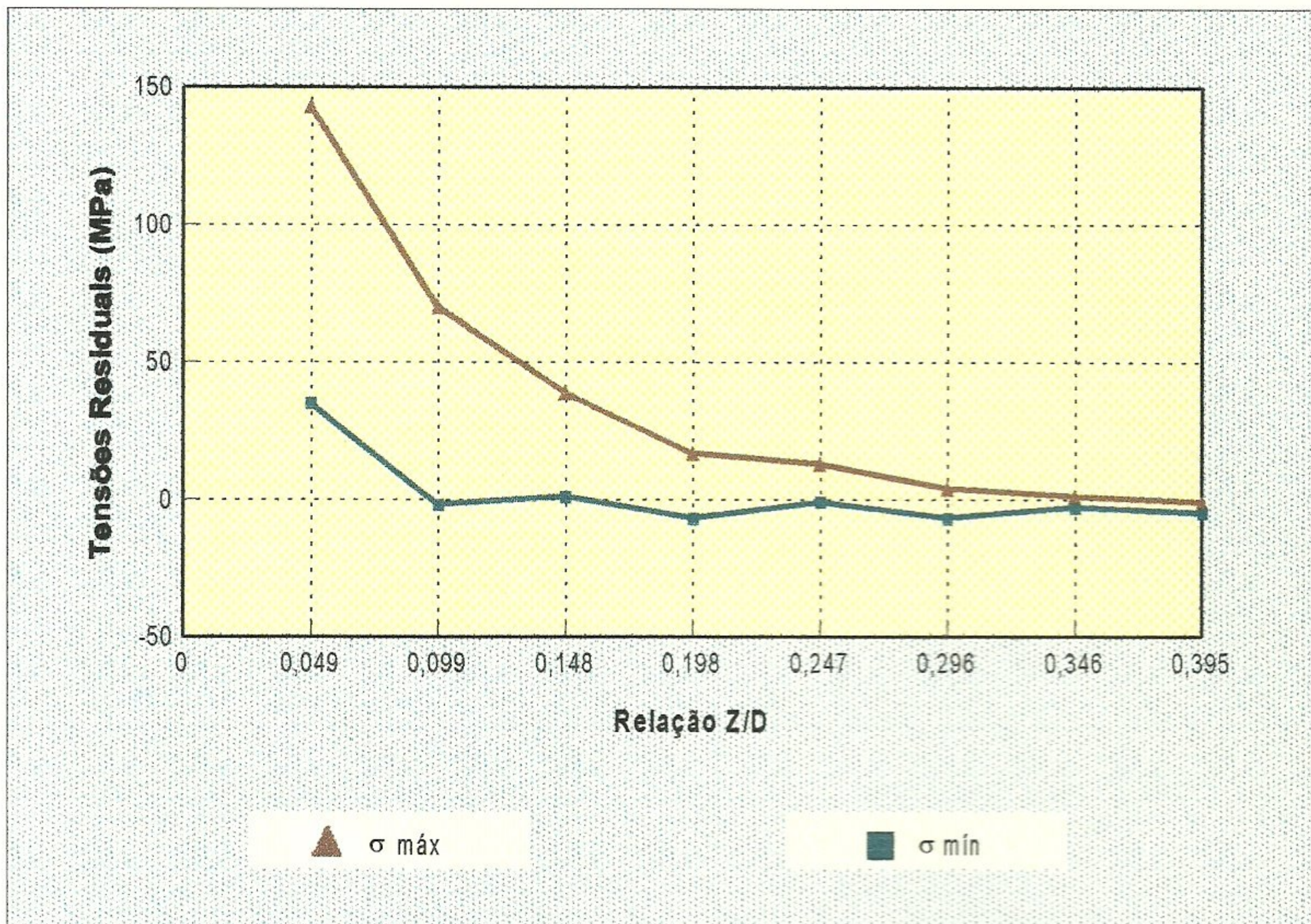


Gráfico 13 - Valores de tensões residuais para o ponto 07 do perfil 01.

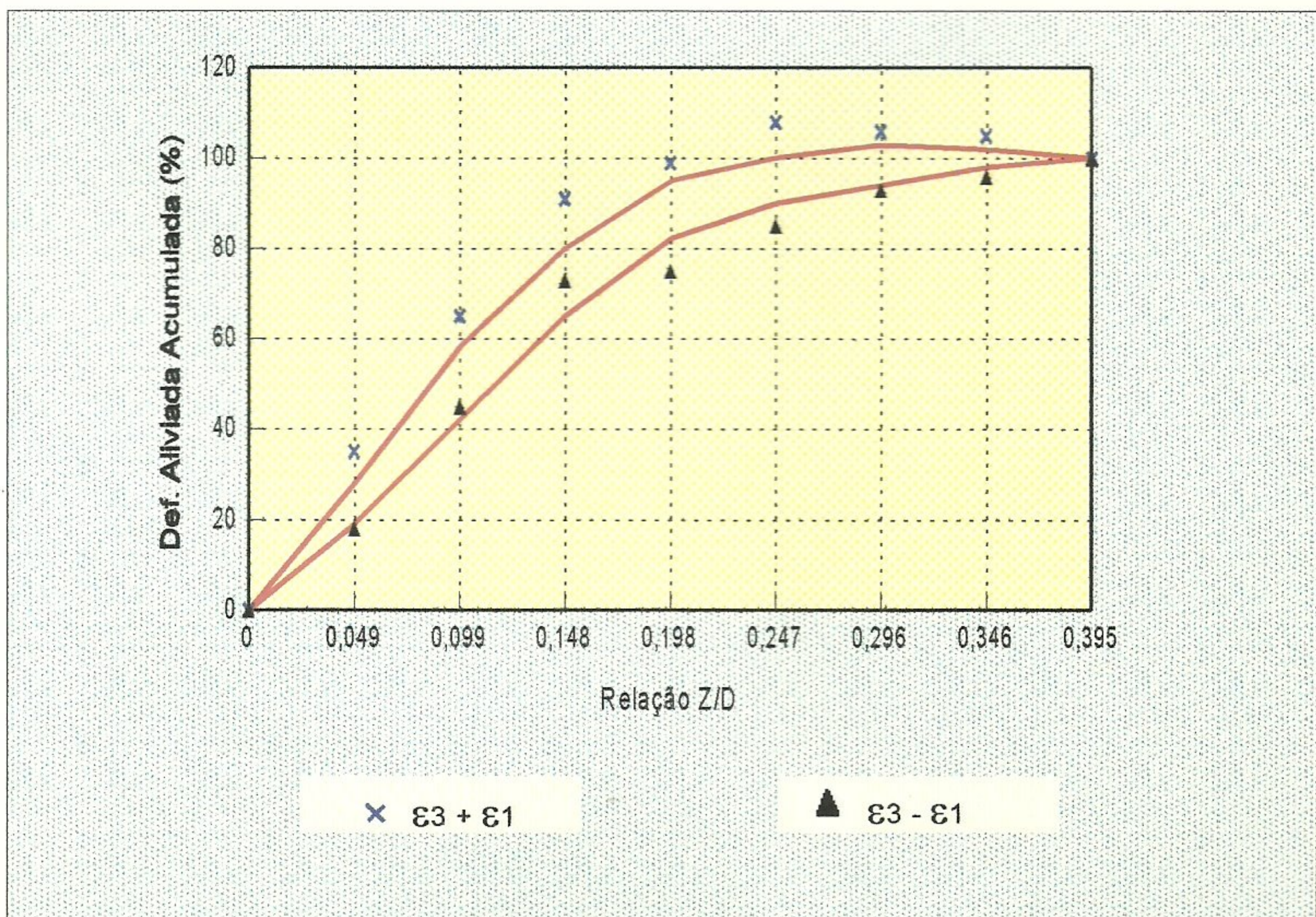


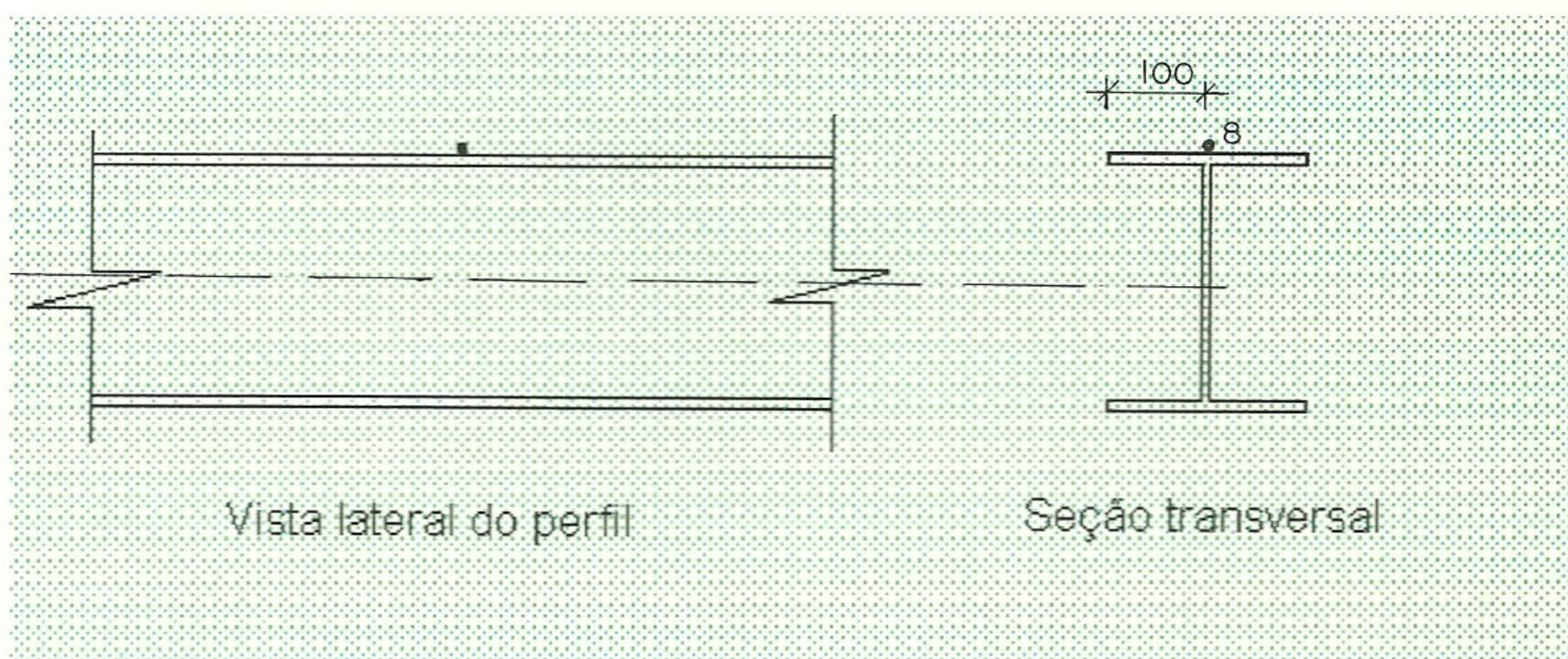
Gráfico 14 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 07 do perfil 01.

Tabela 15 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 08

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-307	-616	963	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-486	-692	955	
20	0,508	-625	-775	1000	Tensão de alimentação da roseta: 3,000 V
30	0,762	-785	-894	1050	
40	1,016	-935	-959	1084	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	-1000	-988	1100	
60	1,524	-1042	-1005	1106	Diâmetro do furo (D_Ω): 40 divisões
70	1,778	-1071	-1021	1115	
80	2,032	-1084	-1023	1110	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	-1094	-1035	1102	
100	2,540	-1091	-1032	1099	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 16 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade	Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)		
	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	-118	-50	-5	-123	113	-23	0,029	0,057	9,02098E-08	1,37449E-07	-6	-552	-113
0,508	0,099	-92	-55	30	-62	121	48	0,063	0,122	1,95973E-07	2,94189E-07	11	-190	32
0,762	0,148	-106	-79	33	-73	139	84	0,094	0,195	2,92404E-07	4,70219E-07	16	-148	24
1,016	0,198	-99	-43	22	-77	121	9	0,112	0,241	3,48396E-07	5,81143E-07	2	-107	-3
1,270	0,247	-43	-19	11	-32	53	6	0,12	0,28	3,73282E-07	6,75187E-07	3	-42	-2
1,524	0,296	-28	-11	4	-24	32	-1	0,125	0,31	3,88835E-07	7,47528E-07	-1	-26	-5
1,778	0,346	-19	-11	6	-13	25	8	0,13	0,322	4,04389E-07	7,76465E-07	9	-17	0
2,032	0,395	-9	-1	-3	-12	5	-9	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	-30	-11	-4
2,286	0,445	-7	-8	-5	-12	1	4	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	38	-8	-6
2,540	0,494	2	2	-2	0	-4	-4	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	23	-2	2



Gráfico 15 - Valores de tensões residuais para o ponto 08 do perfil 01.

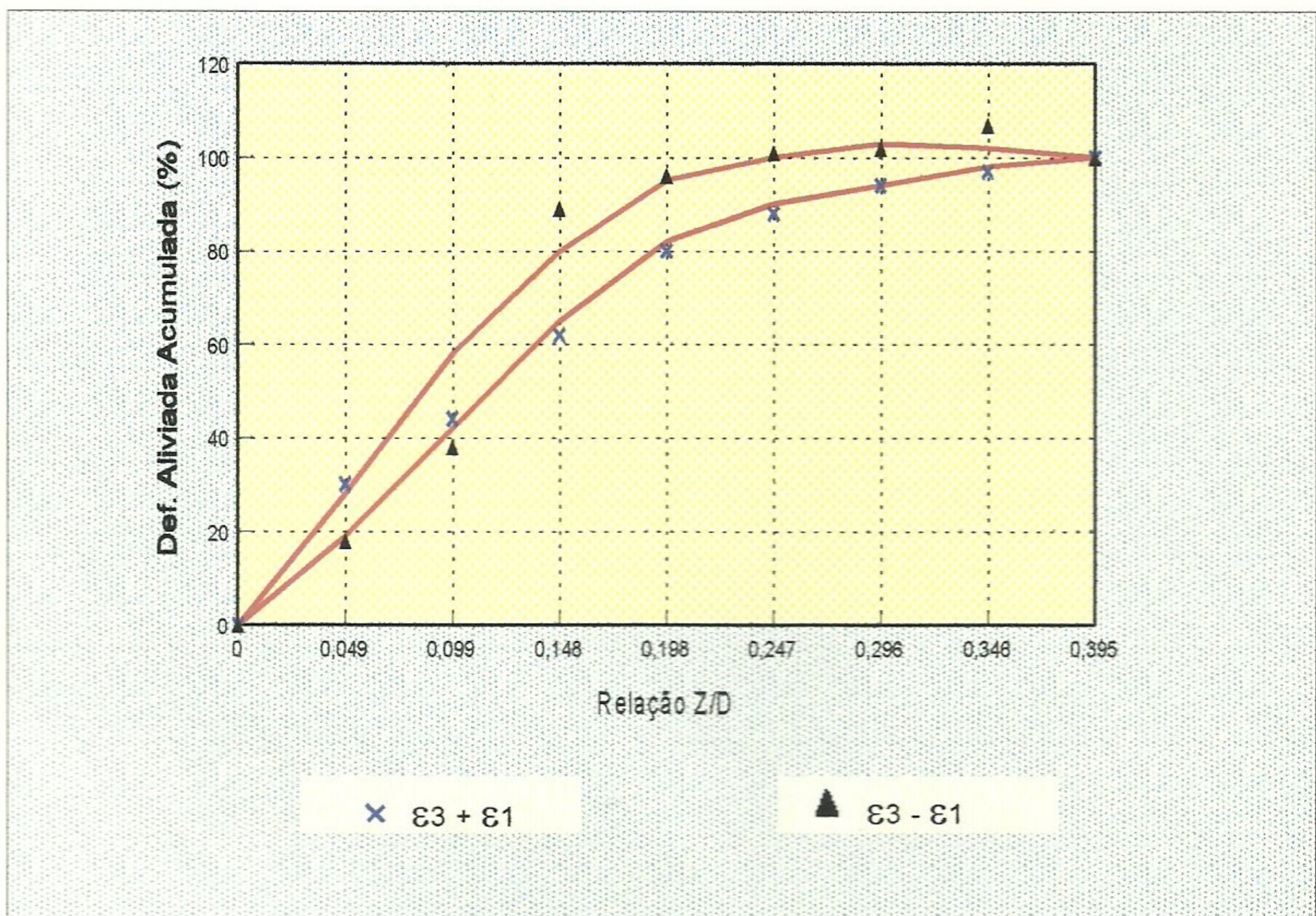


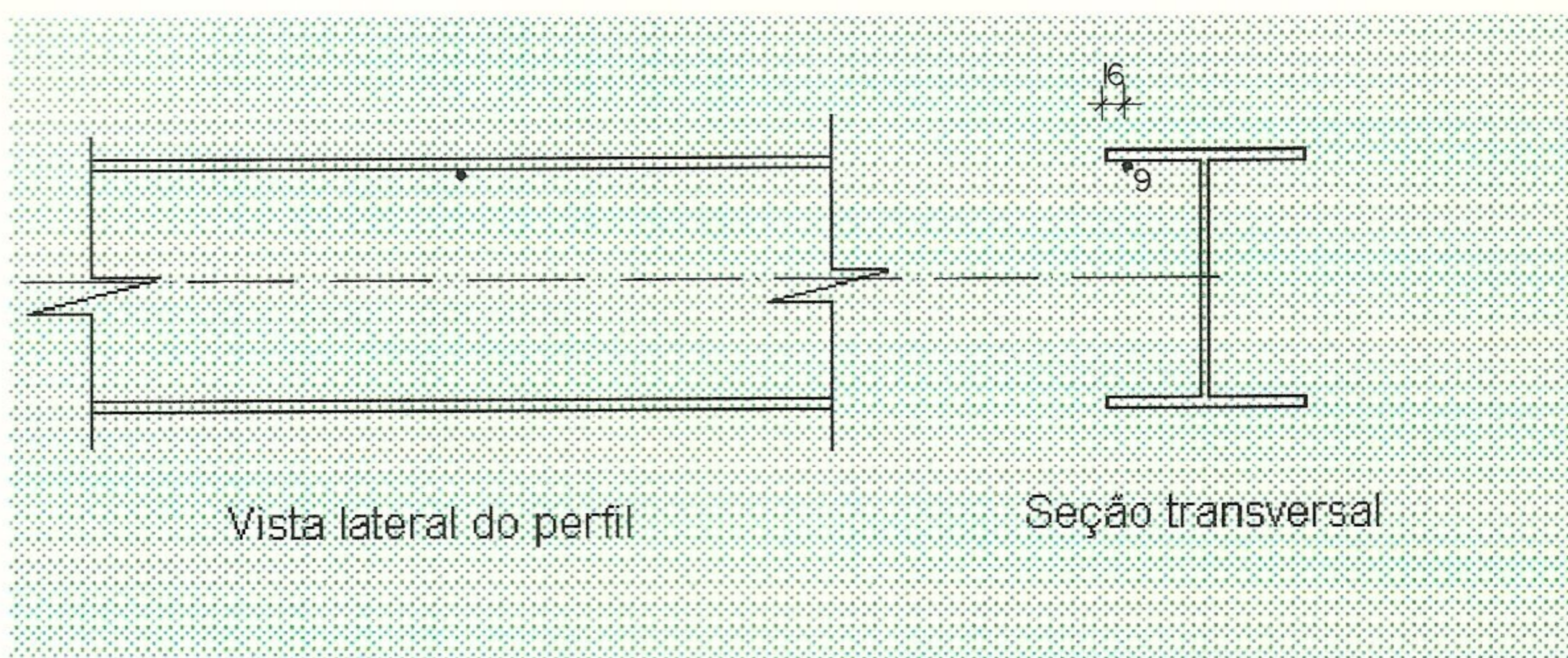
Gráfico 16 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 08 do perfil 01.

Tabela 17 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 09

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μ V)	V2 (μ V)	V3 (mV)	
0	0,000	336	497	-37	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	380	503	-20	
20	0,508	406	505	-20	Tensão de alimentação da roseta: 2,0035 V
30	0,762	424	503	-17	
40	1,016	435	501	-26	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	441	497	-27	
60	1,524	445	494	-29	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
70	1,778	447	491	-29	
80	2,032	450	488	-31	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	449	486	-30	
100	2,540	450	486	-31	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 18 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade Z(mm)	Z/D	Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
		ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	43	6	17	60	-27	48	0,025	0,058	7,77671E-08	1,39866E-07	-30	95	293
0,508	0,099	26	2	0	26	-26	22	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	-20	4	67
0,762	0,148	18	-2	3	21	-15	25	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	-30	2	37
1,016	0,198	11	-2	-9	2	-20	6	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	-8	-8	11
1,270	0,247	6	-4	-1	5	-7	13	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	31	-2	10
1,524	0,296	4	-3	-2	2	-6	8	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	27	-2	5
1,778	0,346	2	-3	0	2	-2	8	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	38	-2	4
2,032	0,395	3	-3	-2	1	-5	7	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	27	-2	4
2,286	0,445	-1	-2	1	0	2	4	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	32	-2	2
2,540	0,494	1	0	-1	0	-2	0	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	0	-1	1

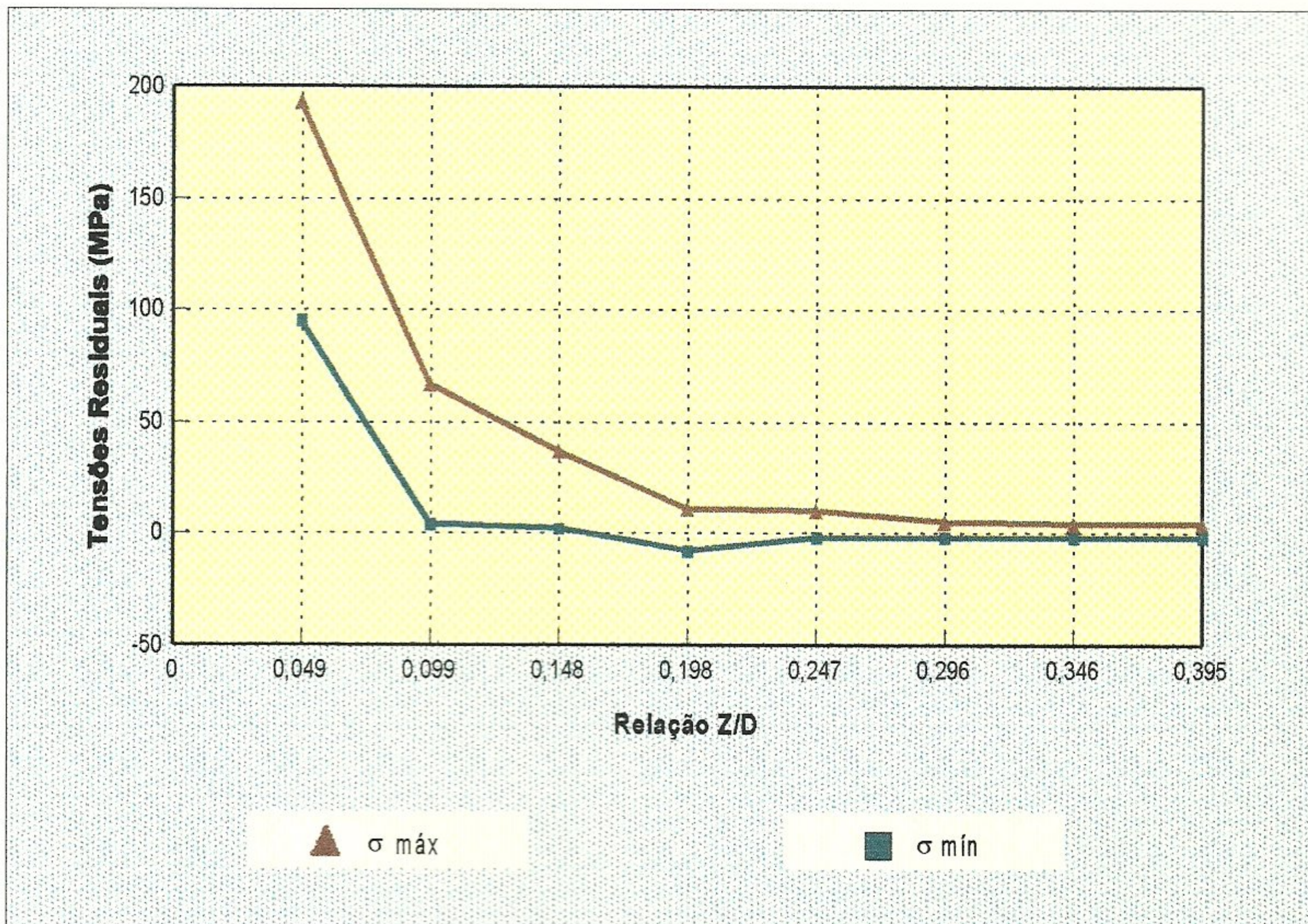


Gráfico 17 - Valores de tensões residuais para o ponto 09 do perfil 01.

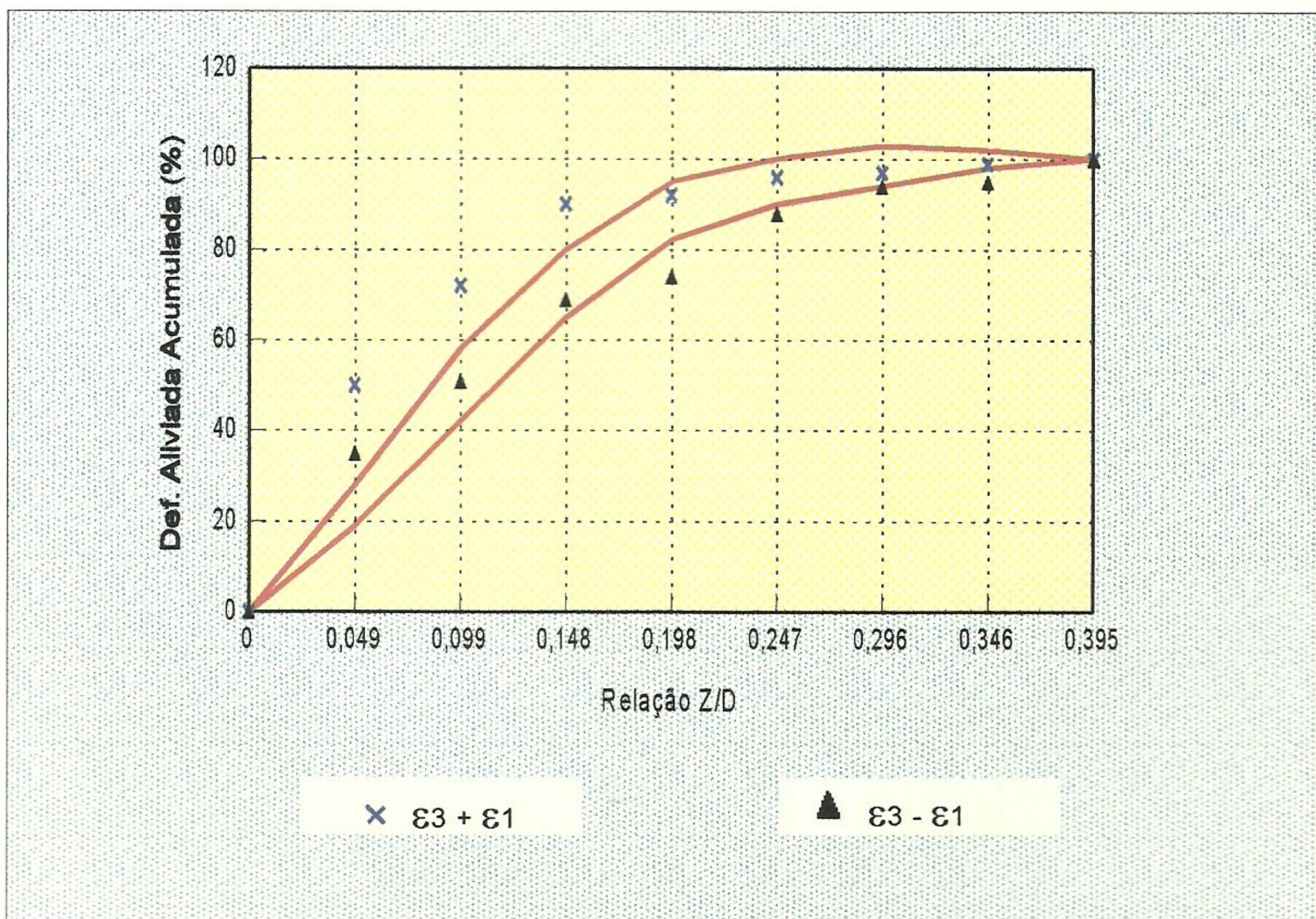


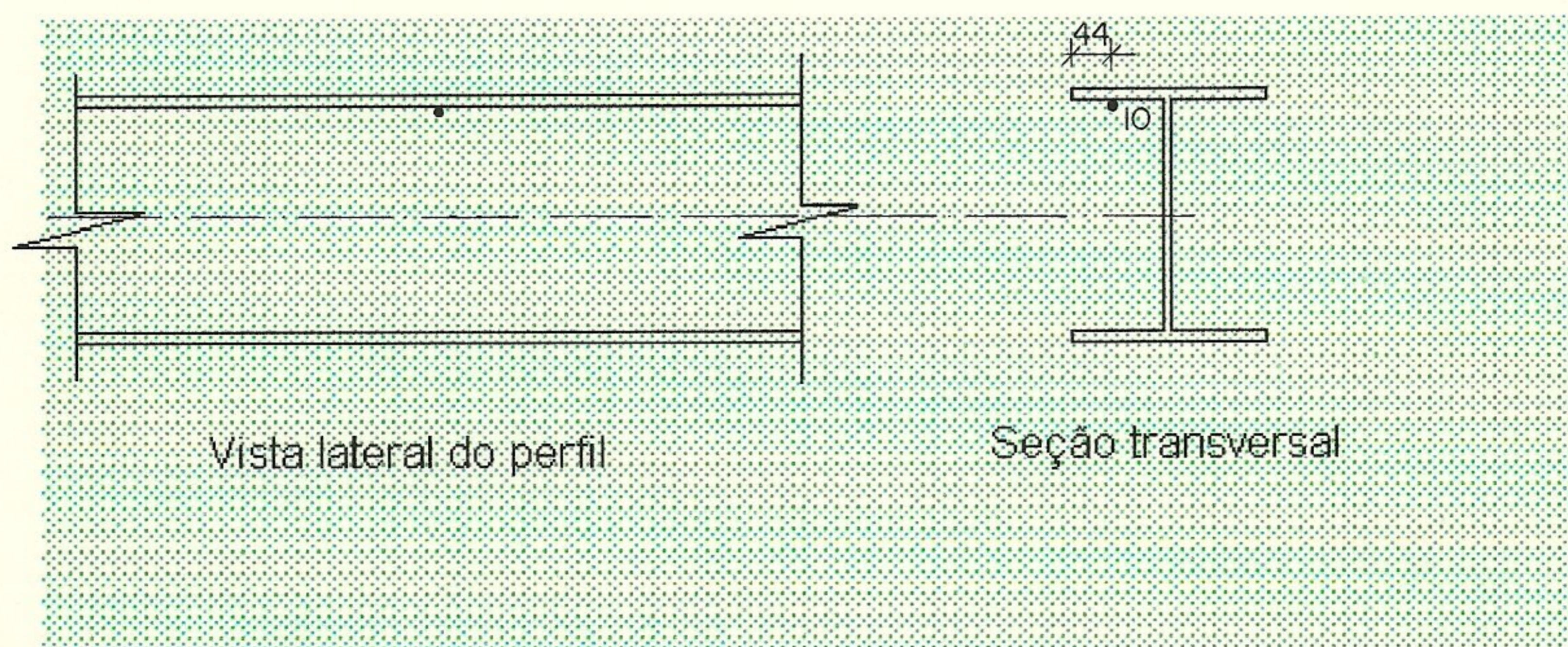
Gráfico 18 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 09 do perfil 01.

Tabela 19 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 10

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	398	127	753	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	424	143	760	
20	0,508	451	154	755	Tensão de alimentação da roseta: 2,0030 V
30	0,762	471	162	753	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	485	167	748	
50	1,270	482	149	722	Diâmetro do furo (D_o): 38 divisões
60	1,524	483	147	715	
70	1,778	485	145	713	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	484	143	708	
90	2,286	482	142	706	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	480	135	700	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 20 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente				Tensão (MPa)		
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	26	16	7	33	-19	1	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	-2	71	139
0,508	0,099	27	11	-5	22	-32	0	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	0	1	60
0,762	0,148	20	8	-2	18	-22	2	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	-3	4	30
1,016	0,198	14	5	-5	9	-19	-1	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	2	-2	16
1,270	0,247	-3	-18	-26	-29	-23	7	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	-8	-32	-12
1,524	0,296	1	-2	-7	-6	-8	-2	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	7	-7	-1
1,778	0,346	2	-2	-2	0	-4	4	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	23	-2	2
2,032	0,395	-1	-2	-5	-6	-4	-2	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	13	-6	-3
2,286	0,445	-2	-1	-2	-4	0	-2	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	13	-4	-2
2,540	0,494	-2	-7	-6	-8	-4	6	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-28	-8	-3

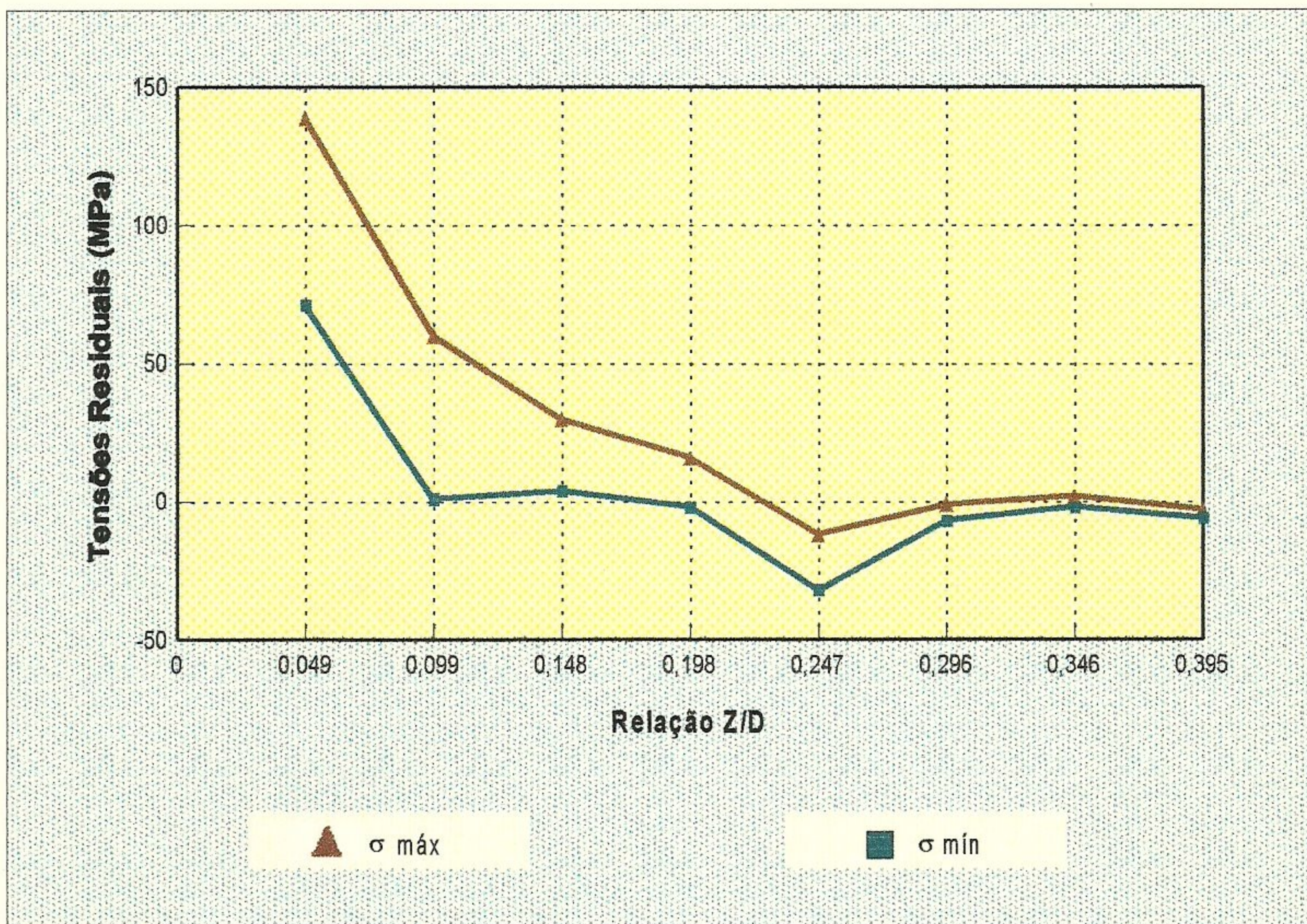


Gráfico 19 - Valores de tensões residuais para o ponto 10 do perfil 01.

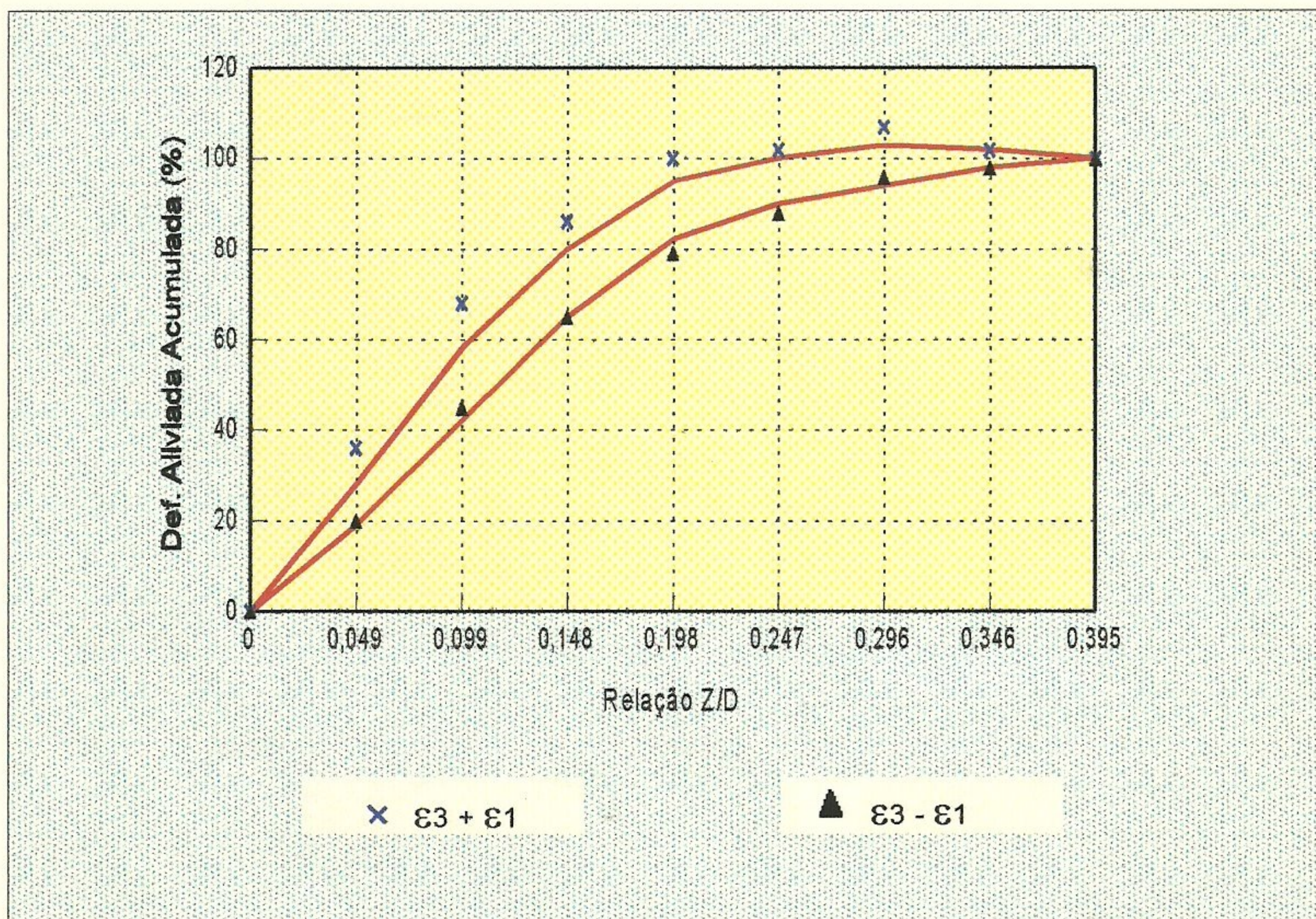


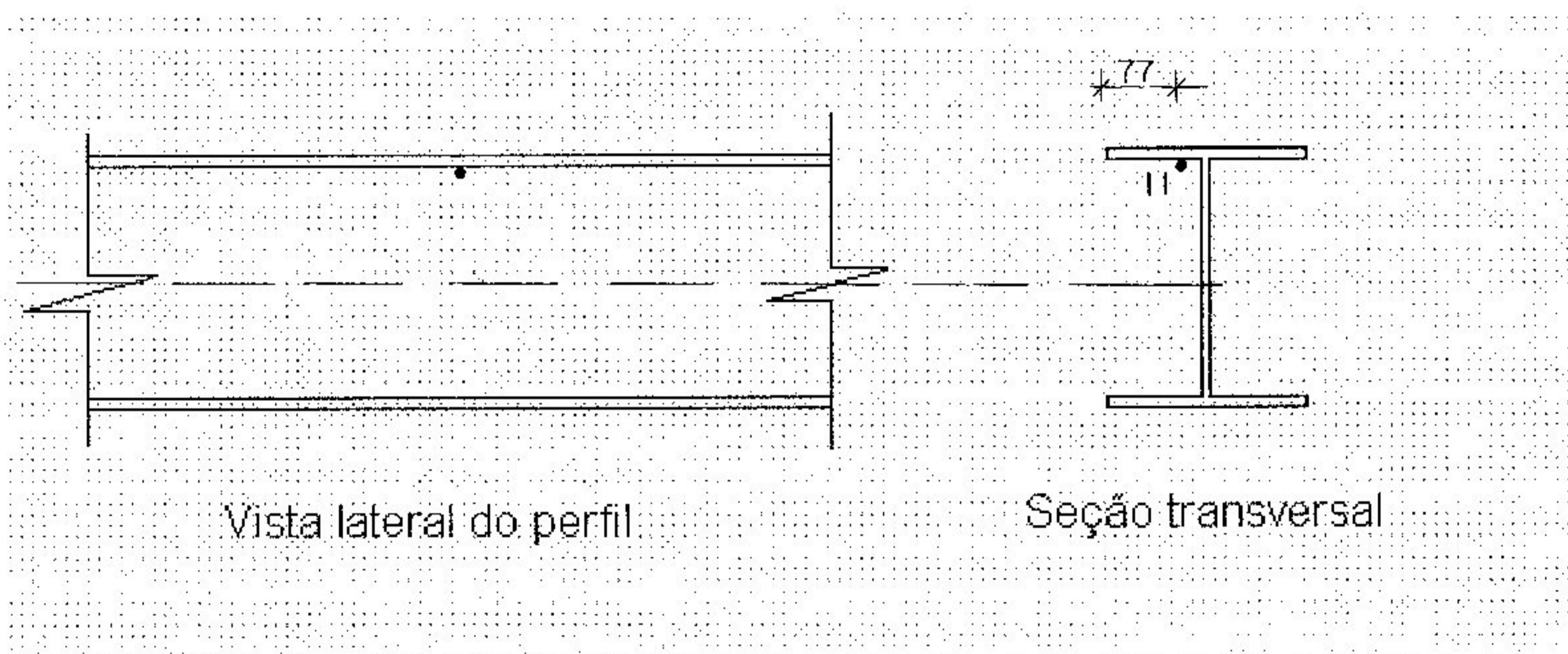
Gráfico 20 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 10 do perfil 01

Tabela 21 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 11

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	522	905	736	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	579	918	735	
20	0,508	633	926	721	Tensão de alimentação da roseta: 2,0035 V
30	0,762	674	933	701	
40	1,016	689	932	692	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	705	931	682	
60	1,524	713	929	674	Diâmetro do furo (D_o): 38 divisões
70	1,778	716	927	668	
80	2,032	719	925	665	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	718	923	663	
100	2,540	716	920	663	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 22 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade	Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)		
	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	56	13	-1	55	-57	30	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	-14	63	293
0,508	0,099	53	8	-14	40	-67	24	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	-10	-12	121
0,762	0,148	41	7	-20	21	-60	7	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	-3	-17	57
1,016	0,198	15	-1	-9	6	-24	8	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	-9	-7	17
1,270	0,247	16	-1	-10	6	-26	8	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	8	-7	16
1,524	0,296	8	-2	-8	0	-16	4	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	-7	-6	6
1,778	0,346	3	-2	-6	-3	-9	1	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	-3	-5	1
2,032	0,395	3	-2	-3	0	-6	4	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	-17	-3	3
2,286	0,445	-1	-2	-2	-3	-1	1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-23	-3	-2
2,540	0,494	-2	-3	0	-2	2	4	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	32	-3	0

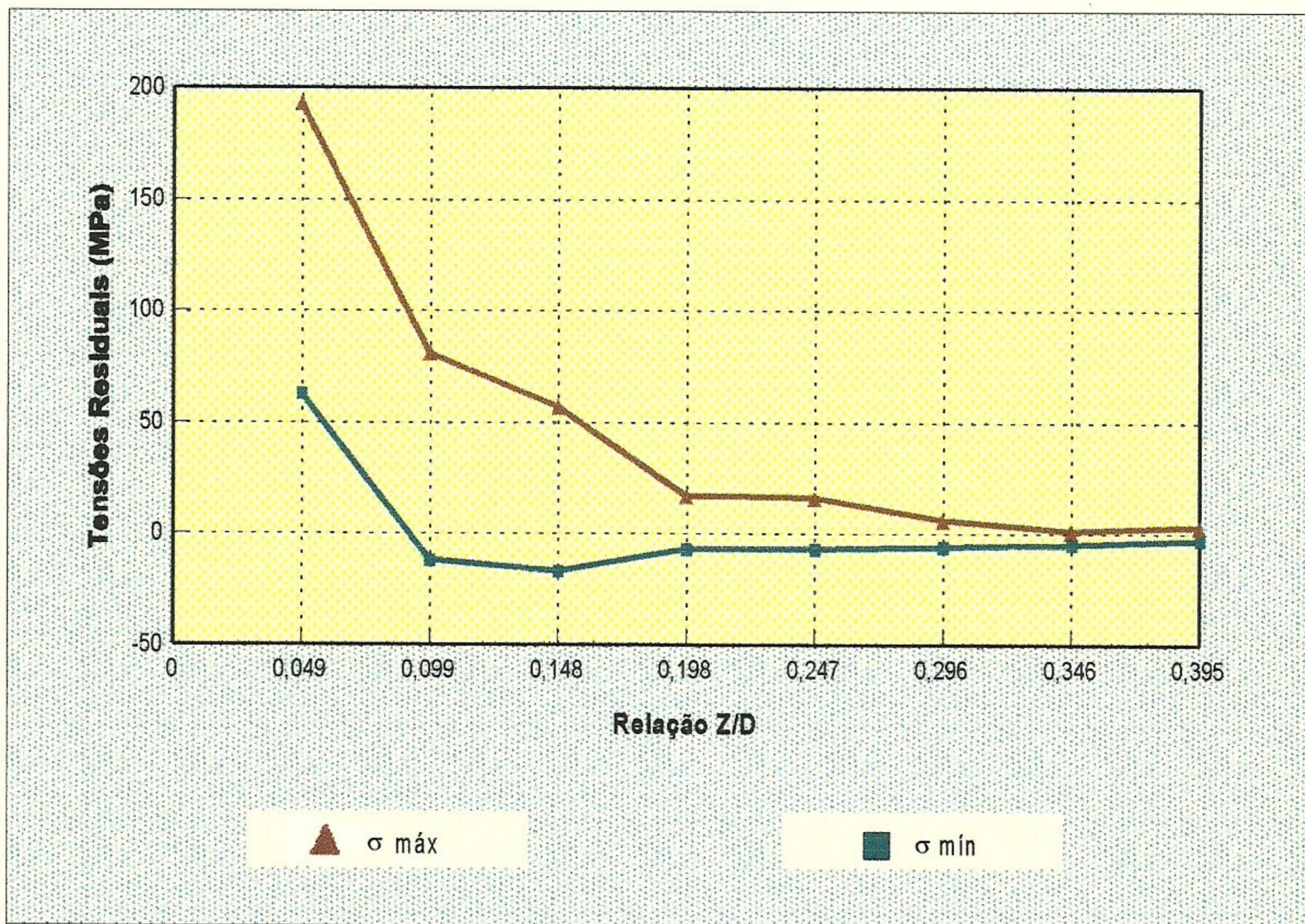


Gráfico 21 - Valores de tensões residuais para o ponto 11 do perfil 01.

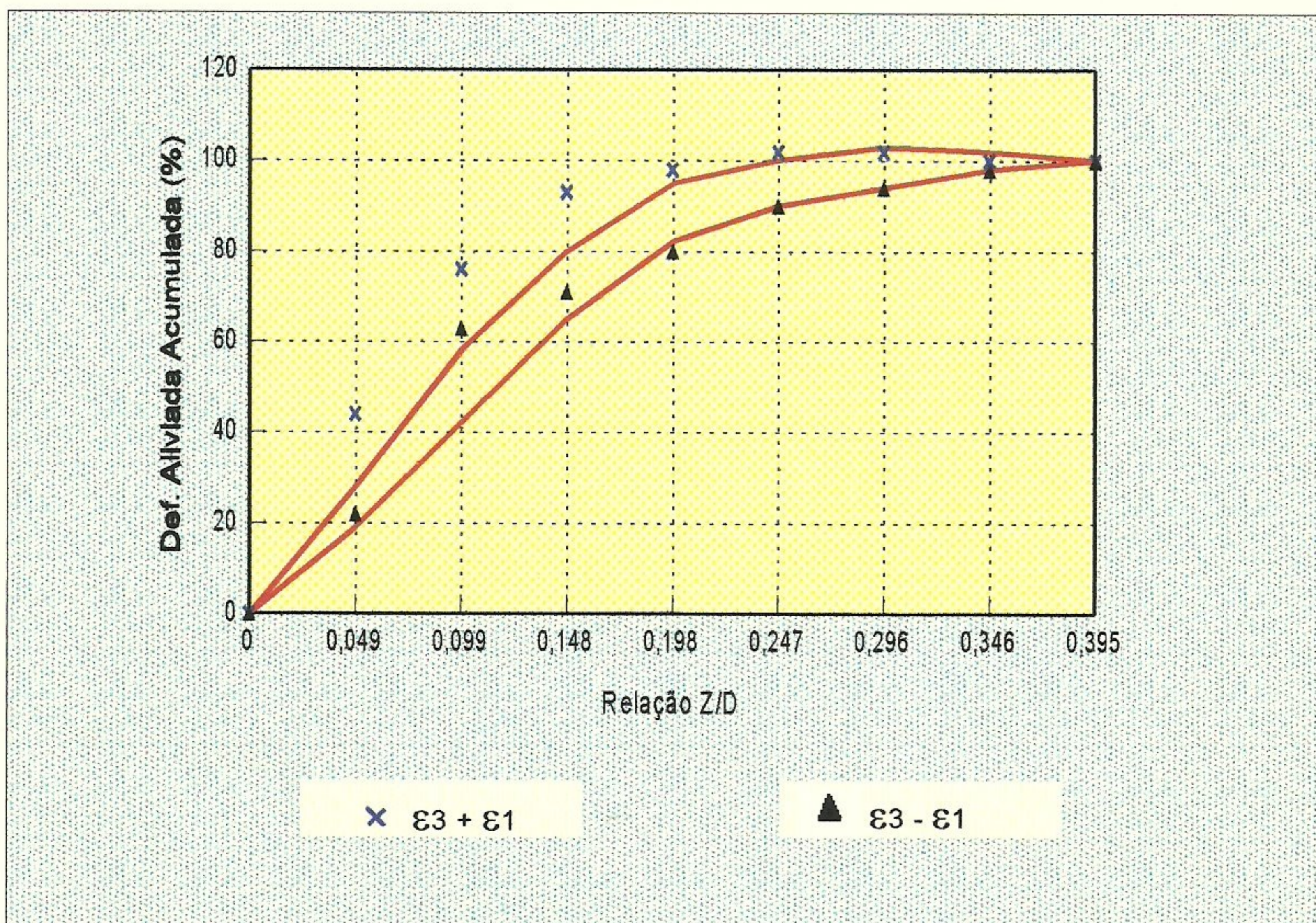


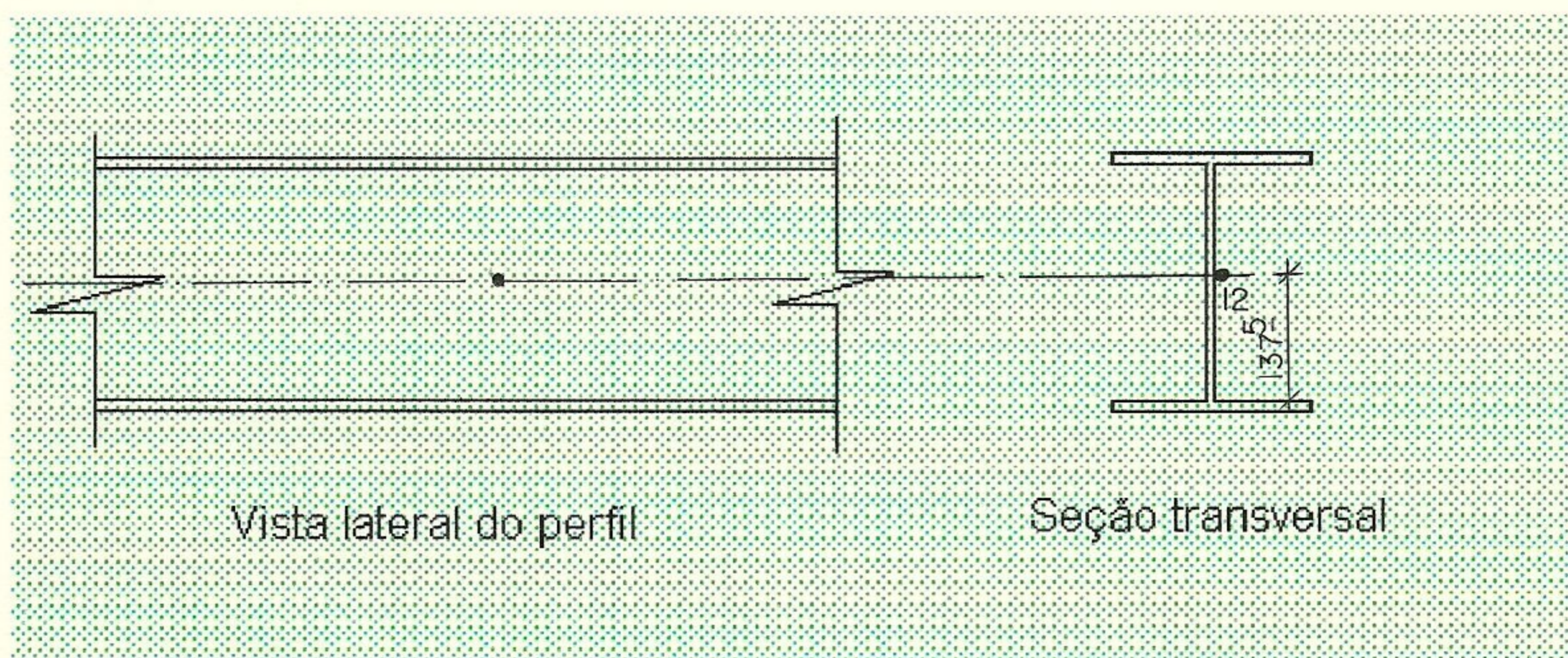
Gráfico 22 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 11 do perfil 01.

Tabela 23 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 12

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	368	-318	214	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	422	-283	215	
20	0,508	439	-272	216	Tensão de alimentação da roseta: 2,0018 V
30	0,762	445	-267	215	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	458	-263	212	
50	1,270	466	-260	211	Diâmetro do furo (D_o): 42 divisões
60	1,524	475	-256	210	
70	1,778	485	-250	208	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	92	-248	205	
90	2,286	500	-245	203	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	505	-246	201	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 24 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	53	35	1	54	-52	-15	0,031	0,06	9,64312E-08	1,44683E-07	8	47	185
0,508	0,099	17	11	1	18	-16	-4	0,073	0,14	2,2708E-07	3,37593E-07	7	8	32
0,762	0,148	6	5	-1	5	-7	-5	0,106	0,219	3,29732E-07	5,28093E-07	18	0	8
1,016	0,198	13	4	-3	10	-16	2	0,128	0,27	3,98167E-07	6,51073E-07	-4	0	12
1,270	0,247	8	3	-1	7	-9	1	0,138	0,313	4,29274E-07	7,54762E-07	-3	1	7
1,524	0,296	9	4	-1	8	-10	0	0,14	0,32	4,35496E-07	7,71642E-07	0	1	8
1,778	0,346	10	6	-2	8	-12	-4	0,143	0,326	4,44828E-07	7,8611E-07	9	0	8
2,032	0,395	7	2	-3	4	-10	0	0,145	0,33	4,51049E-07	7,95756E-07	0	-1	5
2,286	0,445	8	3	-2	6	-10	0	0,145	0,33	4,51049E-07	7,95756E-07	0	0	6
2,540	0,494	5	-1	-2	3	-7	5	0,145	0,33	4,51049E-07	7,95756E-07	-18	-1	4

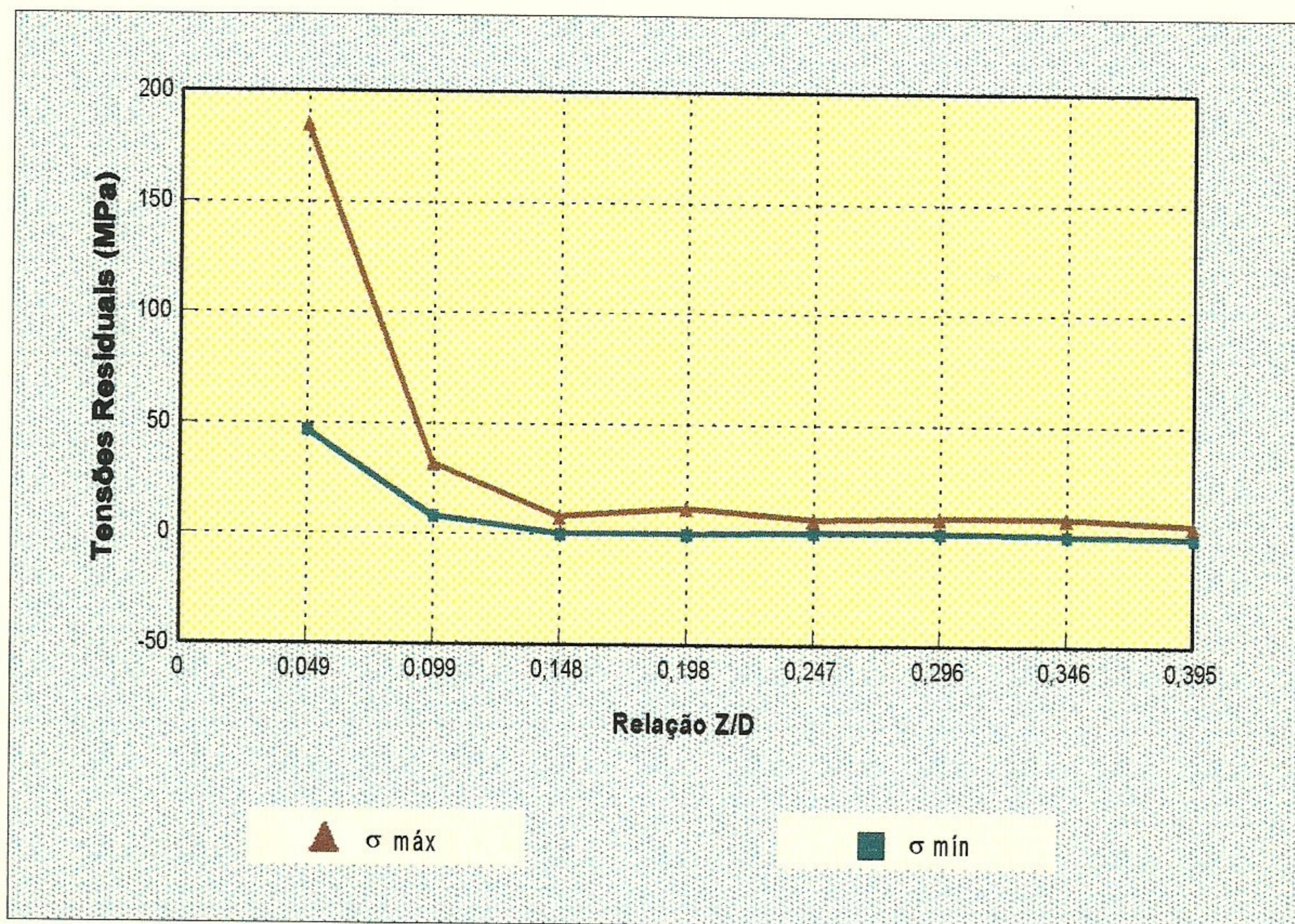


Gráfico 23 - Valores de tensões residuais para o ponto 12 do perfil 01.

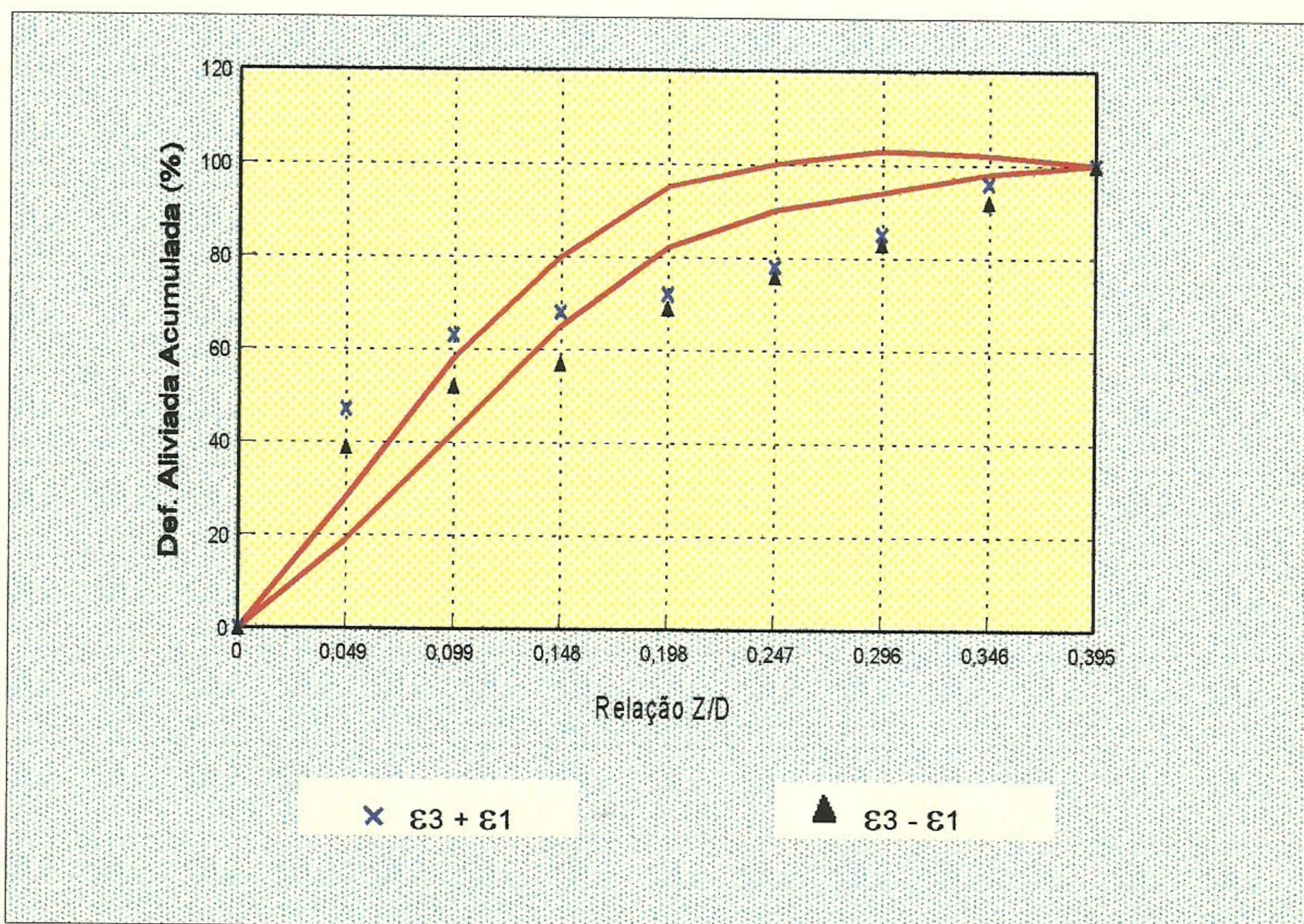


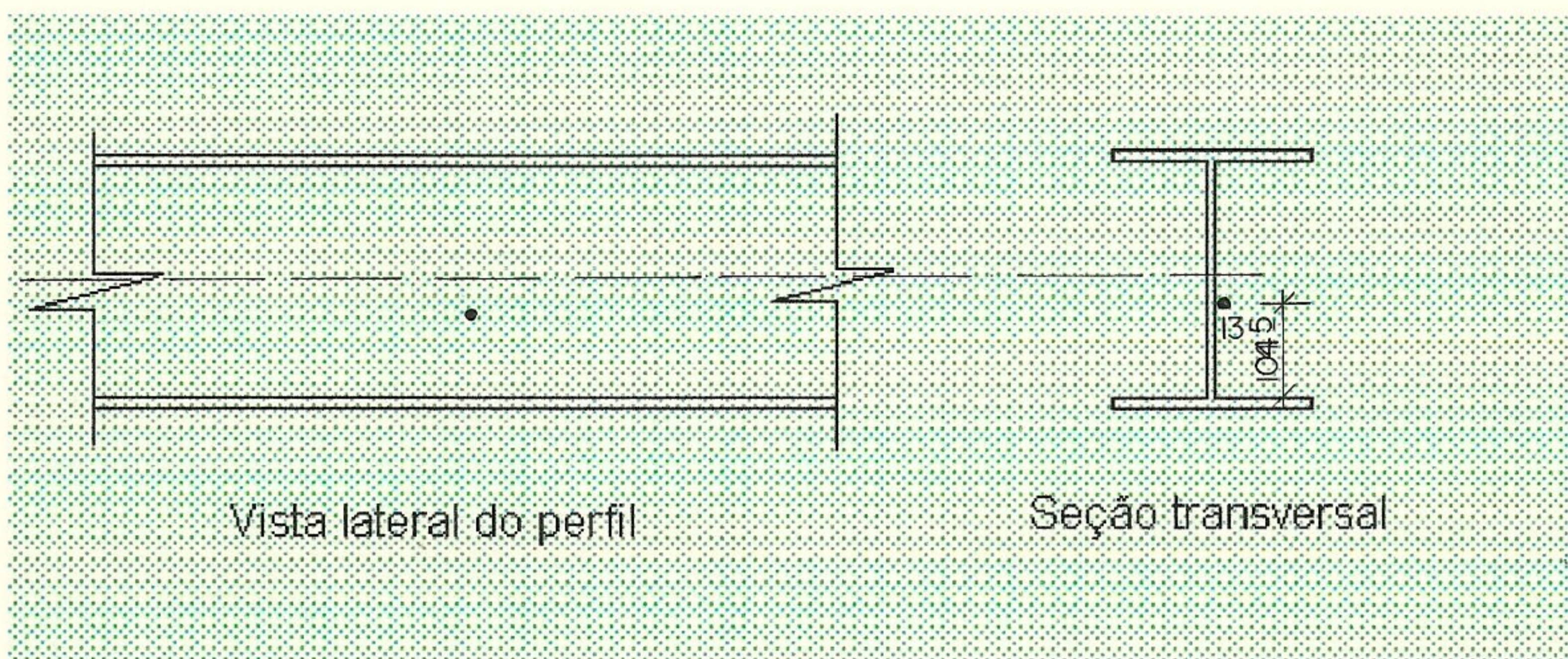
Gráfico 24 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 12 do perfil 01.

Tabela 25 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 13

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-336	738	-319	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-292	767	-312	
20	0,508	-243	781	-322	Tensão de alimentação da roseta: 2,0040 V
30	0,762	-206	797	-331	
40	1,016	-179	806	-343	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	-162	810	-350	
60	1,524	-154	811	-358	Diâmetro do furo (D_0): 38 divisões
70	1,778	-151	812	-362	
80	2,032	-151	809	-368	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	-152	808	-370	
100	2,540	-154	806	-372	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 26 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	43	29	7	50	-37	-7	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	5	95	229
0,508	0,099	48	14	-10	39	-58	11	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	-5	-2	109
0,762	0,148	37	16	-9	28	-45	-4	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	3	-1	54
1,016	0,198	27	9	-12	15	-39	-3	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	2	-6	30
1,270	0,247	17	4	-7	10	-24	2	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	-2	-2	17
1,524	0,296	8	1	-8	0	-16	-2	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	4	-6	6
1,778	0,346	3	1	-4	-1	-7	-3	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	12	-3	2
2,032	0,395	0	-3	-6	-6	-6	0	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	0	-6	-2
2,286	0,445	-1	-1	-2	-3	-1	-1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	23	-3	-2
2,540	0,494	-2	-2	-2	-4	0	0	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	0	-3	-3

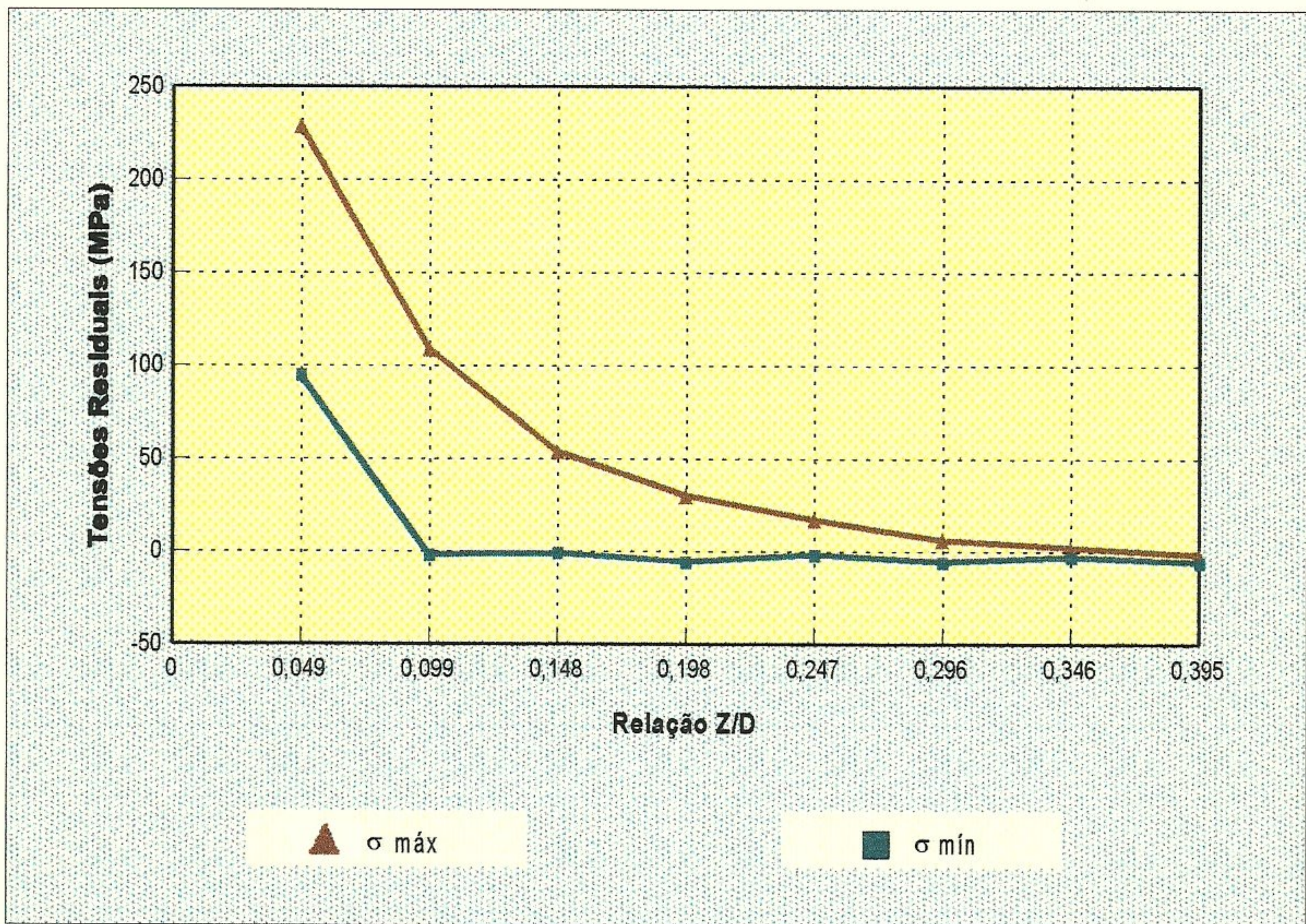


Gráfico 25 - Valores de tensões residuais para o ponto 13 do perfil 01.

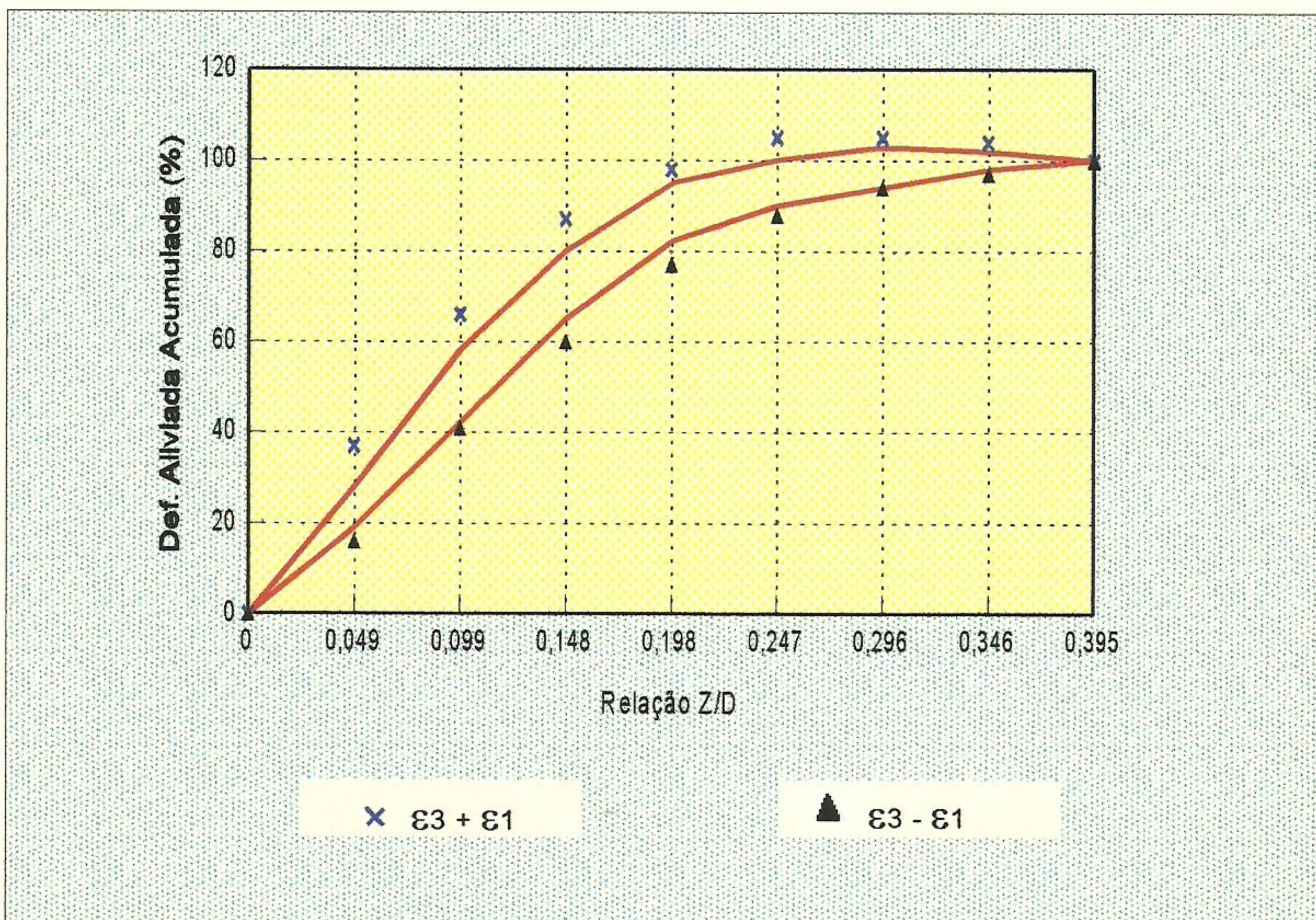


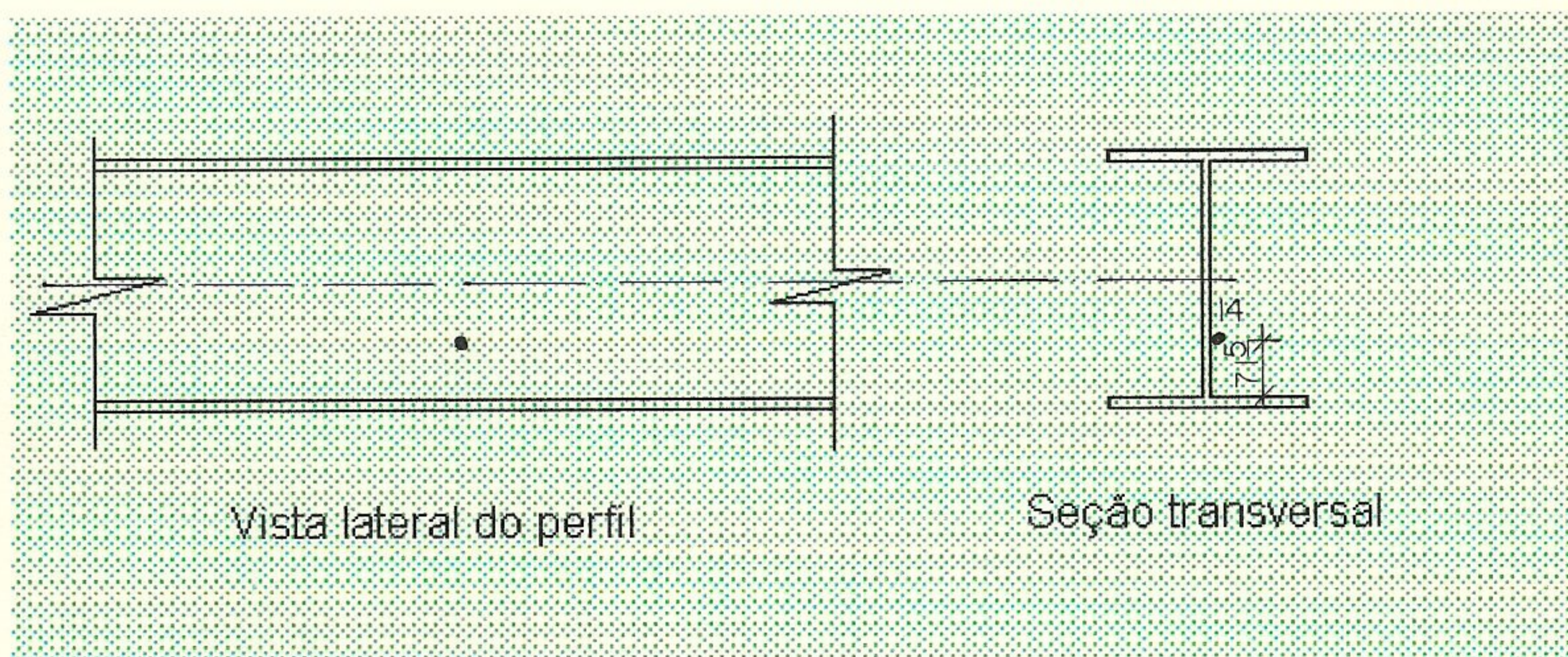
Gráfico 26 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 13 do perfil 01.

Tabela 27 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 14

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	694	119	1331	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	733	136	1331	
20	0,508	768	148	1326	Tensão de alimentação da roseta: 2,0053 V
30	0,762	816	162	1311	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	849	168	1296	
50	1,270	872	171	1282	Diâmetro do furo (D_0): 39 divisões
60	1,524	883	172	1274	
70	1,778	887	170	1266	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	888	168	1261	
90	2,286	888	165	1256	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	887	162	1253	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 28 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente				Tensão (MPa)		
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	39	17	0	39	-39	5	0,027	0,059	8,39884E-08	1,42272E-07	-4	46	183
0,508	0,099	35	12	-5	30	-39	6	0,06	0,12	1,86641E-07	2,89366E-07	-4	5	74
0,762	0,148	47	14	-15	33	-62	5	0,089	0,181	2,76851E-07	4,3646E-07	-2	-6	65
1,016	0,198	33	6	-15	18	-47	6	0,105	0,231	3,26622E-07	5,57029E-07	-4	-8	35
1,270	0,247	23	3	-14	9	-37	3	0,113	0,262	3,51507E-07	6,31782E-07	-2	-8	21
1,524	0,296	11	1	-8	3	-19	1	0,115	0,295	3,57728E-07	7,11358E-07	-2	-5	9
1,778	0,346	4	-2	-8	-4	-12	0	0,118	0,3	3,67061E-07	7,23415E-07	0	-7	1
2,032	0,395	1	-2	-5	-4	-6	0	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	0	-5	-1
2,286	0,445	0	-3	-5	-5	-5	1	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	-6	-5	-2
2,540	0,494	-1	-3	-3	-4	-2	2	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	-23	-4	-2

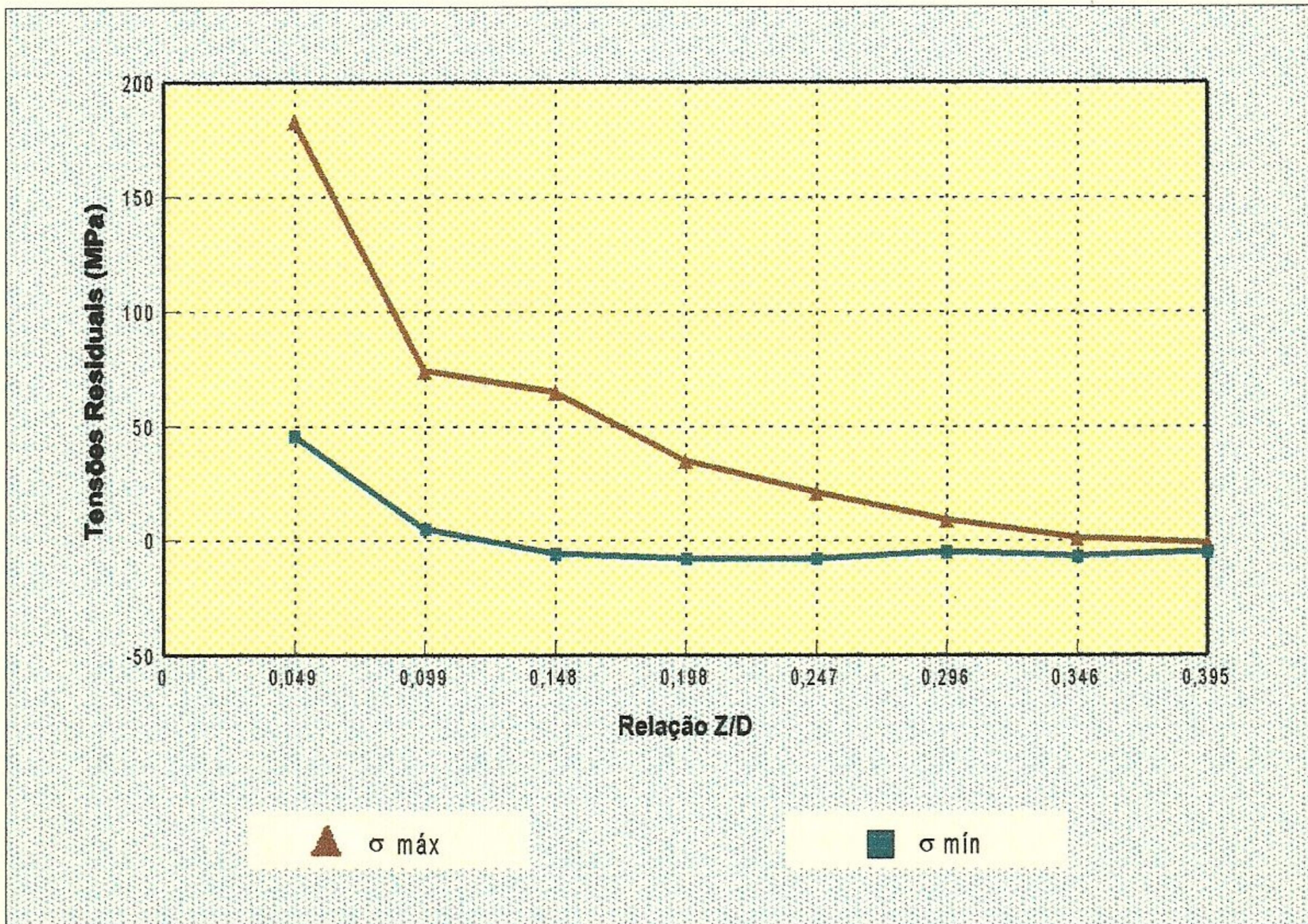


Gráfico 27 - Valores de tensões residuais para o ponto 14 do perfil 01.

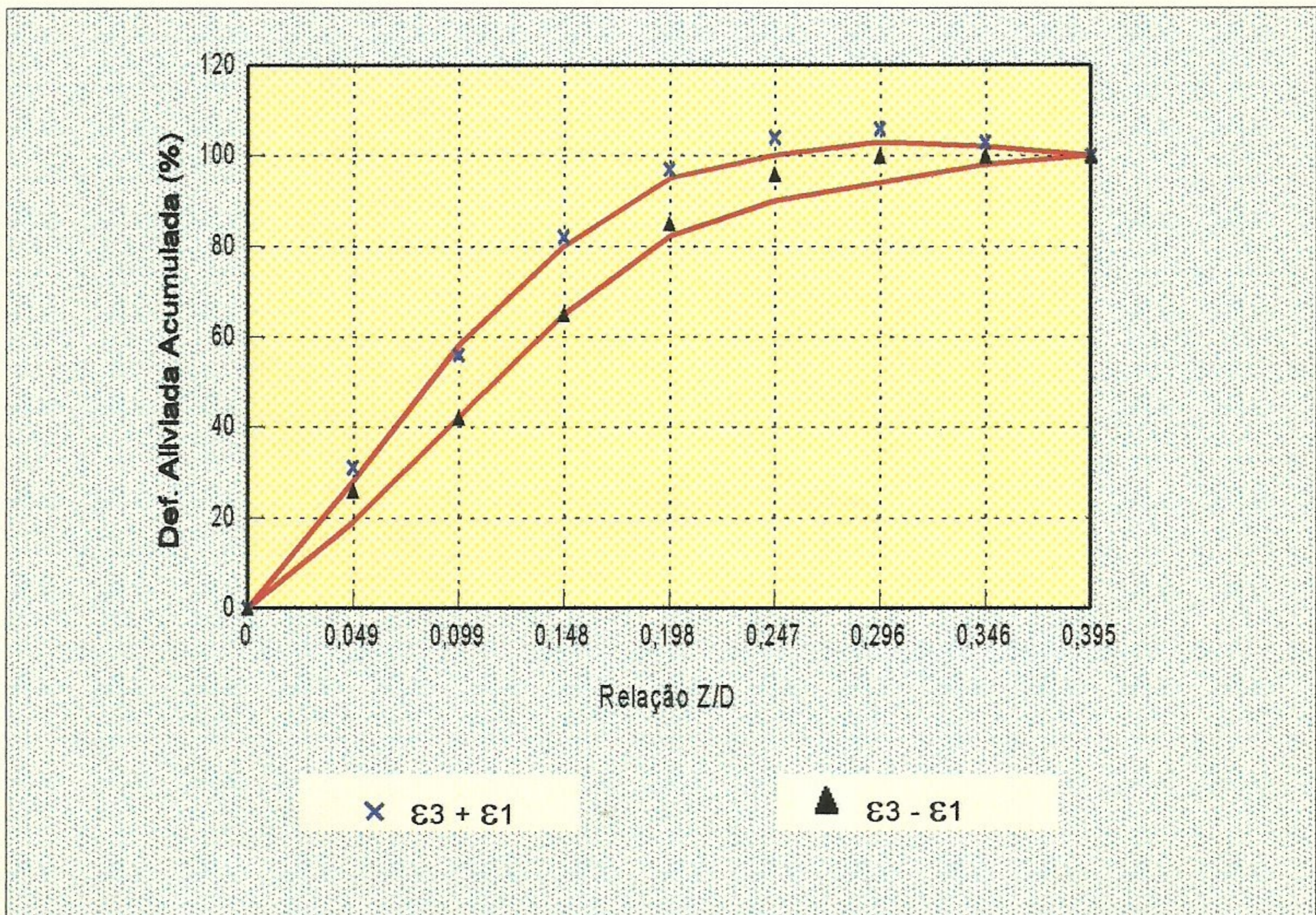


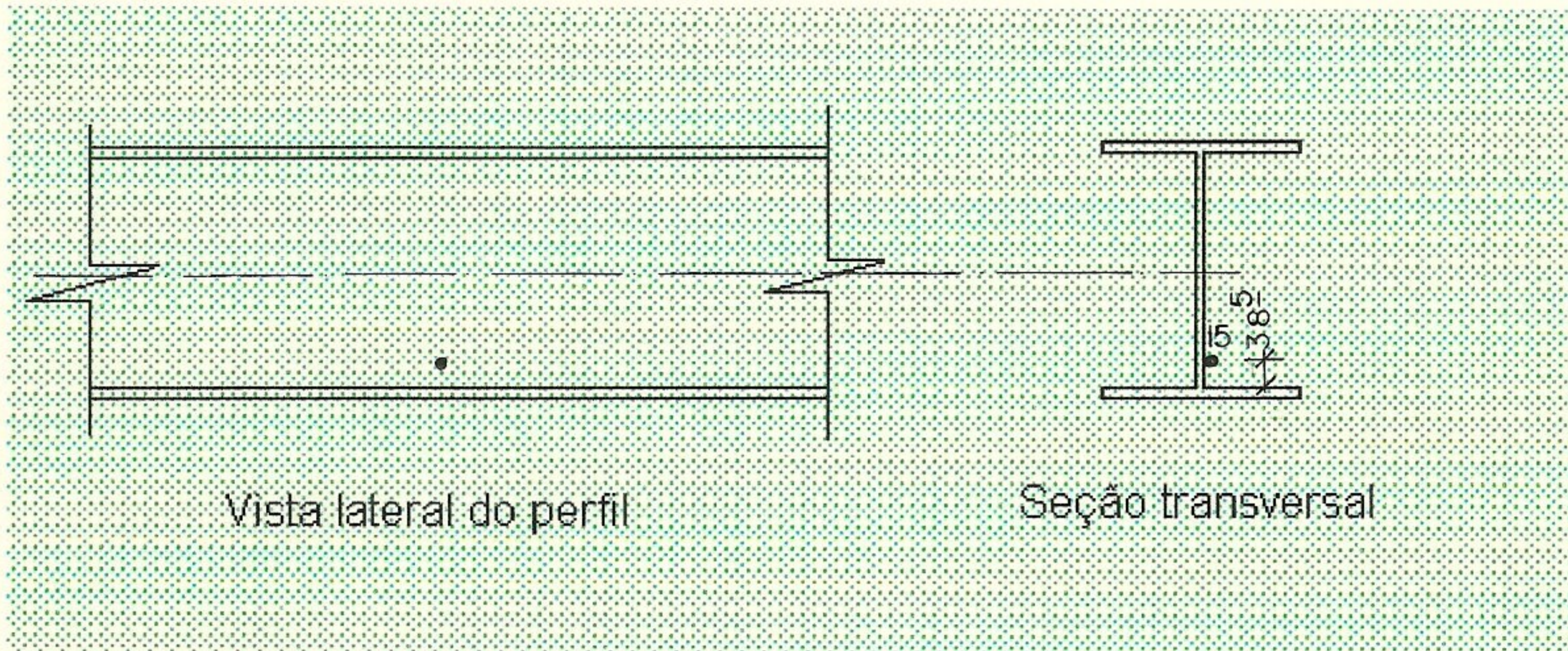
Gráfico 28 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 14 do perfil 01.

Tabela 29 - Dados experimentais obtidos para o perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 15

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-479	-378	1212	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-460	-366	1220	
20	0,508	-444	-357	1216	Tensão de alimentação da roseta: 2,0070 V
30	0,762	-416	-346	1209	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	-395	-336	1203	
50	1,270	-376	-328	1194	Diâmetro do furo (D_0): 38 divisões
60	1,524	-362	-326	1186	
70	1,778	-349	-322	1178	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	-337	320	1170	
90	2,286	-329	-319	1163	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	-322	-318	1158	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 30 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	19	12	8	27	-11	3	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	-8	66	106
0,508	0,099	16	9	-4	12	-20	-6	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	8	-3	36
0,762	0,148	28	11	-7	21	-25	-1	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	1	-1	41
1,016	0,198	21	10	-6	15	-27	-5	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	5	-1	25
1,270	0,247	19	8	-9	10	-28	-6	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	6	-4	19
1,524	0,296	14	2	-8	6	-22	2	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	-3	-4	13
1,778	0,346	13	4	-8	5	-21	-3	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	4	-4	11
2,032	0,395	12	2	-8	4	-20	0	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	0	-4	10
2,286	0,445	8	1	-7	1	-15	-1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	2	-5	6
2,540	0,494	7	1	-5	2	-12	0	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	0	-3	6

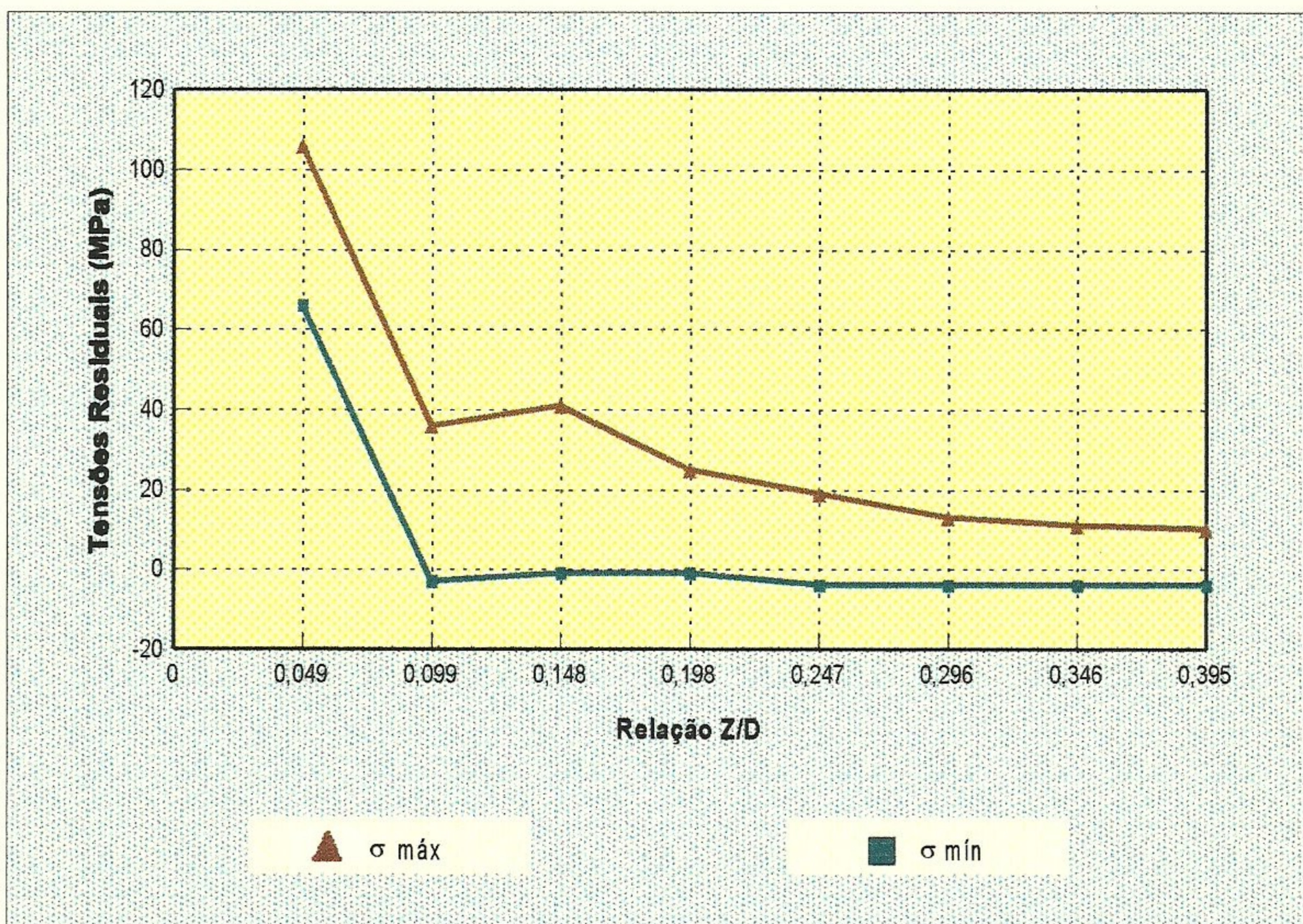


Gráfico 29 - Valores de tensões residuais para o ponto 15 do perfil 01.

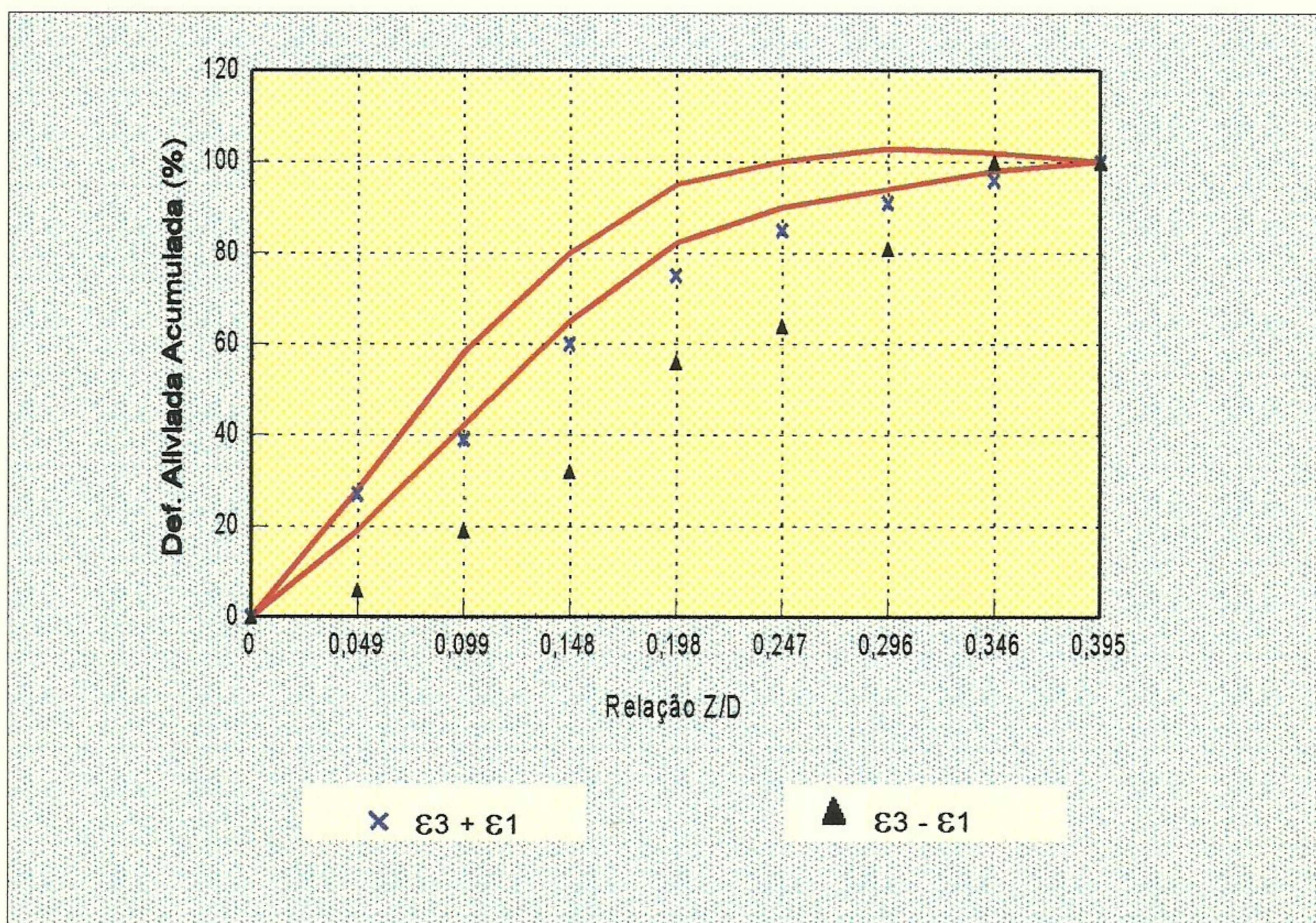


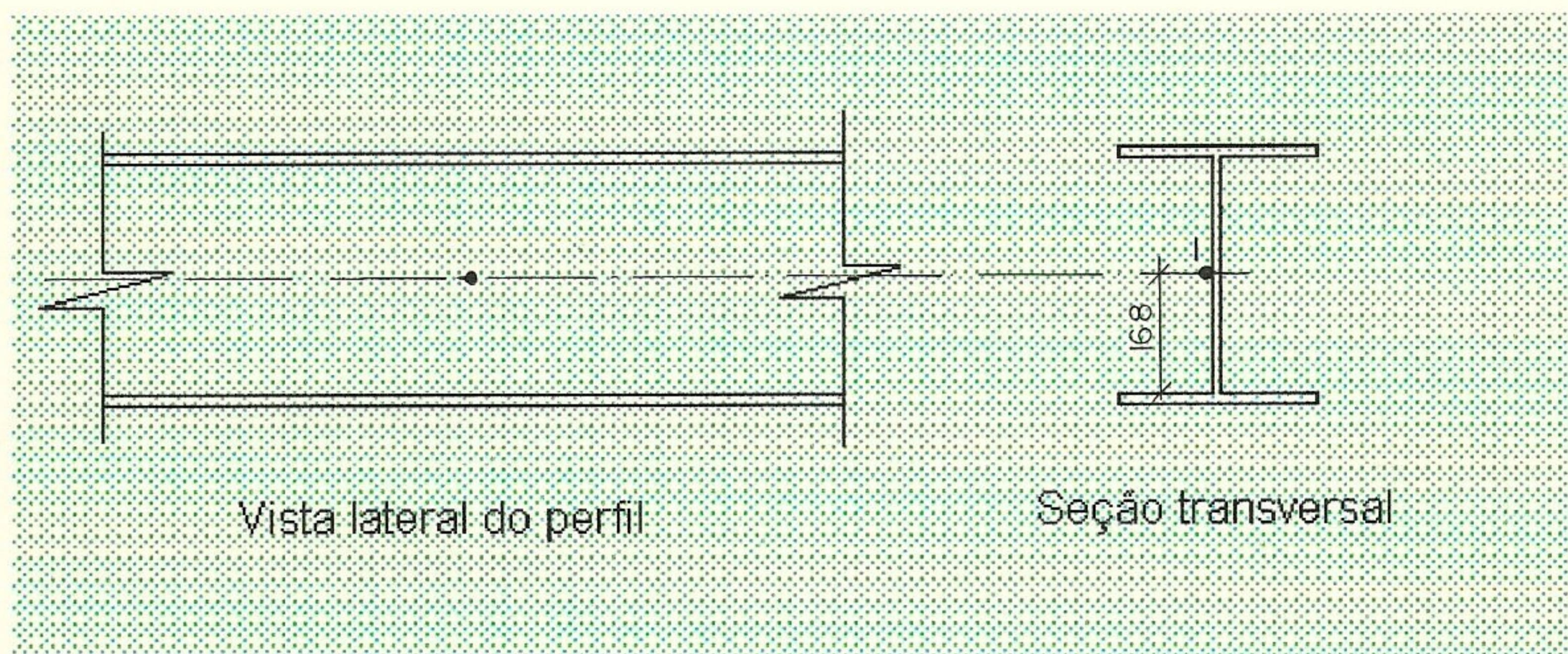
Gráfico 30 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 15 do perfil 01.

Tabela 31 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 01

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-821	116	230	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-789	140	238	
20	0,508	-763	159	233	Tensão de alimentação da roseta: 2,0021 V
30	0,762	-747	173	227	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	-737	181	222	
50	1,270	-730	180	220	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
60	1,524	-727	188	216	
70	1,778	-727	188	213	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	-725	188	212	
90	2,286	-729	188	210	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	-730	188	209	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 32 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	32	24	8	40	-24	-8	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	9	82	172
0,508	0,099	26	19	-5	21	-31	-17	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	14	-4	61
0,762	0,148	16	14	-6	10	-22	-18	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	20	-8	27
1,016	0,198	10	8	-5	5	-15	-11	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	18	-5	13
1,270	0,247	7	-1	-2	5	-9	7	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	-19	-1	8
1,524	0,296	3	8	-4	-1	-7	-17	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	34	-8	6
1,778	0,346	0	0	-3	-3	-3	-3	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	23	-4	-1
2,032	0,395	2	0	-1	1	-3	1	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	-9	0	2
2,286	0,445	-4	0	-2	-6	2	-6	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-36	-6	-2
2,540	0,494	-1	0	-1	-2	0	-2	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	23	-2	-1

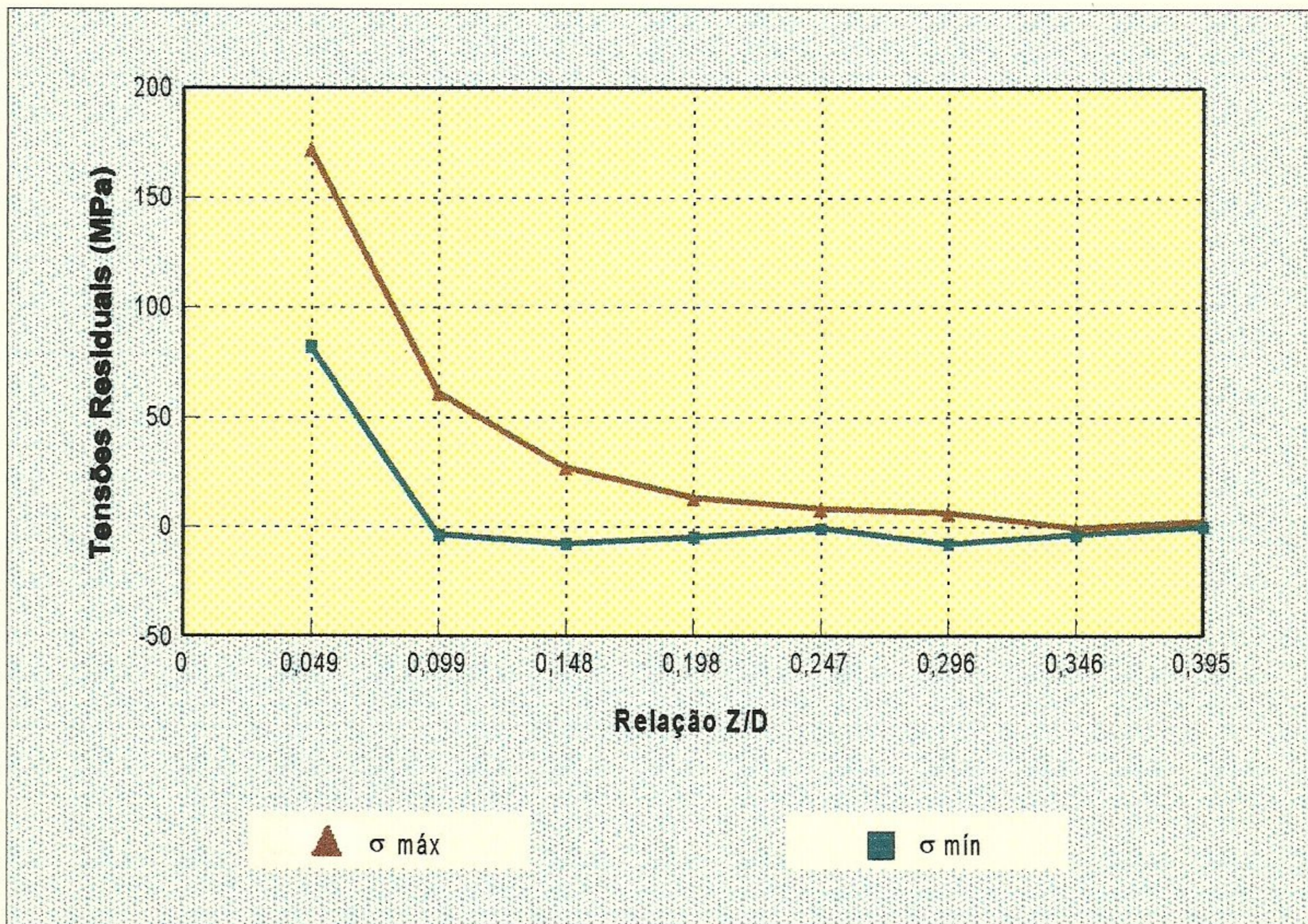


Gráfico 31 - Valores de tensões residuais para o ponto 01 do perfil 02.

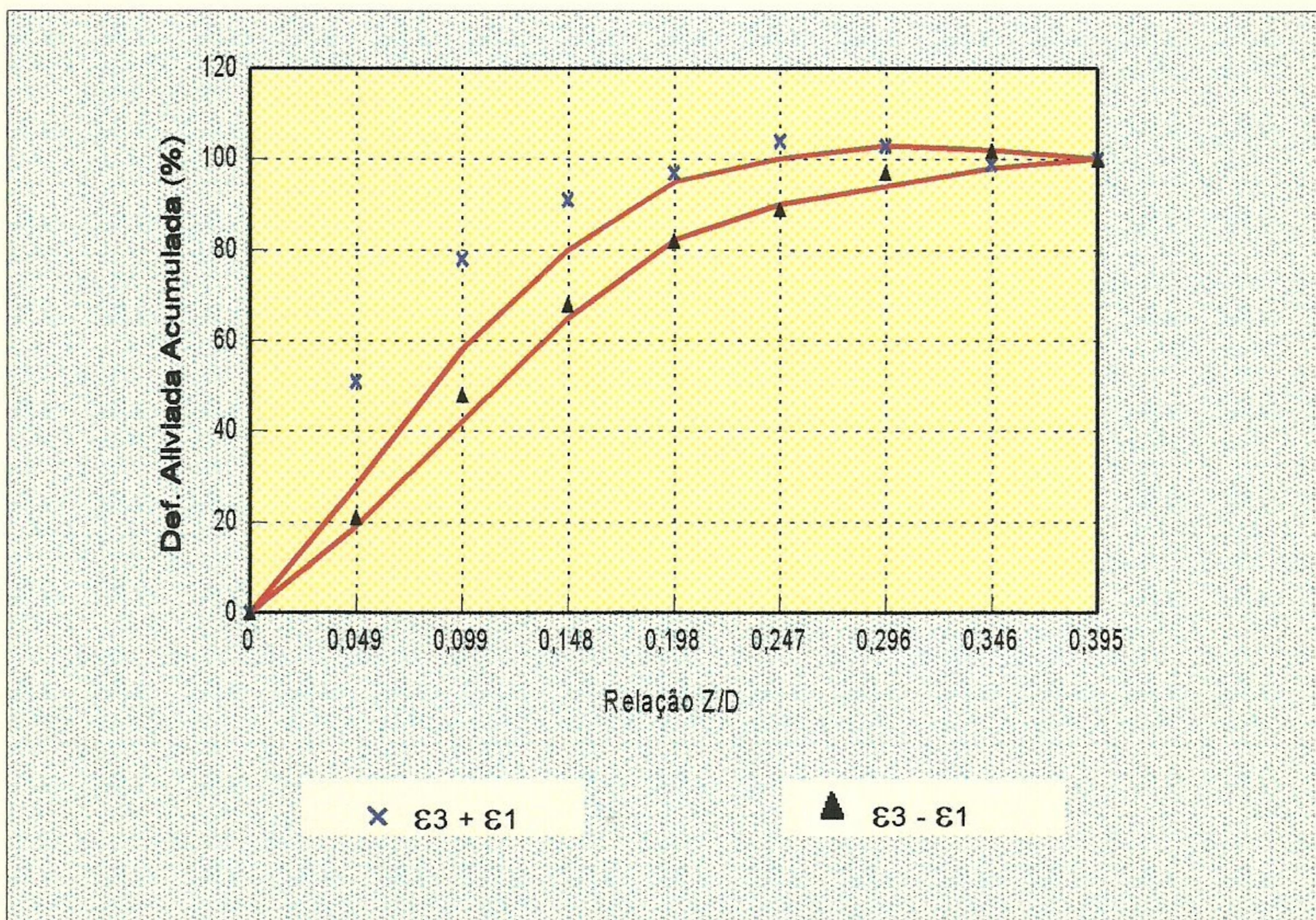


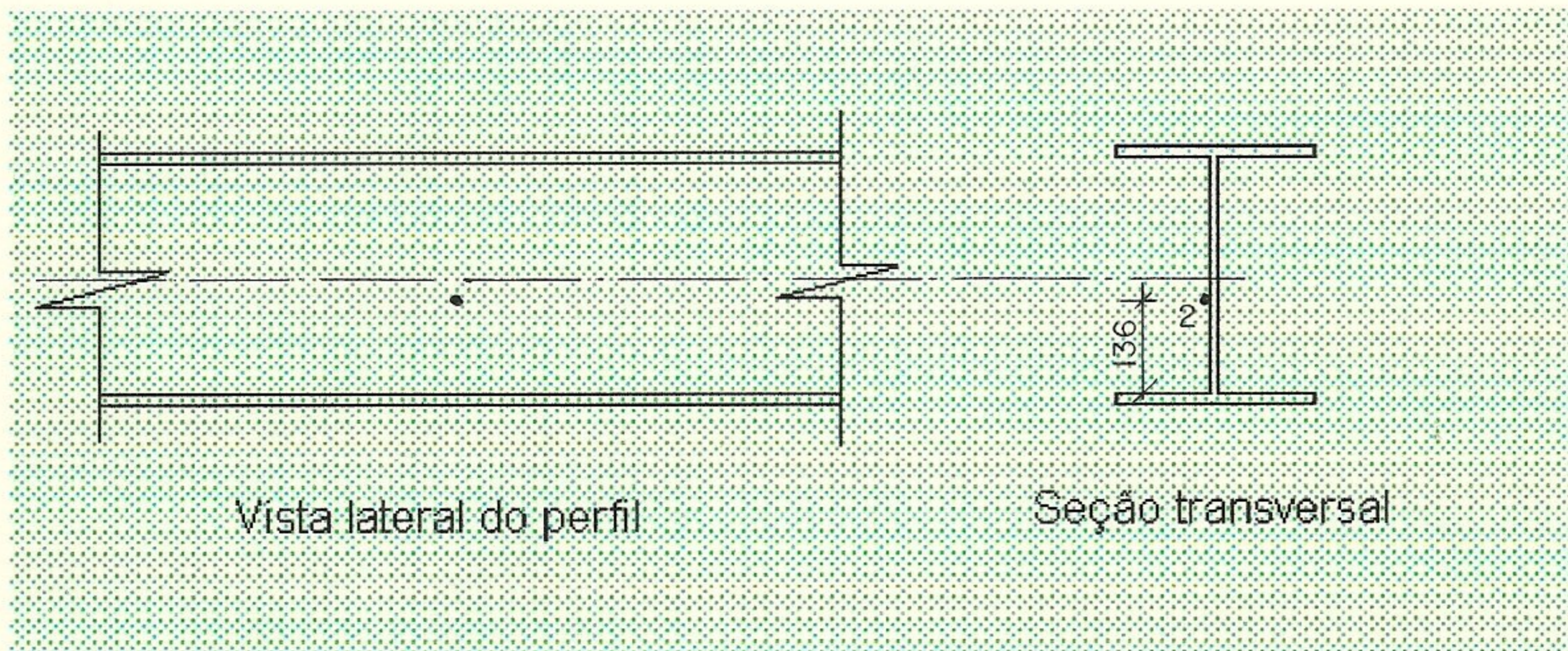
Gráfico 32 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 01 do perfil 02.

Tabela 33 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 02

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-152	506	666	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_K : 2,02
10	0,254	-113	529	670	
20	0,508	-84	545	6666	Tensão de alimentação da roseta: 2,0023 V
30	0,762	-64	558	660	
40	1,016	-53	567	655	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	-47	573	650	
60	1,524	-43	575	643	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
70	1,778	-43	575	642	
80	2,032	-43	576	638	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	-43	575	637	
100	2,540	-43	575	636	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 34 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente				Tensão (MPa)		
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	39	23	4	43	-35	-3	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	2	75	199
0,508	0,099	29	16	-4	25	-33	-7	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	6	3	65
0,762	0,148	20	13	-6	14	-26	-12	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	12	-4	30
1,016	0,198	11	9	-5	6	-16	-12	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	18	-5	14
1,270	0,247	6	6	-5	1	-11	-11	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	23	-6	7
1,524	0,296	4	2	-7	-3	-11	-7	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	16	-7	3
1,778	0,346	0	0	-1	-1	-1	-1	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	23	-1	0
2,032	0,395	0	1	-4	-4	-4	-6	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	28	-5	0
2,286	0,445	0	-1	-1	-1	-1	1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-23	-1	0
2,540	0,494	0	0	-1	-1	-1	-1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	23	-1	0

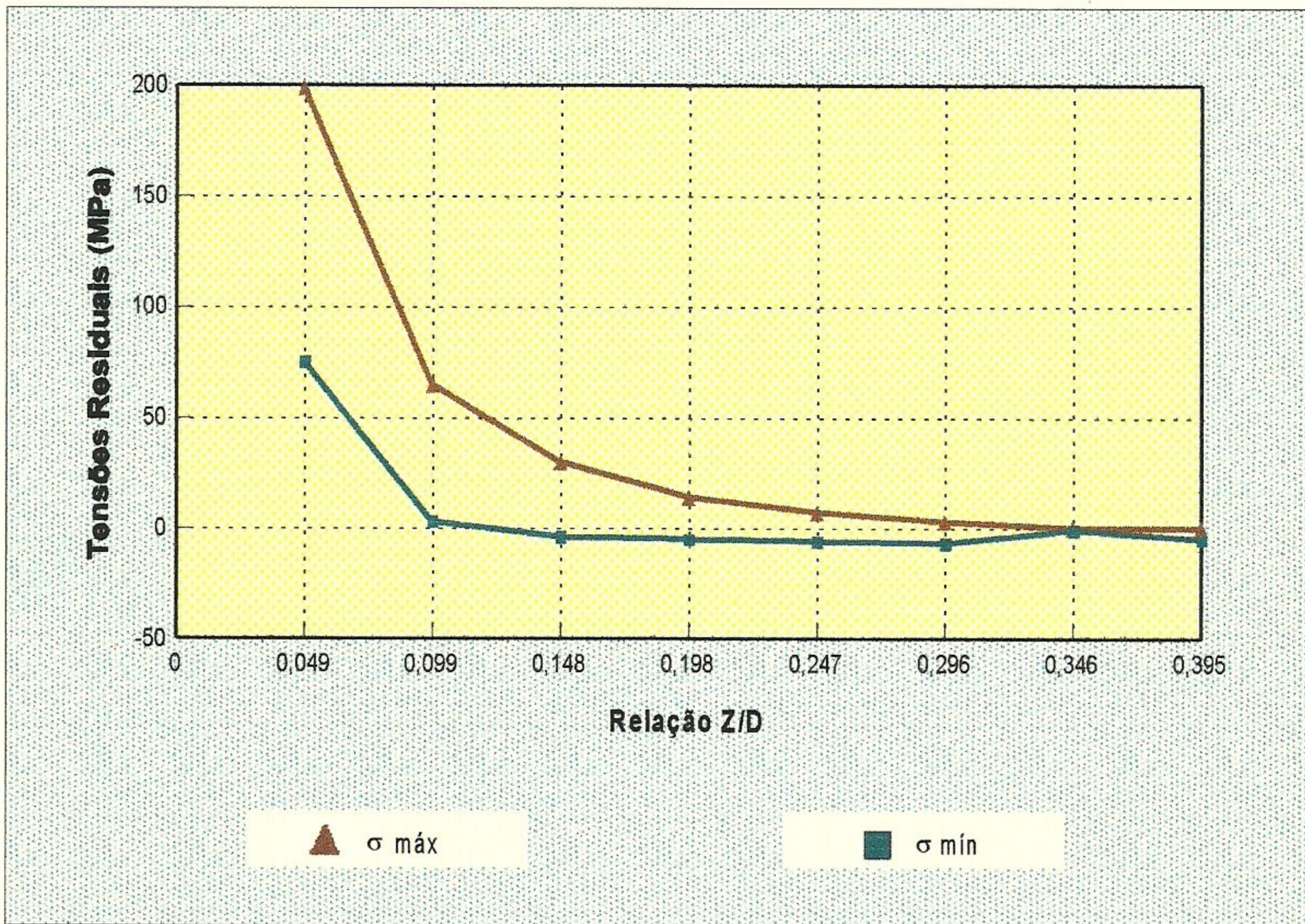


Gráfico 33 - Valores de tensões residuais para o ponto 02 do perfil 02.

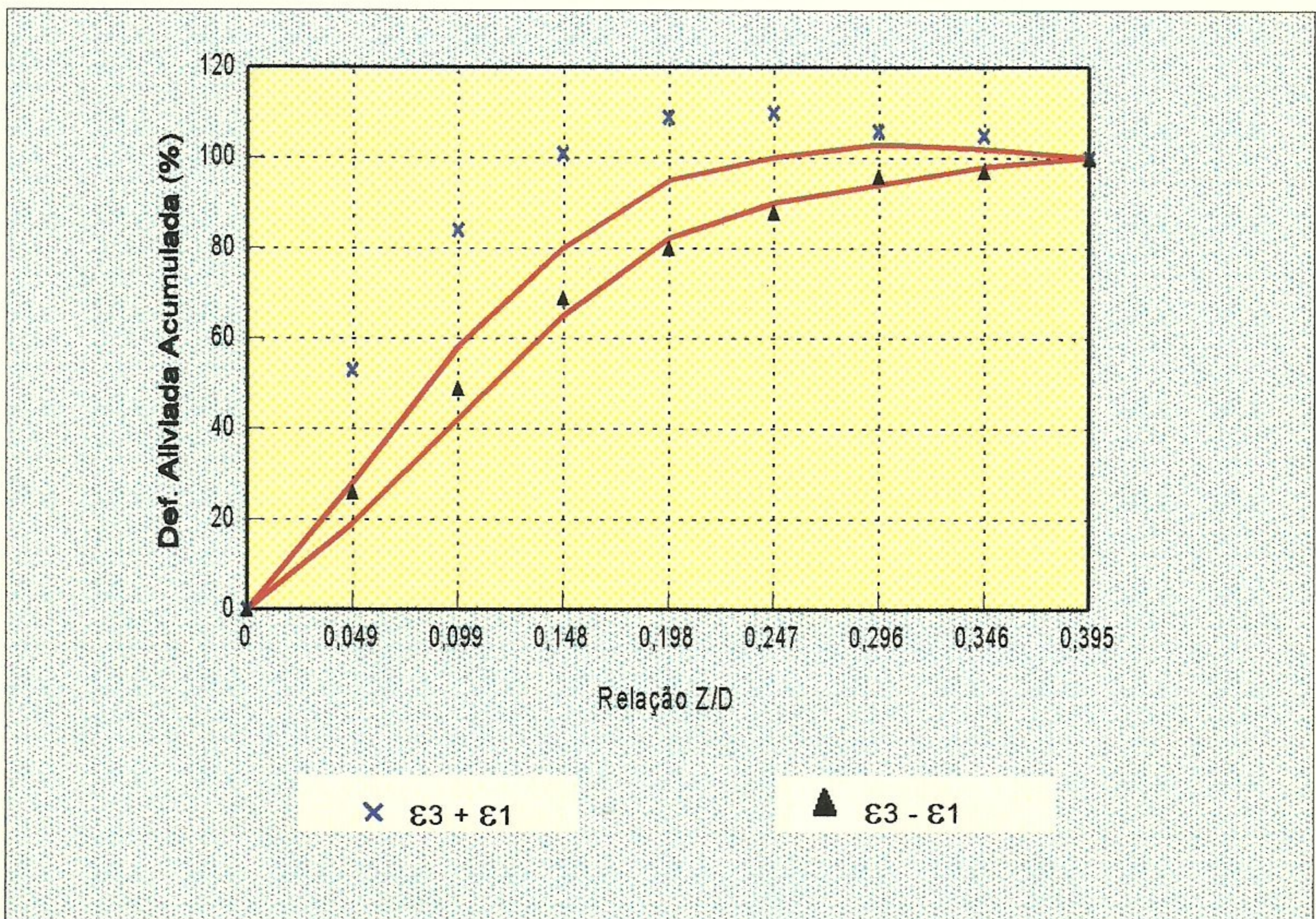


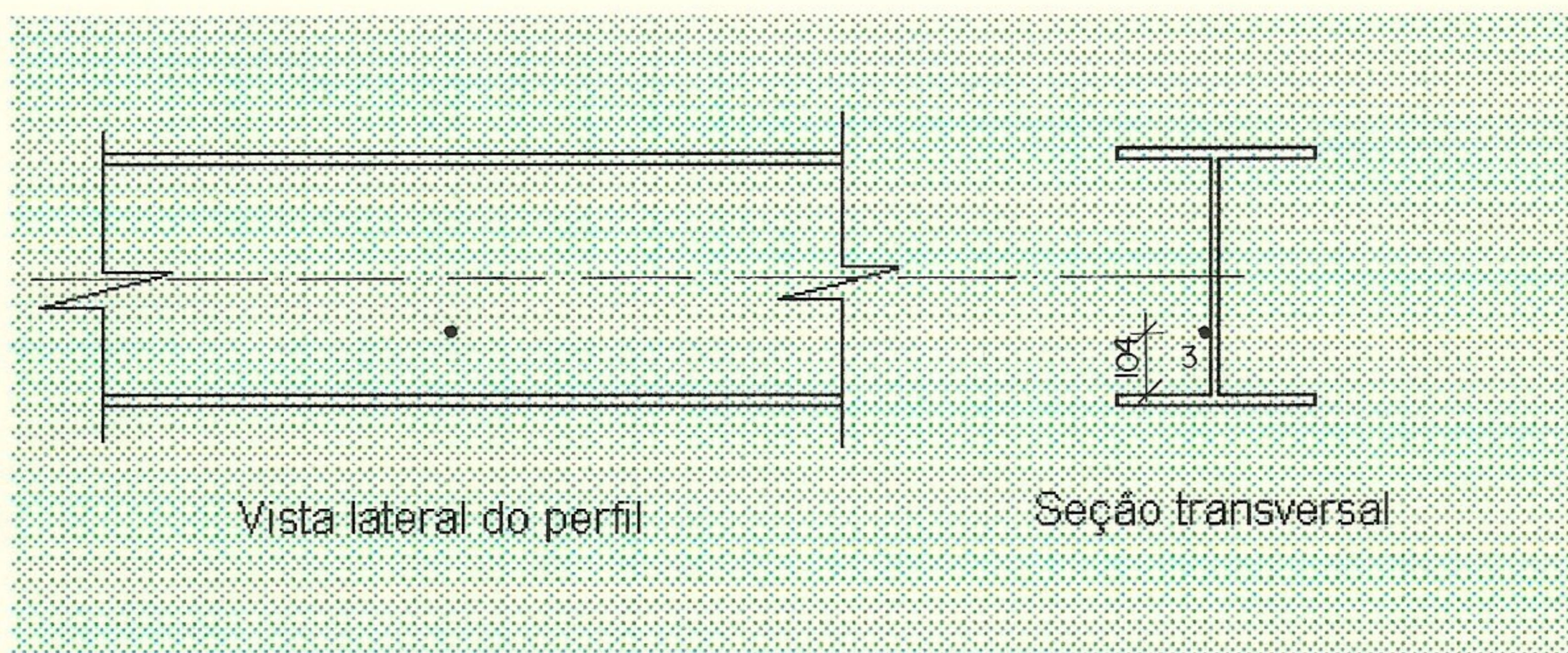
Gráfico 34 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 02 do perfil 02.

Tabela 35 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 03

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	859	307	406	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	898	338	414	
20	0,508	932	368	410	Tensão de alimentação da roseta: 2,0026 v
30	0,762	954	389	406	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	971	399	398	
50	1,270	981	404	393	Diâmetro do furo (D_0): 38 divisões
60	1,524	987	406	387	
70	1,778	990	407	383	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	993	406	381	
90	2,286	991	404	380	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	992	404	379	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 36 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	39	31	8	46	-31	-15	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	13	89	210
0,508	0,099	34	30	-4	30	-38	-30	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	19	-4	86
0,762	0,148	22	21	-4	18	-26	-24	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	21	-4	38
1,016	0,198	17	10	-8	9	-25	-11	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	12	-6	20
1,270	0,247	10	5	-5	5	-15	-5	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	9	-3	10
1,524	0,296	6	2	-6	0	-12	-4	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	9	-5	5
1,778	0,346	3	1	-4	-1	-7	-3	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	12	-3	2
2,032	0,395	3	-1	-2	1	-5	3	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	-16	-1	3
2,286	0,445	-2	-2	-1	-3	1	1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	23	-3	-2
2,540	0,494	1	0	-1	0	-2	0	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	0	-1	1

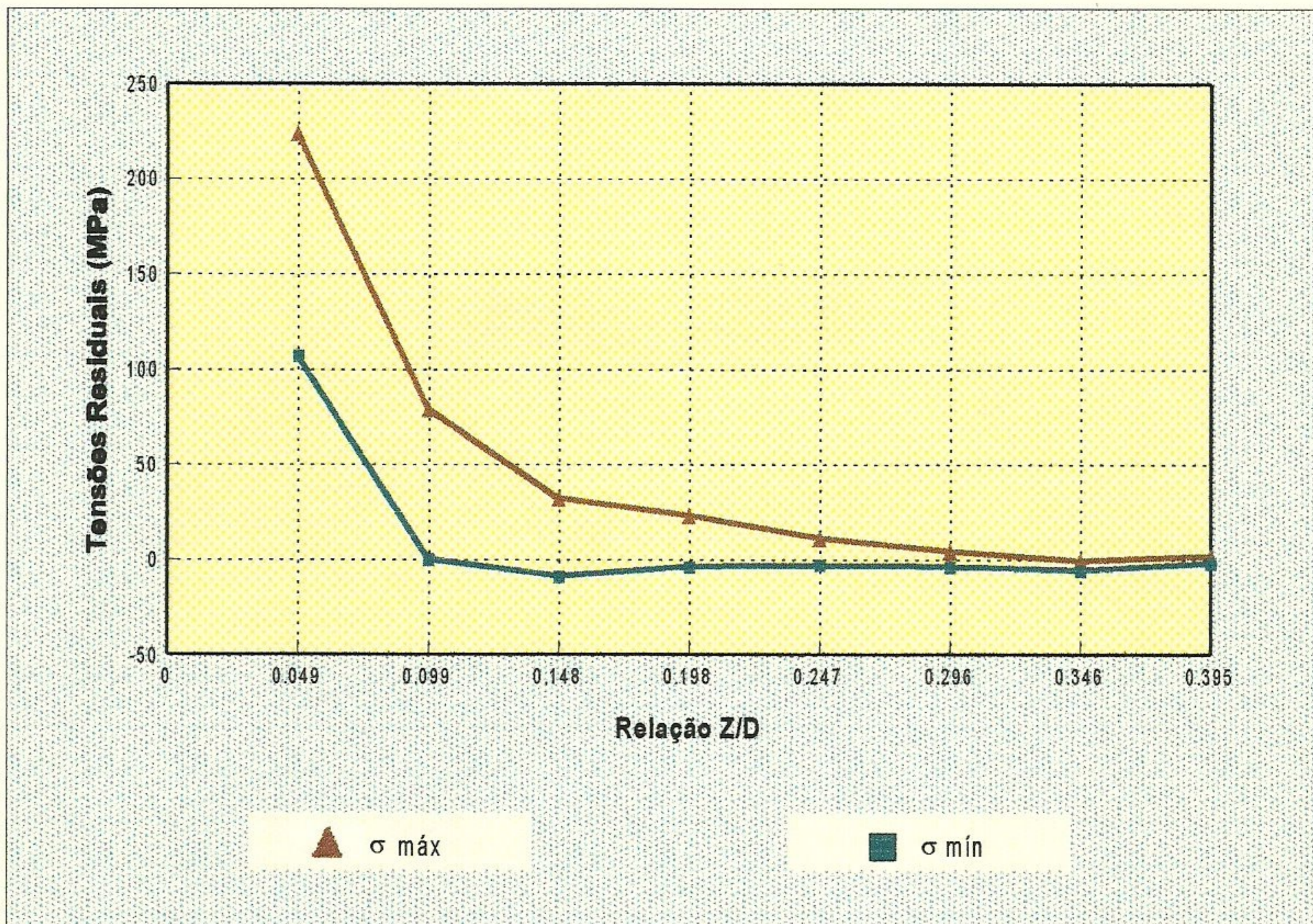


Gráfico 35 - Valores de tensões residuais para o ponto 03 do perfil 02.

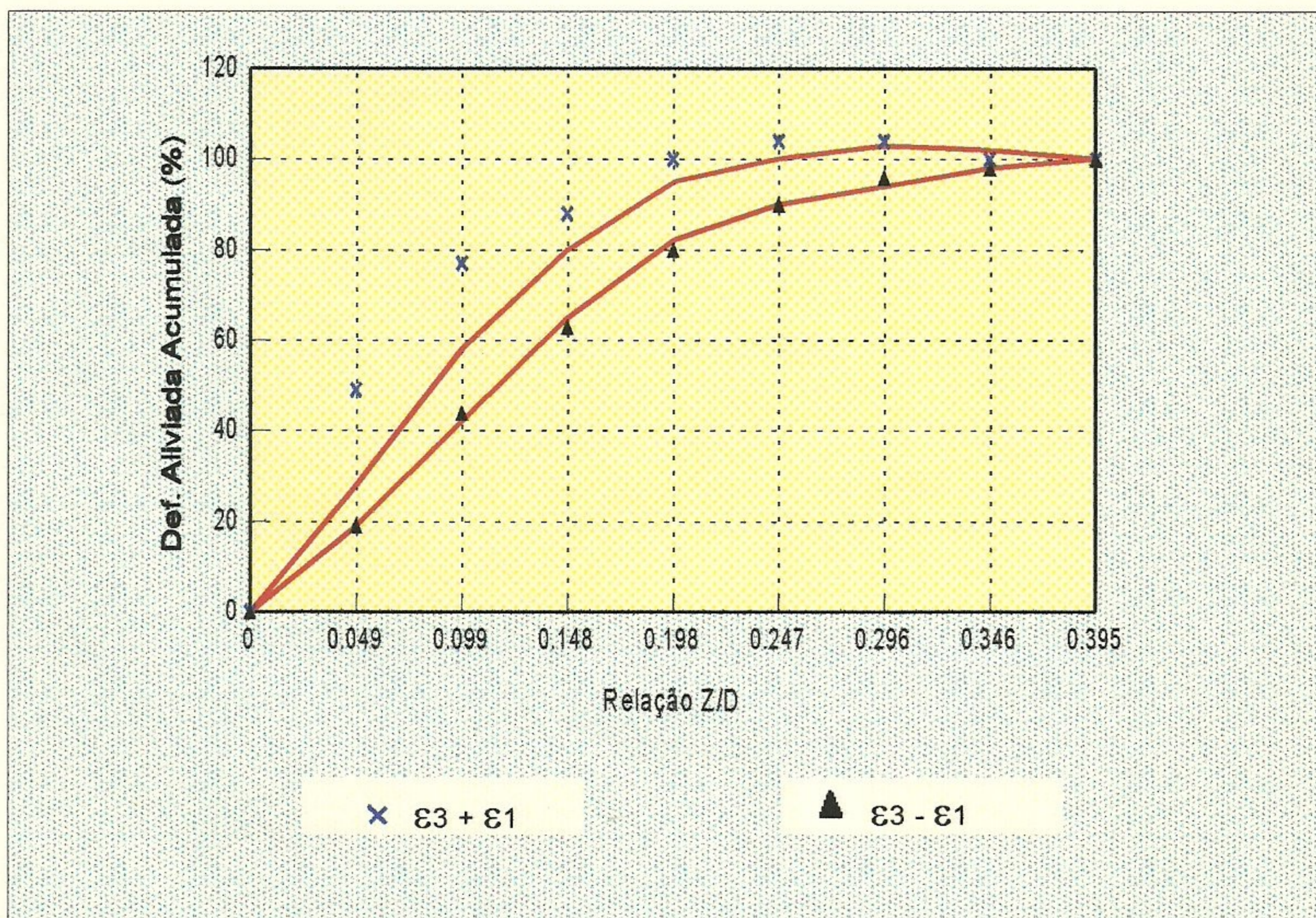


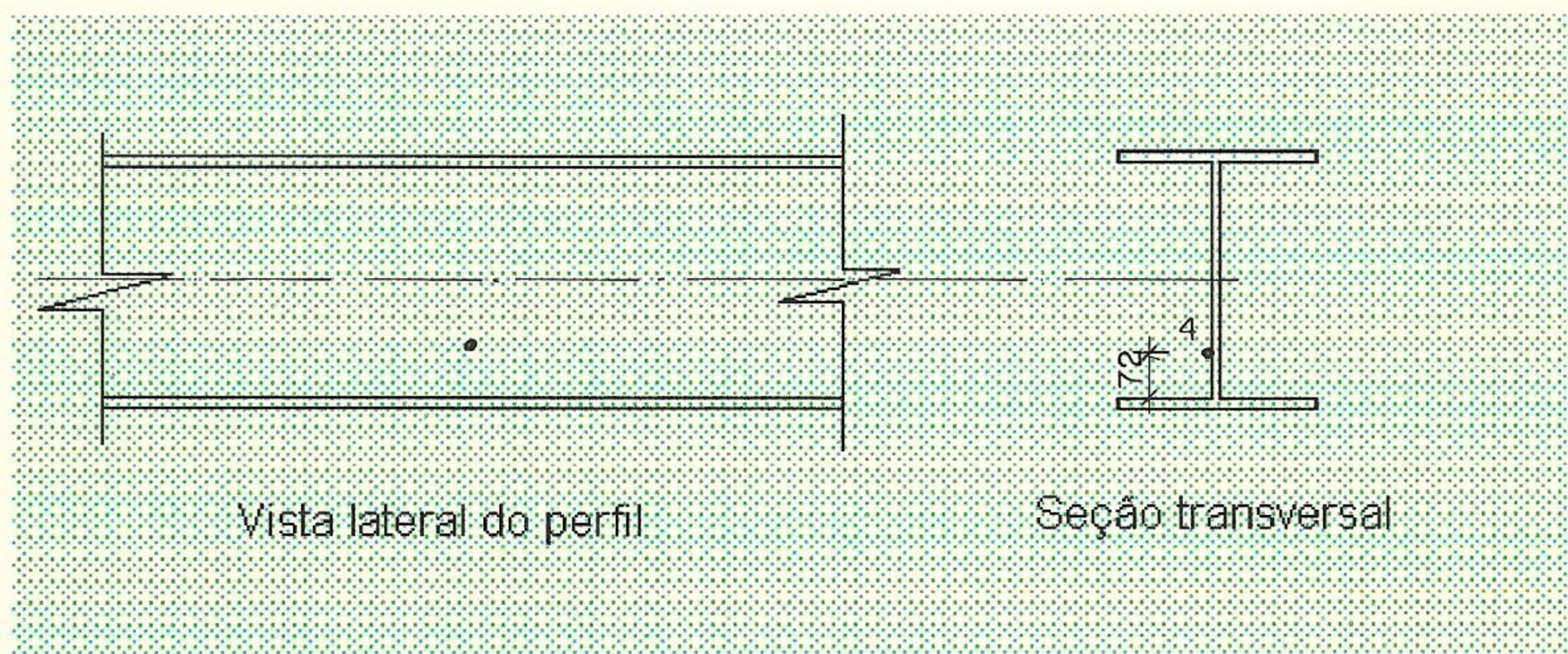
Gráfico 36 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 03 do perfil 02.

Tabela 37 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 04

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-214	1204	52	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-176	1229	58	
20	0,508	-141	1251	53	Tensão de alimentação da roseta: 2,0038 V
30	0,762	-114	1268	43	
40	1,016	-96	1280	32	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	-83	1286	26	
60	1,524	-79	1289	20	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
70	1,778	-72	1290	15	
80	2,032	-59	1296	7	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	-62	1298	1	
100	2,540	-63	1299	0	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 38 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	38	25	6	43	-32	-6	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	5	82	197
0,508	0,099	35	22	-5	30	-40	-14	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	10	2	80
0,762	0,148	27	17	-10	17	-37	-17	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	12	-8	40
1,016	0,198	18	12	-11	7	-29	-17	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	15	-10	21
1,270	0,247	13	6	-6	7	-19	-5	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	7	-3	13
1,524	0,296	4	3	-6	-2	-10	-8	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	19	-6	3
1,778	0,346	7	1	-5	2	-12	0	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	0	-3	6
2,032	0,395	13	6	-8	5	-21	-7	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	9	-5	12
2,286	0,445	-3	2	-6	-9	-3	-13	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	39	-11	-1
2,540	0,494	-1	1	-1	-2	0	-4	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	32	-3	0

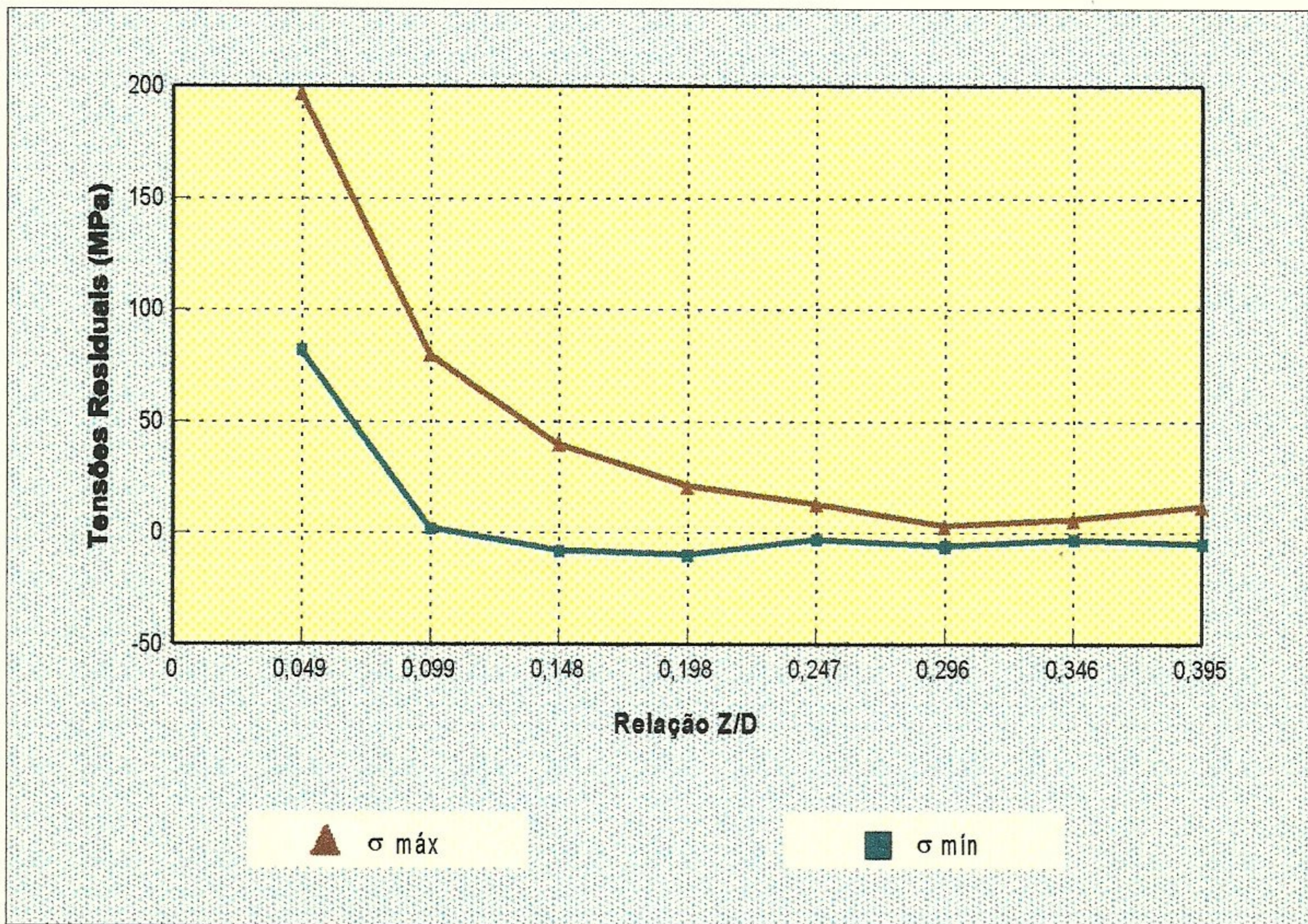


Gráfico 37 - Valores de tensões residuais para o ponto 04 do perfil 02.

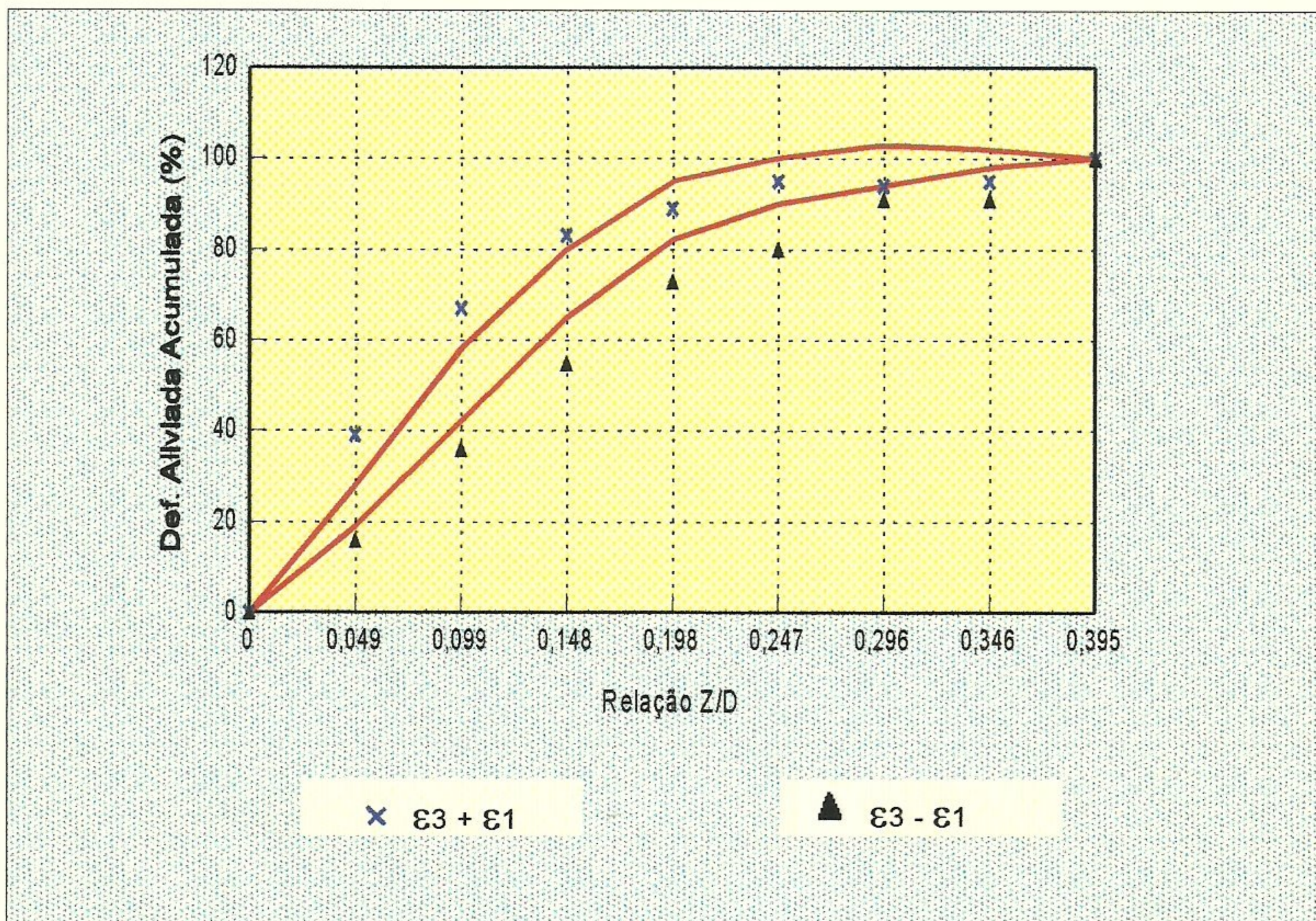


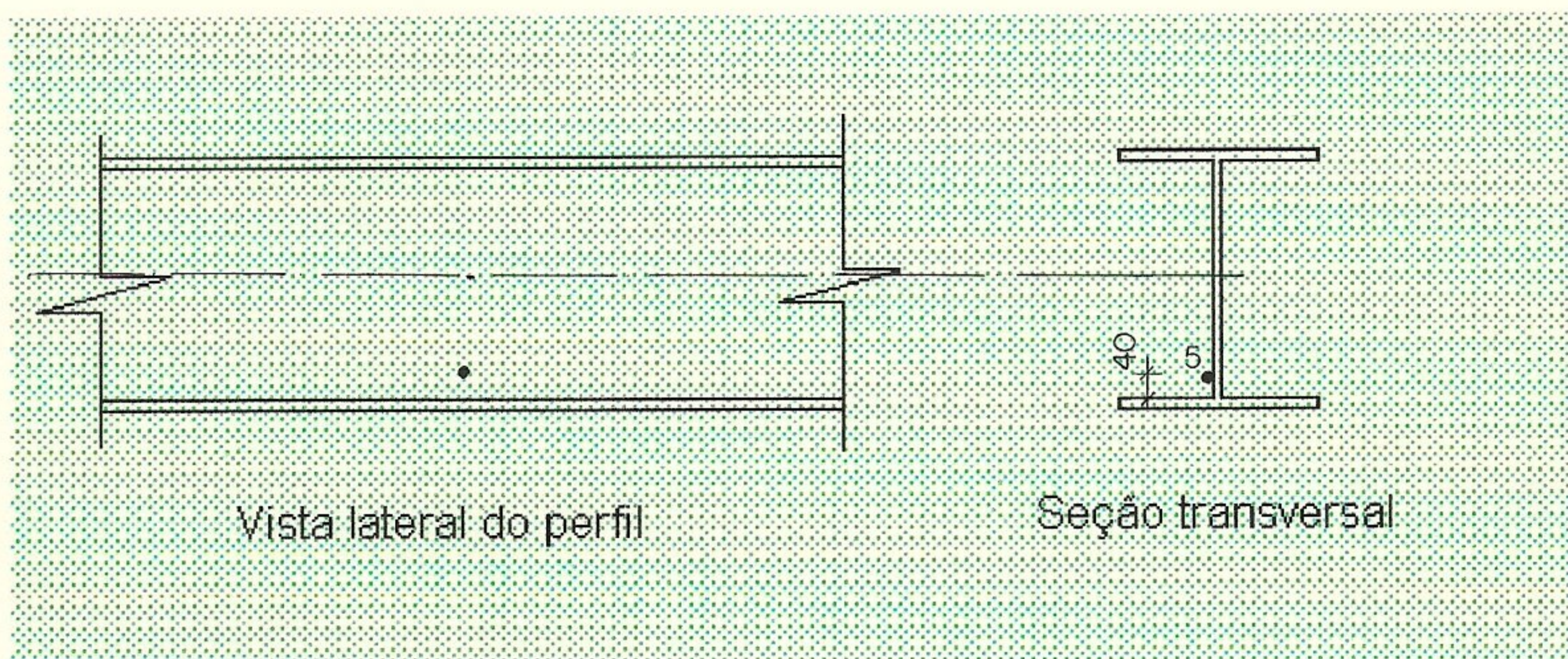
Gráfico 38 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 04 do perfil 02.

Tabela 39 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 05

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	281	-813	603	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	326	-781	612	
20	0,508	367	-753	606	Tensão de alimentação da roseta: 2,0032 V
30	0,762	398	-730	597	
40	1,016	417	-714	592	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	428	-706	584	
60	1,524	435	-702	579	Diâmetro do furo (D_0): 38 divisões
70	1,778	440	-700	574	
80	2,032	441	-701	571	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	440	-701	569	
100	2,540	438	-702	569	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 40 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente				Tensão (MPa)		
Z(m)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	44	32	9	53	-36	-10	0,025	0,058	7,77671E-08	1,39886E-07	7	106	238
0,508	0,099	41	28	-6	35	-46	-21	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	12	0	95
0,762	0,148	31	23	-9	22	-40	-24	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	16	-7	49
1,016	0,198	19	16	-5	14	-24	-18	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	18	-3	25
1,270	0,247	11	8	-8	3	-19	-13	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	17	-7	12
1,524	0,296	7	4	-5	2	-12	-6	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	13	-4	7
1,778	0,346	5	2	-5	0	-10	-4	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	11	-4	4
2,032	0,395	1	-1	-3	-2	-4	0	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	0	-3	0
2,286	0,445	-1	0	-2	-3	-1	-3	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	36	-3	-1
2,540	0,494	-2	-1	0	-2	2	0	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	0	-2	-1

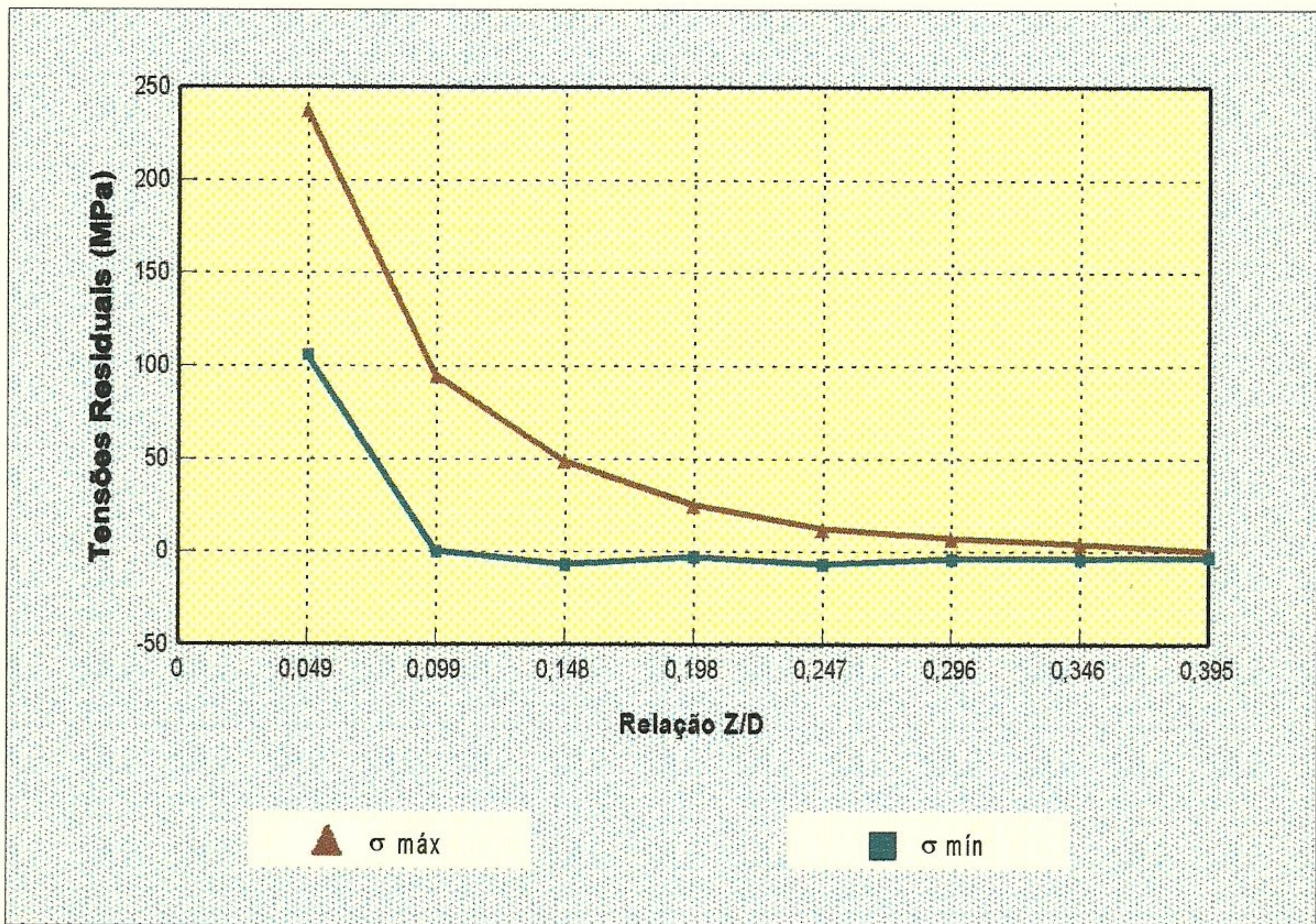


Gráfico 39 - Valores de tensões residuais para o ponto 05 do perfil 02.

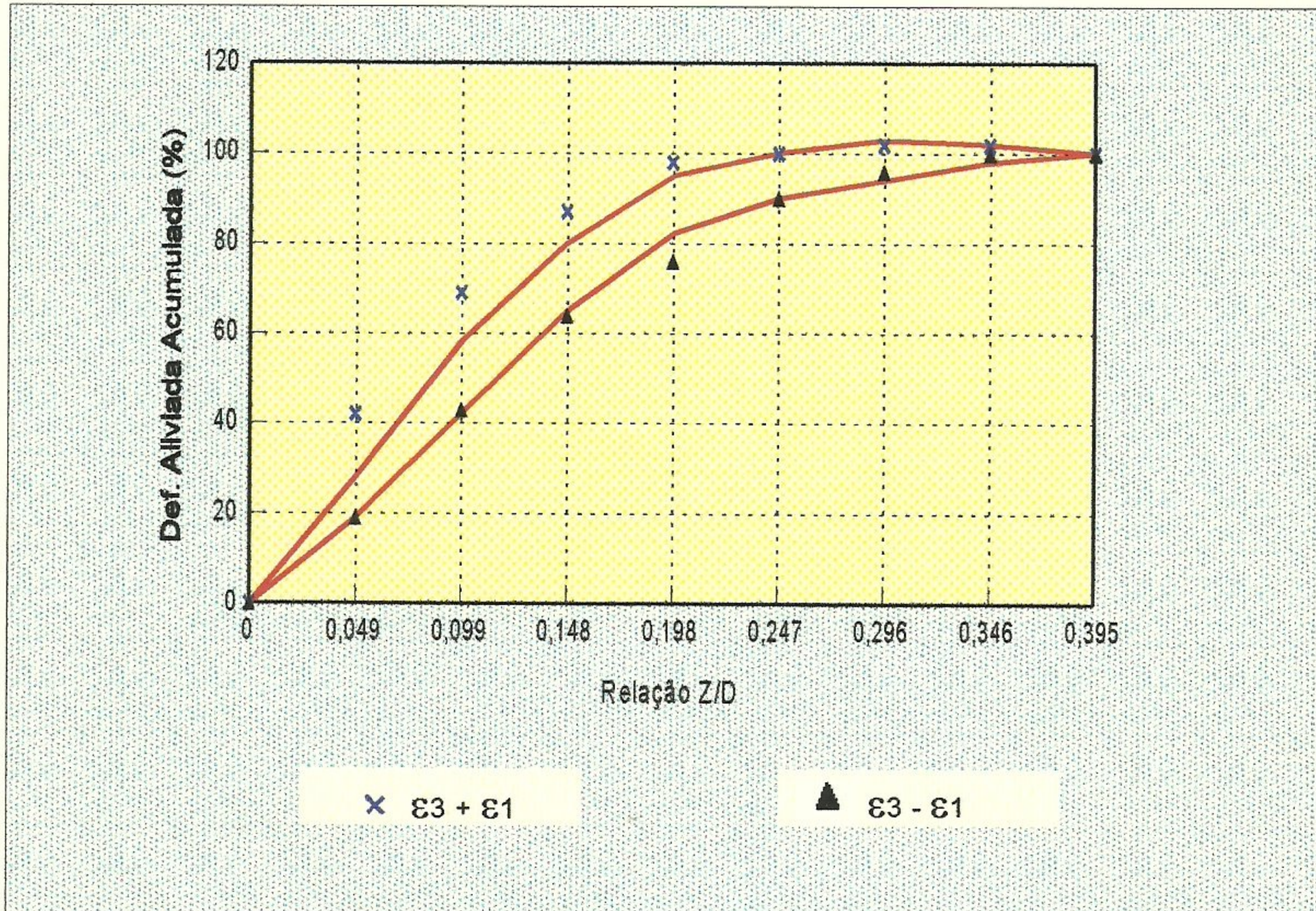


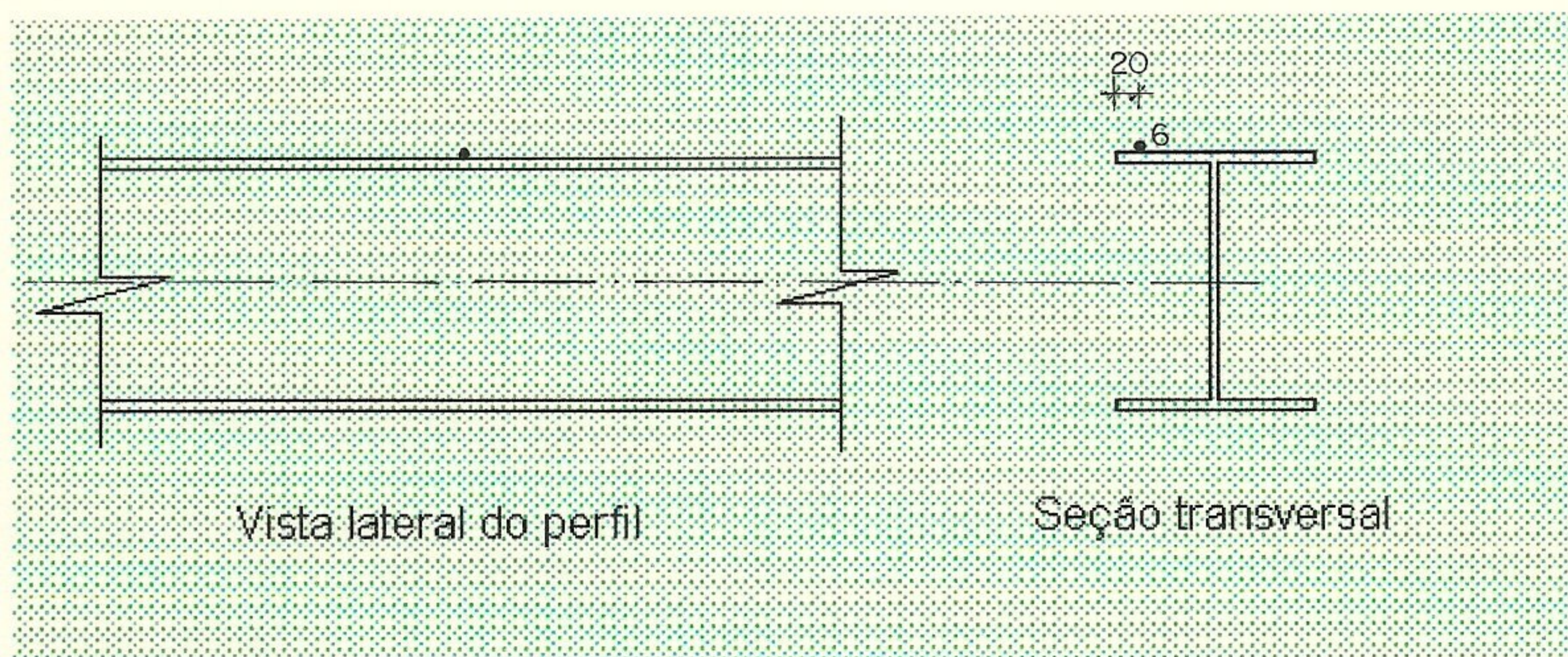
Gráfico 40 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 05 do perfil 02.

Tabela 41 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 06

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-334	-396	-312	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-350	-396	-267	
20	0,508	-371	-403	-338	Tensão de alimentação da roseta: 2,0027 v
30	0,762	-411	-412	-350	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	-443	-420	-363	
50	1,270	-467	-425	-366	Diâmetro do furo (D_0): 39 divisões
60	1,524	-479	-428	-316	
70	1,778	-487	-429	-312	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	-494	-429	-286	
90	2,286	-495	-427	-283	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	-495	-426	-327	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 42 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	-16	0	44	29	60	29	0,027	0,059	8,39884E-08	1,42272E-07	13	-32	203
0,508	0,099	-21	-7	-70	-91	-49	-77	0,06	0,12	1,86641E-07	2,89366E-07	29	-201	-43
0,762	0,148	-40	-9	-12	-51	28	-34	0,089	0,181	2,76851E-07	4,3646E-07	-25	-71	-21
1,016	0,198	-32	-8	-13	-44	19	-29	0,105	0,231	3,26622E-07	5,57029E-07	-28	-49	-19
1,270	0,247	-24	-5	-3	-27	21	-17	0,113	0,262	3,51507E-07	6,31782E-07	-20	-30	-8
1,524	0,296	-12	-3	49	38	61	44	0,115	0,295	3,57728E-07	7,11358E-07	18	0	53
1,778	0,346	-8	-1	4	-4	12	-2	0,118	0,3	3,67061E-07	7,23415E-07	-5	-7	1
2,032	0,395	-7	0	26	19	33	19	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	15	0	25
2,286	0,445	-1	2	3	2	4	-2	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	-13	0	25
2,540	0,494	0	1	-44	-44	-44	-45	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	23	-50	-8

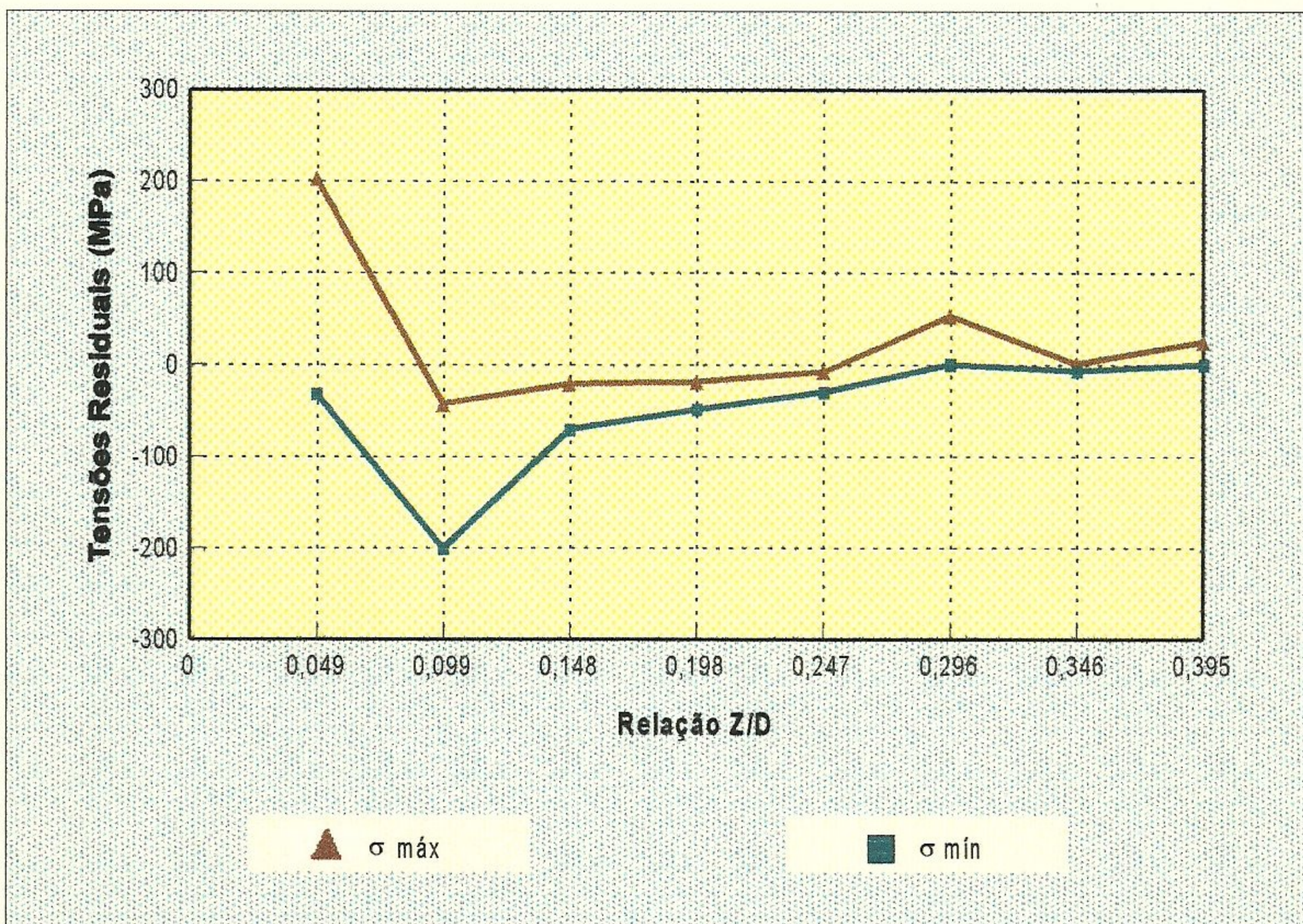


Gráfico 41 - Valores de tensões residuais para o ponto 06 do perfil 02.

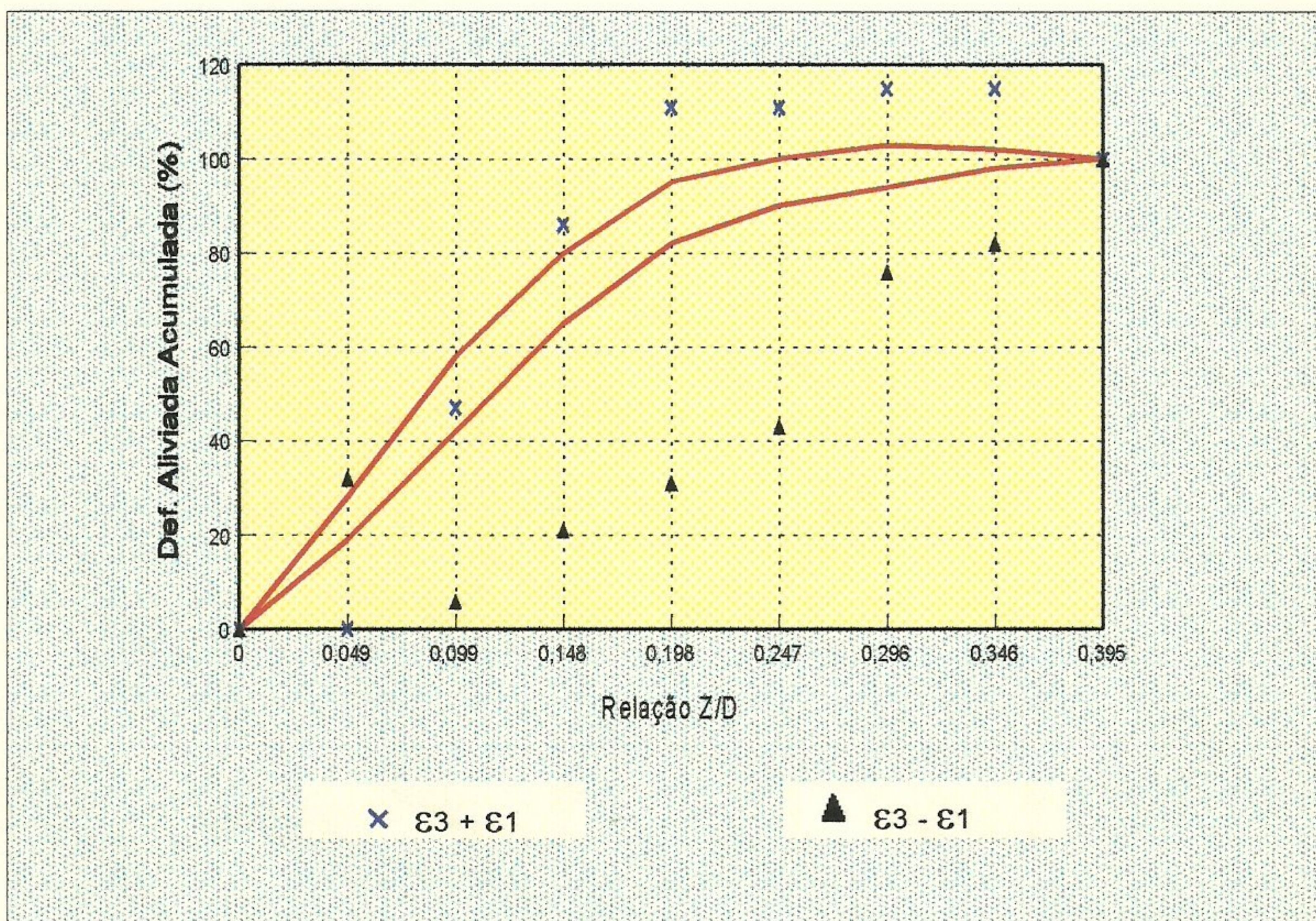


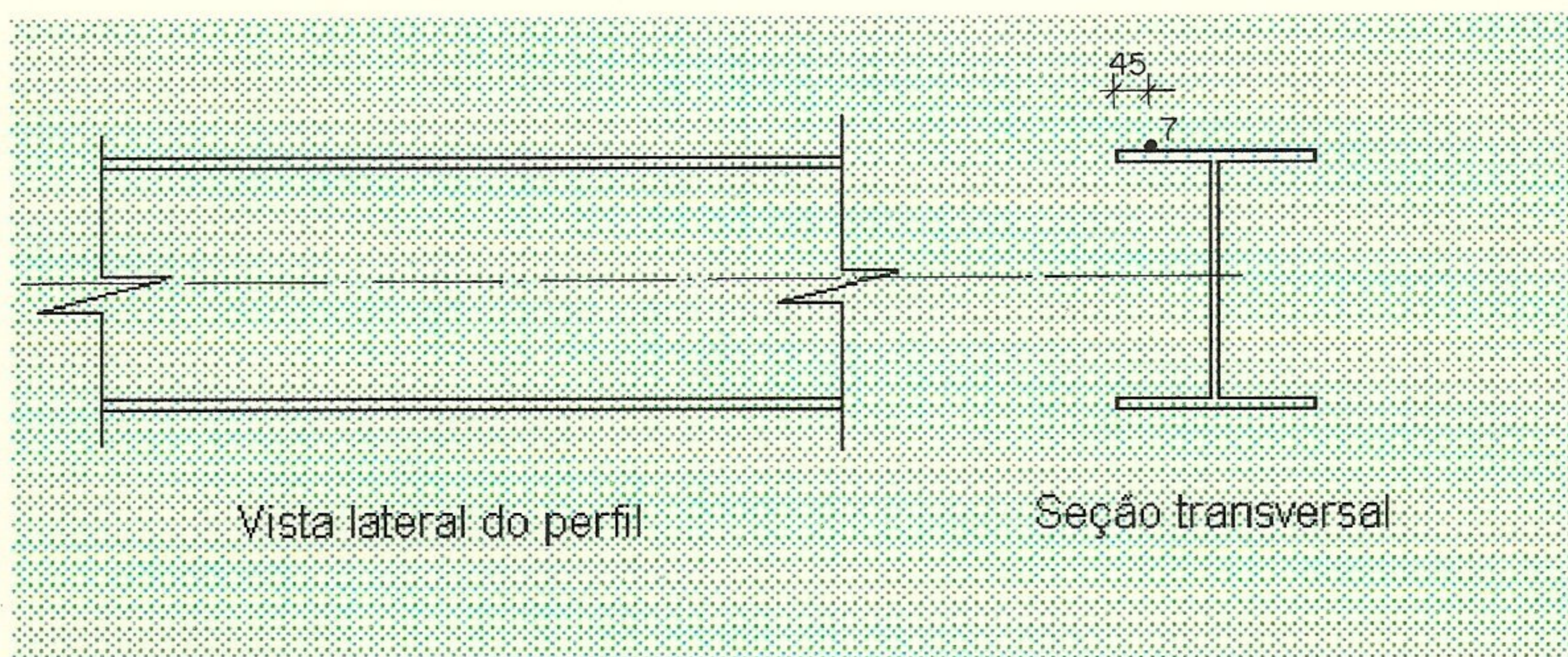
Gráfico 42 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 06 do perfil 02.

Tabela 43 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 07

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	421	781	-201	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_K : 2,02
10	0,254	468	803	-194	
20	0,508	511	820	-232	Tensão de alimentação da roseta: 2,000 V
30	0,762	545	826	-241	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	576	832	-255	
50	1,270	592	834	-260	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
60	1,524	602	835	-267	
70	1,778	608	835	-225	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	608	835	-224	
90	2,286	606	831	-231	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	604	831	-233	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 44 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente				Tensão (MPa)		
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	47	22	7	53	-40	10	0,025	0,058	7,77671E-08	1,39866E-07	-7	99	245
0,508	0,099	43	17	-38	5	-80	-29	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	10	-73	86
0,762	0,148	34	6	-9	25	-43	13	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	-8	-3	51
1,016	0,198	31	6	-14	17	-45	5	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	-3	-8	35
1,270	0,247	16	2	-5	11	-21	7	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	-9	-1	17
1,524	0,296	10	1	-7	3	-17	1	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	-2	-4	9
1,778	0,346	6	0	42	48	36	48	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	27	12	56
2,032	0,395	0	0	1	1	1	1	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	23	0	1
2,286	0,445	-2	-4	-7	-9	-5	-1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	6	-8	-4
2,540	0,494	-2	0	-2	-4	0	-4	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	23	-4	-1

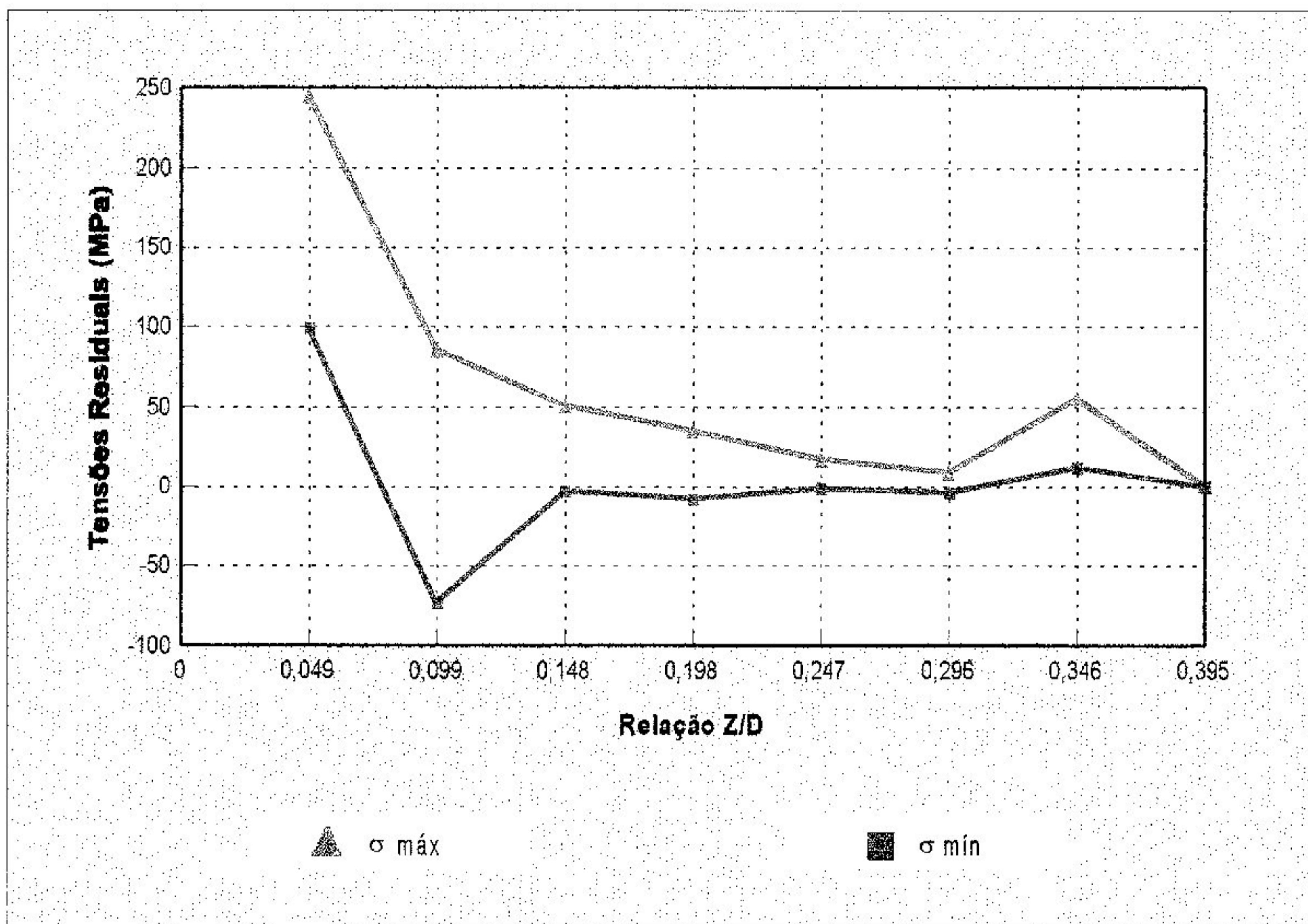


Gráfico 43 - Valores de tensões residuais para o ponto 07 do perfil 02.

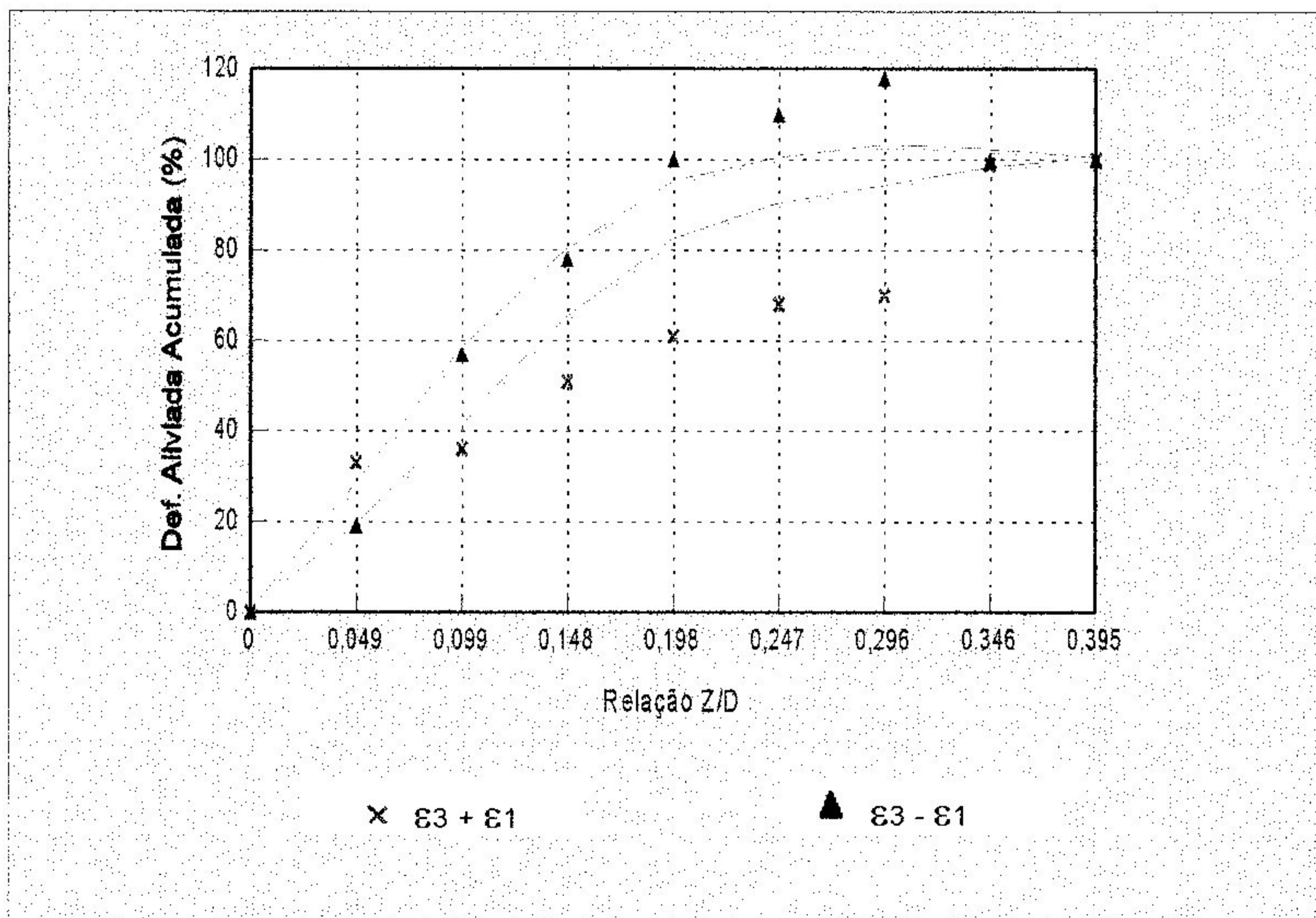


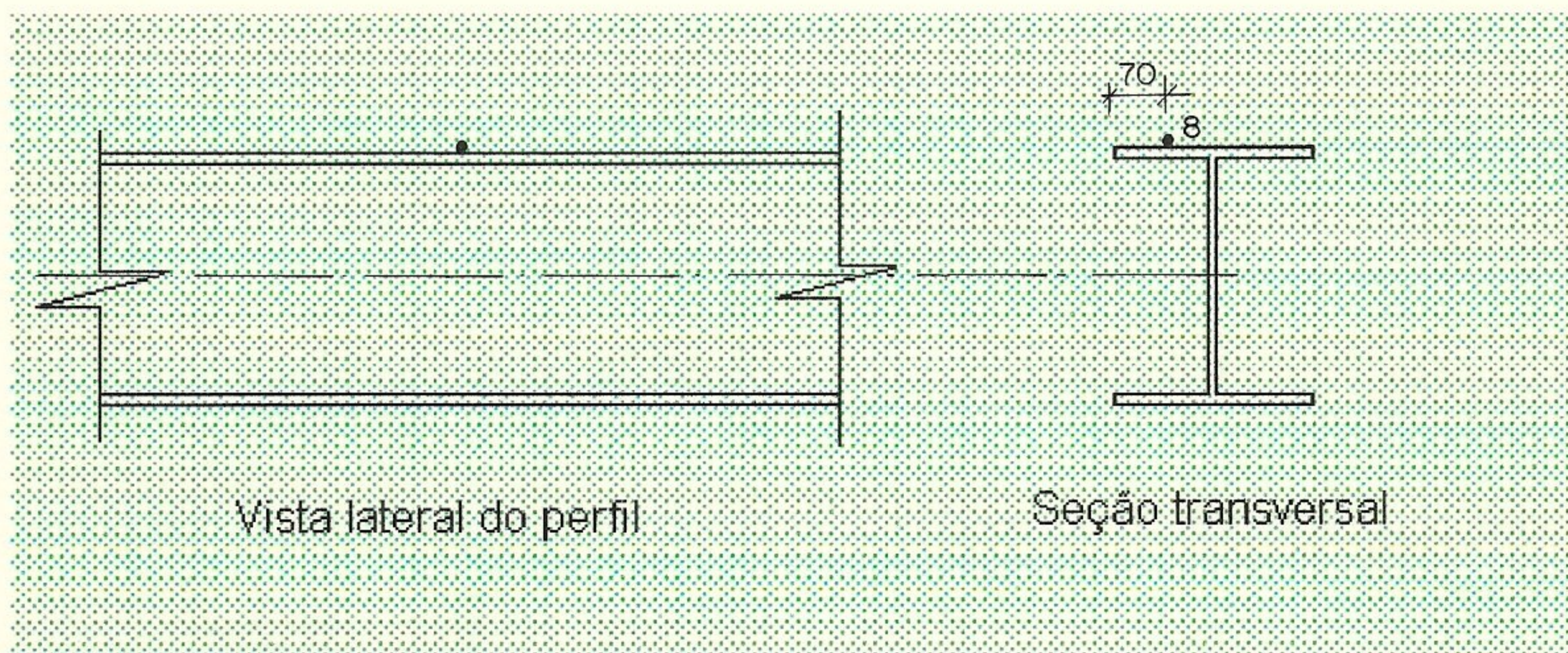
Gráfico 44 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 07 do perfil 02.

Tabela 45 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 08

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-276	-314	-772	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-249	-342	-760	
20	0,508	-236	-352	-777	Tensão de alimentação da roseta: 2,0020 V
30	0,762	-218	-349	-775	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	-202	-340	-778	
50	1,270	-180	-346	-790	Diâmetro do furo (D_o): 40 divisões
60	1,524	-154	-336	-835	
70	1,778	-139	-328	-832	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	-122	-330	-842	
90	2,286	-109	-328	-849	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	-98	-324	-846	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 46 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	0	-28	12	12	12	67	0,029	0,057	9,02098E-08	1,37449E-07	40	-91	157
0,508	0,099	13	-10	-17	-4	-30	16	0,063	0,122	1,95973E-07	2,94189E-07	-14	-34	24
0,762	0,148	18	3	2	20	-16	14	0,094	0,195	2,92404E-07	4,70219E-07	-21	6	28
1,016	0,198	16	9	-3	13	-19	-5	0,112	0,241	3,48396E-07	5,81143E-07	7	1	18
1,270	0,247	22	-6	-12	10	-34	22	0,12	0,28	3,73282E-07	6,75187E-07	-17	-8	21
1,524	0,296	26	10	-45	-19	-70	-39	0,125	0,31	3,88835E-07	7,47528E-07	15	-39	15
1,778	0,346	15	8	3	18	-12	2	0,13	0,322	4,04389E-07	7,76465E-07	-5	7	15
2,032	0,395	17	-2	-10	7	-27	11	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	-11	-5	13
2,286	0,445	13	2	-7	6	-20	2	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	-3	-3	10
2,540	0,494	11	4	3	14	-8	6	0,133	0,325	4,13721E-07	7,83699E-07	-18	5	12

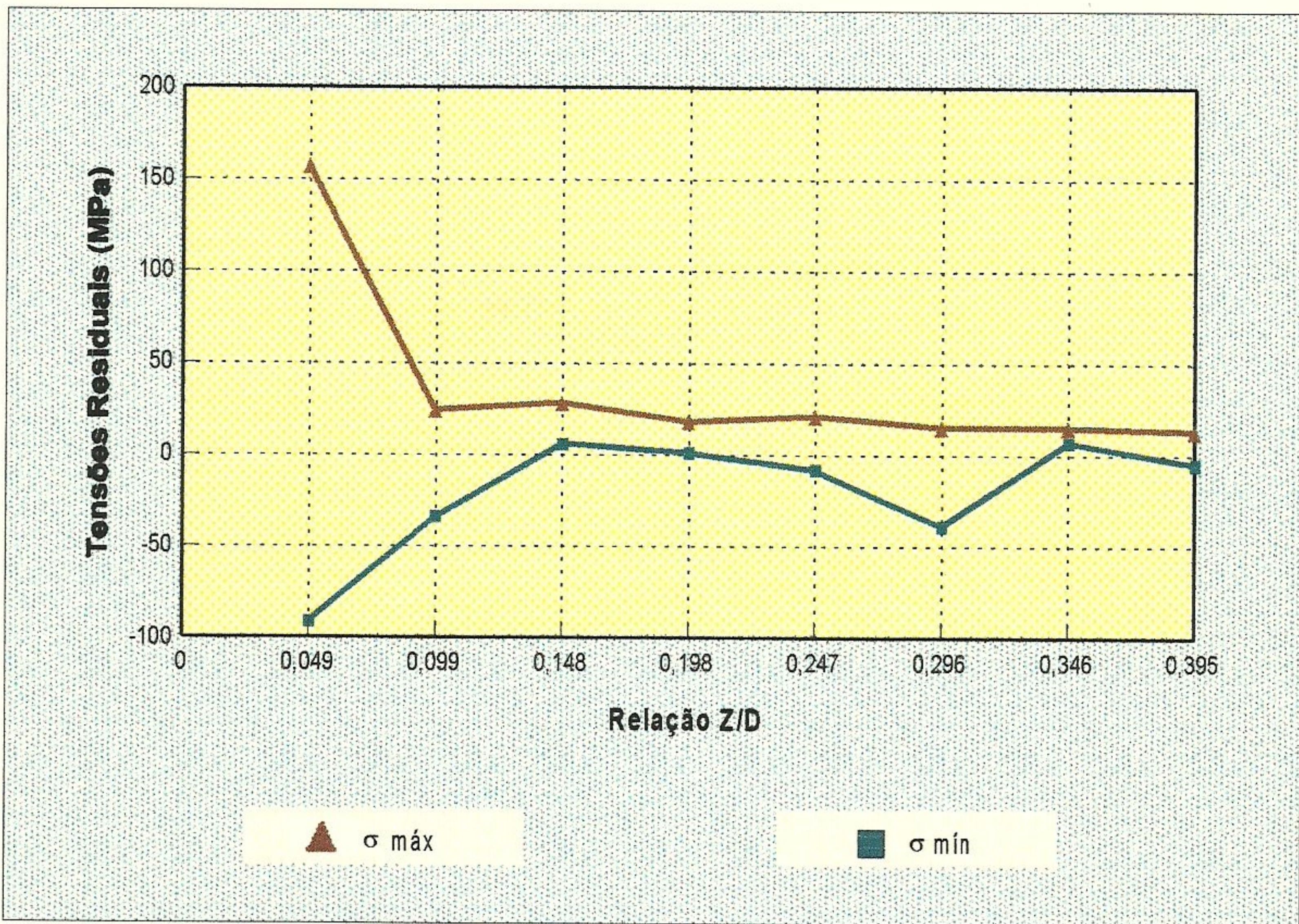


Gráfico 45 - Valores de tensões residuais para o ponto 08 do perfil 02.

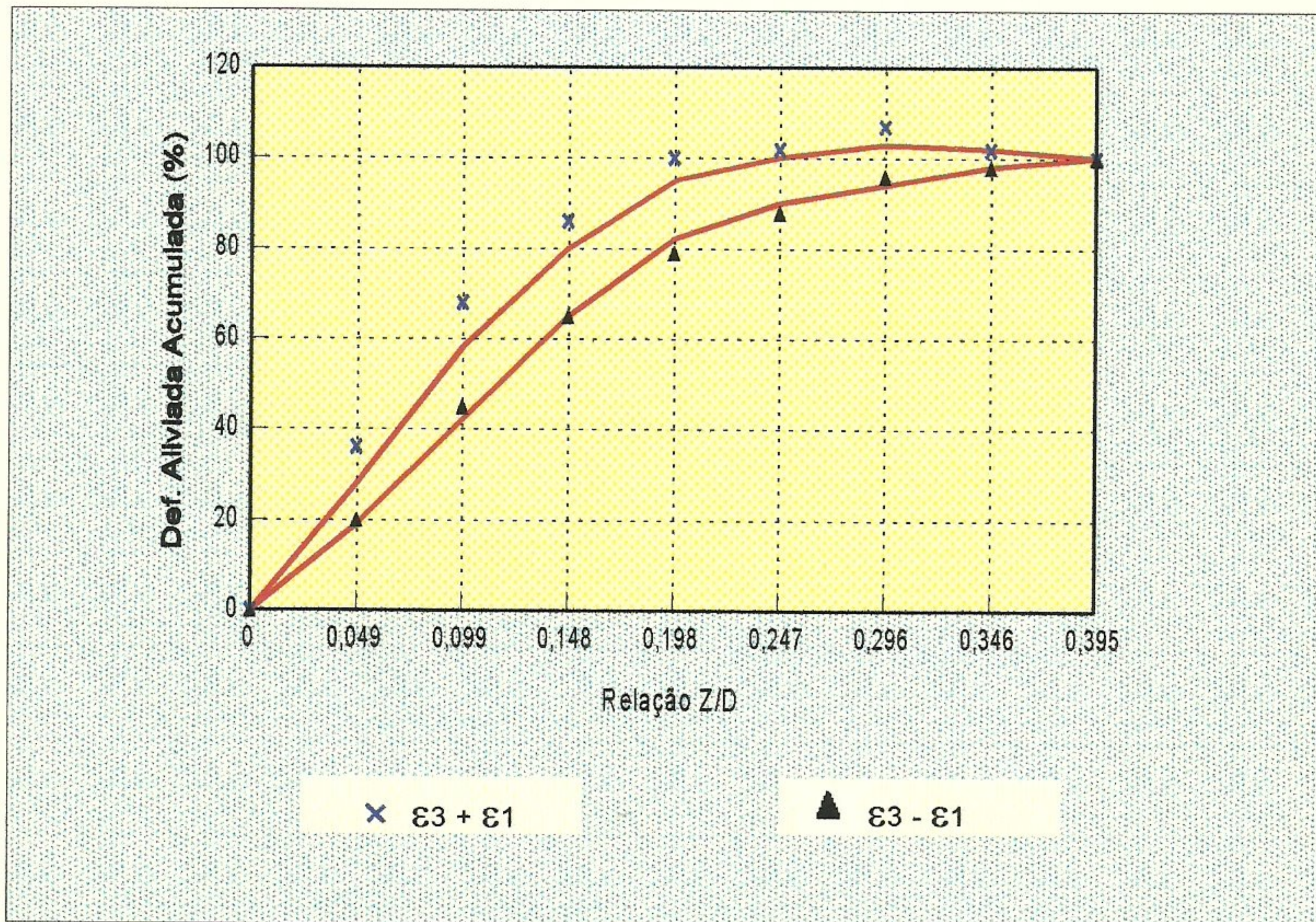


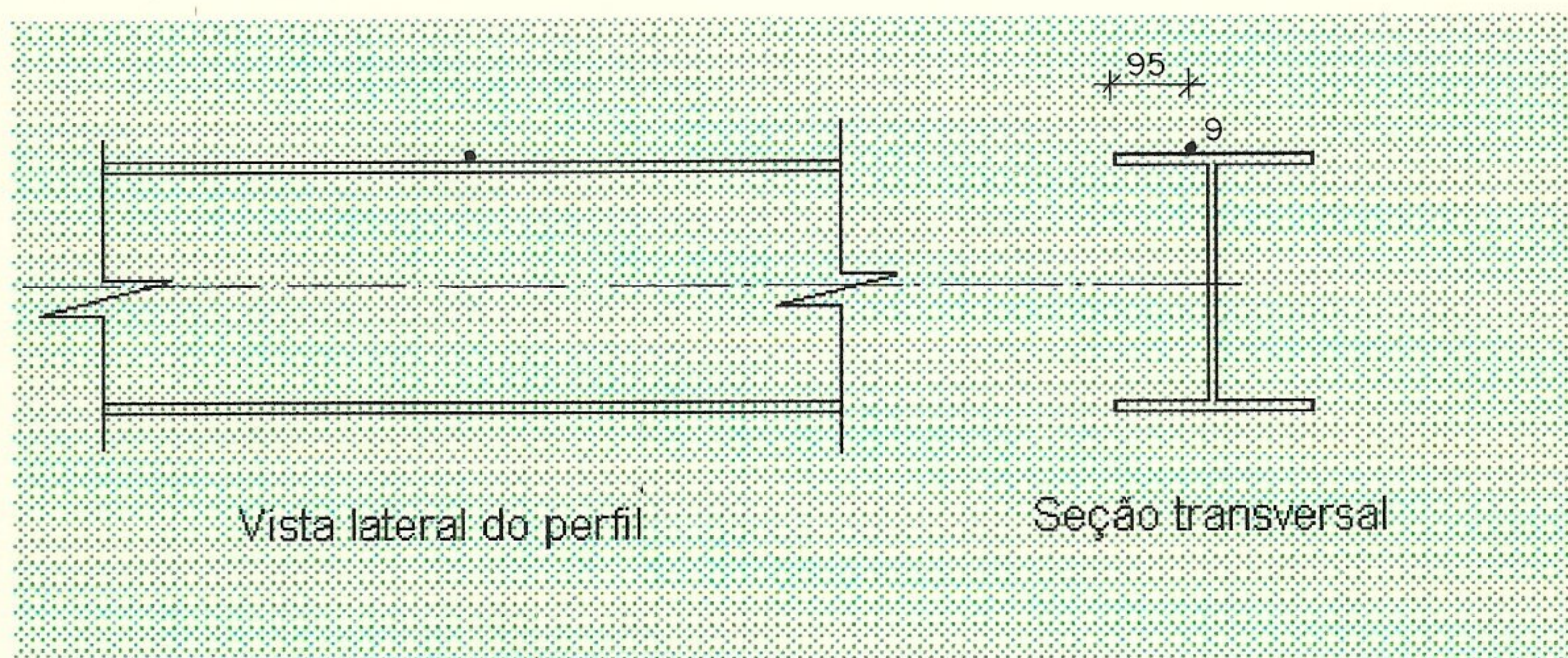
Gráfico 46 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 08 do perfil 02.

Tabela 47 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 09

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-343	-339	-472	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-302	-332	-488	
20	0,508	-264	-330	-529	Tensão de alimentação da roseta: 2,0021 V
30	0,762	-263	-432	-680	
40	1,016	-247	-409	-668	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	-239	-408	-668	
60	1,524	-231	-425	-755	Diâmetro do furo (D_0): 38 divisões
70	1,778	-220	-419	-750	
80	2,032	-218	-418	-774	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	-223	-424	-779	
100	2,540	-229	-425	-768	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 48 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)				Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}	
0,254	0,049	41	7	-16	25	-56	11	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	-6	-23	182	
0,508	0,099	38	2	-41	-3	-78	-7	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	3	-77	69	
0,762	0,148	1	-101	-149	-148	-150	53	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	-10	-239	-45	
1,016	0,198	16	23	12	28	-4	-18	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	39	14	31	
1,270	0,247	8	1	0	8	-8	6	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	-18	2	10	
1,524	0,296	8	-17	-86	-78	-94	-45	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	13	-97	-17	
1,778	0,346	11	6	5	16	-6	4	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	-17	9	14	
2,032	0,395	2	1	-24	-22	-26	-24	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	21	-28	-3	
2,286	0,445	-5	-6	-5	-10	0	2	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-6	-8	-6	
2,540	0,494	-6	-1	11	5	17	7	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	11	-3	10	

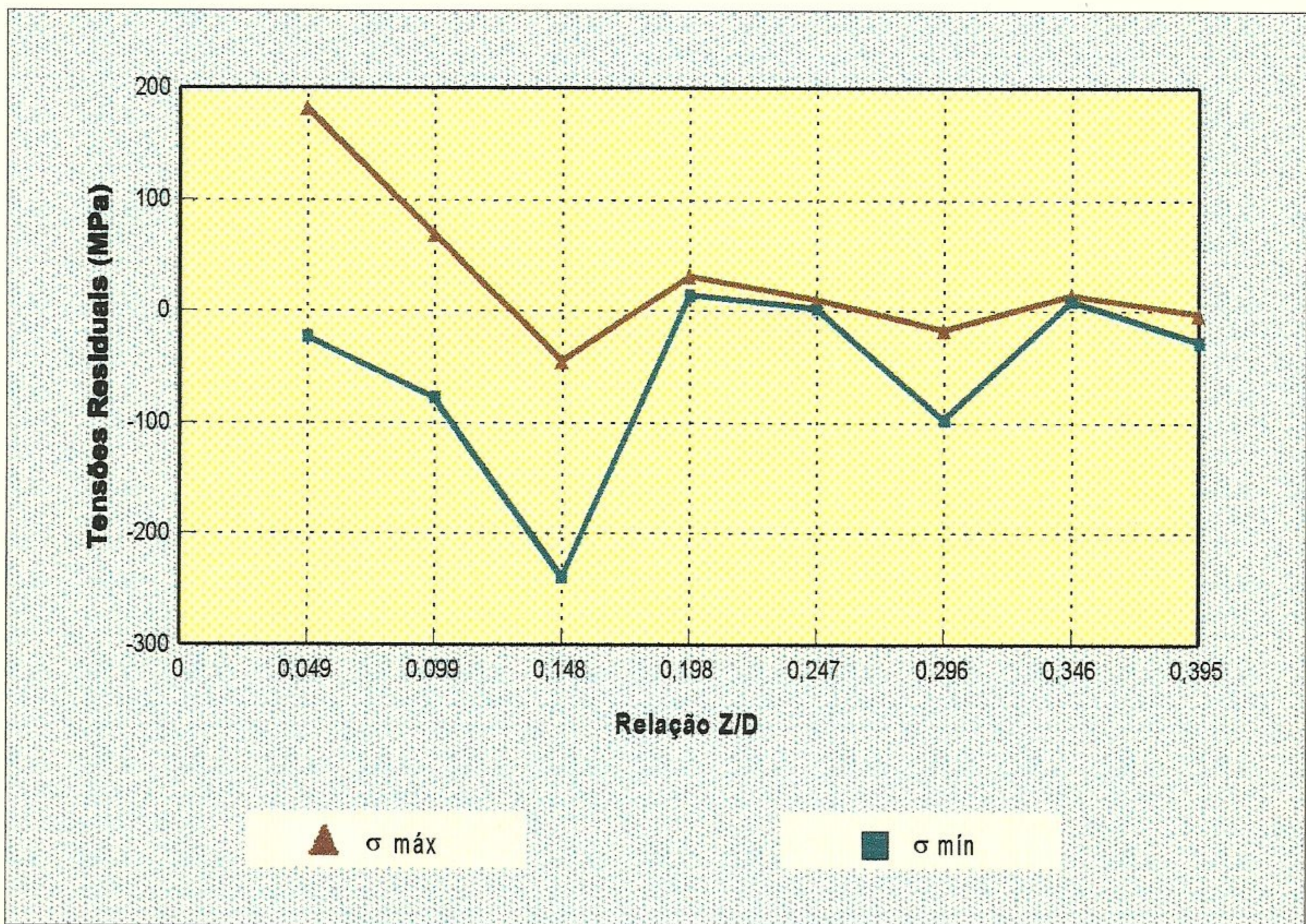


Gráfico 47 - Valores de tensões residuais para o ponto 09 do perfil 02.

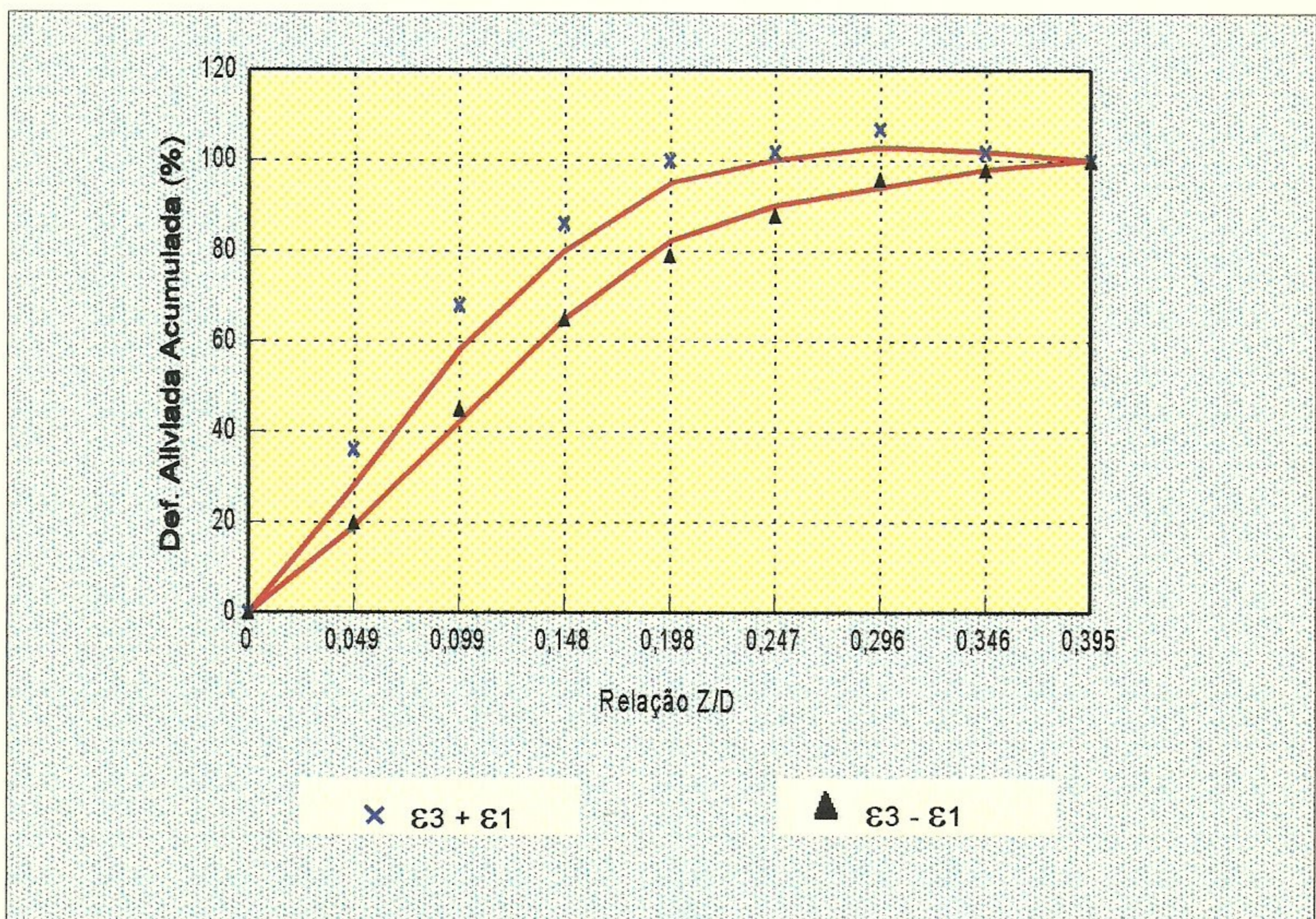


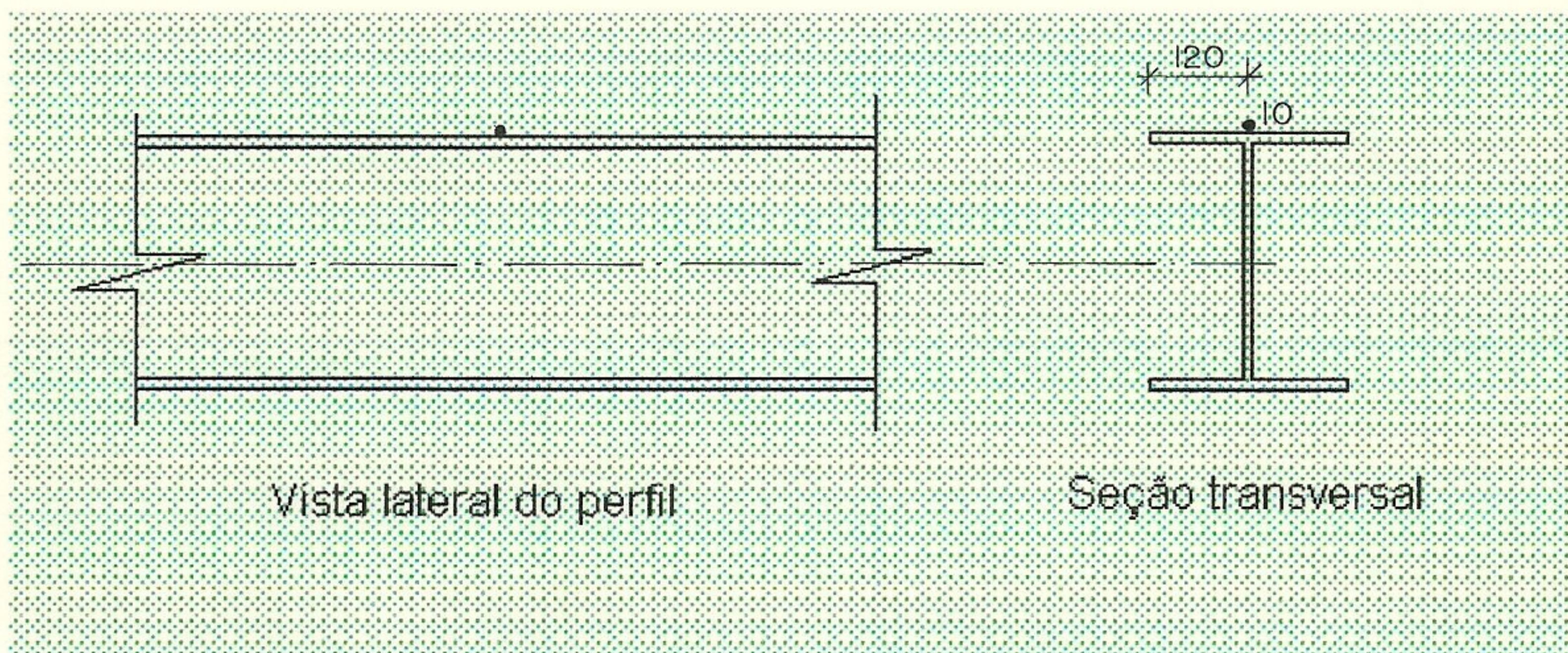
Gráfico 48 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 09 do perfil 02.

Tabela 49 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 10

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	1160	198	-635	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	1163	192	-648	
20	0,508	1151	176	-674	Tensão de alimentação da roseta: 2,0027 V
30	0,762	1137	153	-709	
40	1,016	1116	122	-758	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	1101	97	-798	
60	1,524	1092	82	-827	Diâmetro do furo (D_o): 39 divisões
70	1,778	1086	69	-844	
80	2,032	1053	10	-943	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	1067	-1	-932	
100	2,540	1071	0	-925	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 50 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	3	-6	-13	-10	-16	2	0,027	0,059	8,39884E-08	1,42272E-07	-4	-57	-1
0,508	0,099	-12	-16	-26	-38	-14	-6	0,06	0,12	1,86641E-07	2,89366E-07	12	-63	-37
0,762	0,148	-14	-23	-35	-48	-21	-3	0,089	0,181	2,76851E-07	4,3646E-07	4	-56	-32
1,016	0,198	-21	-31	-48	-69	-28	-8	0,105	0,231	3,26622E-07	5,57029E-07	8	-66	-40
1,270	0,247	-15	-25	-40	-54	-25	-5	0,113	0,262	3,51507E-07	6,31782E-07	6	-49	-29
1,524	0,296	-9	-15	-29	-38	-20	-8	0,115	0,295	3,57728E-07	7,11358E-07	11	-34	-19
1,778	0,346	-6	-13	-17	-23	-11	3	0,118	0,3	3,67061E-07	7,23415E-07	-8	-19	-12
2,032	0,395	-33	-58	-98	-131	-65	-14	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	6	-110	-65
2,286	0,445	14	-11	11	25	-3	46	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	-43	1	32
2,540	0,494	4	1	7	11	3	9	0,12	0,305	3,73282E-07	7,35471E-07	36	4	10

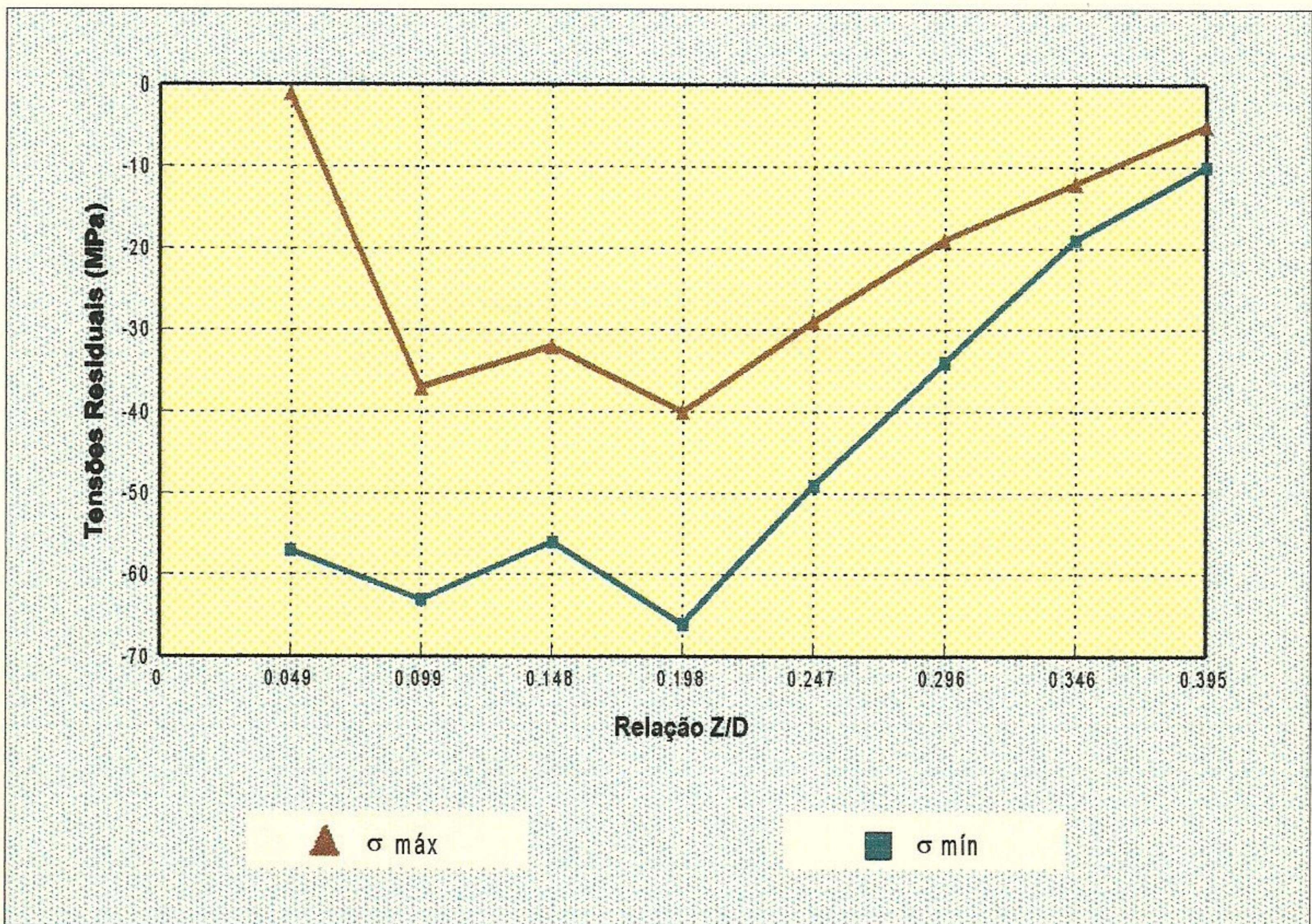


Gráfico 49 - Valores de tensões residuais para o ponto 10 do perfil 02.

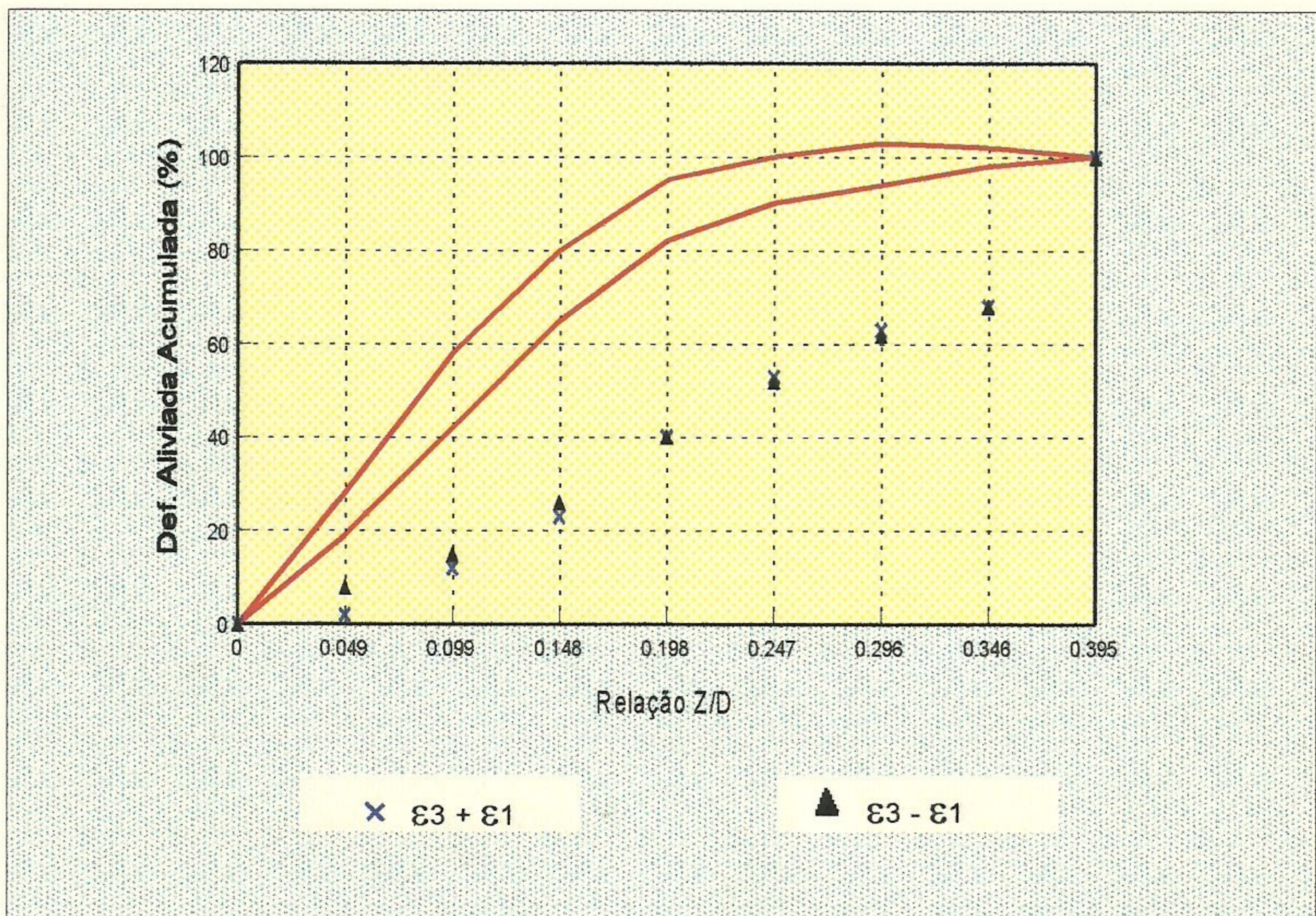


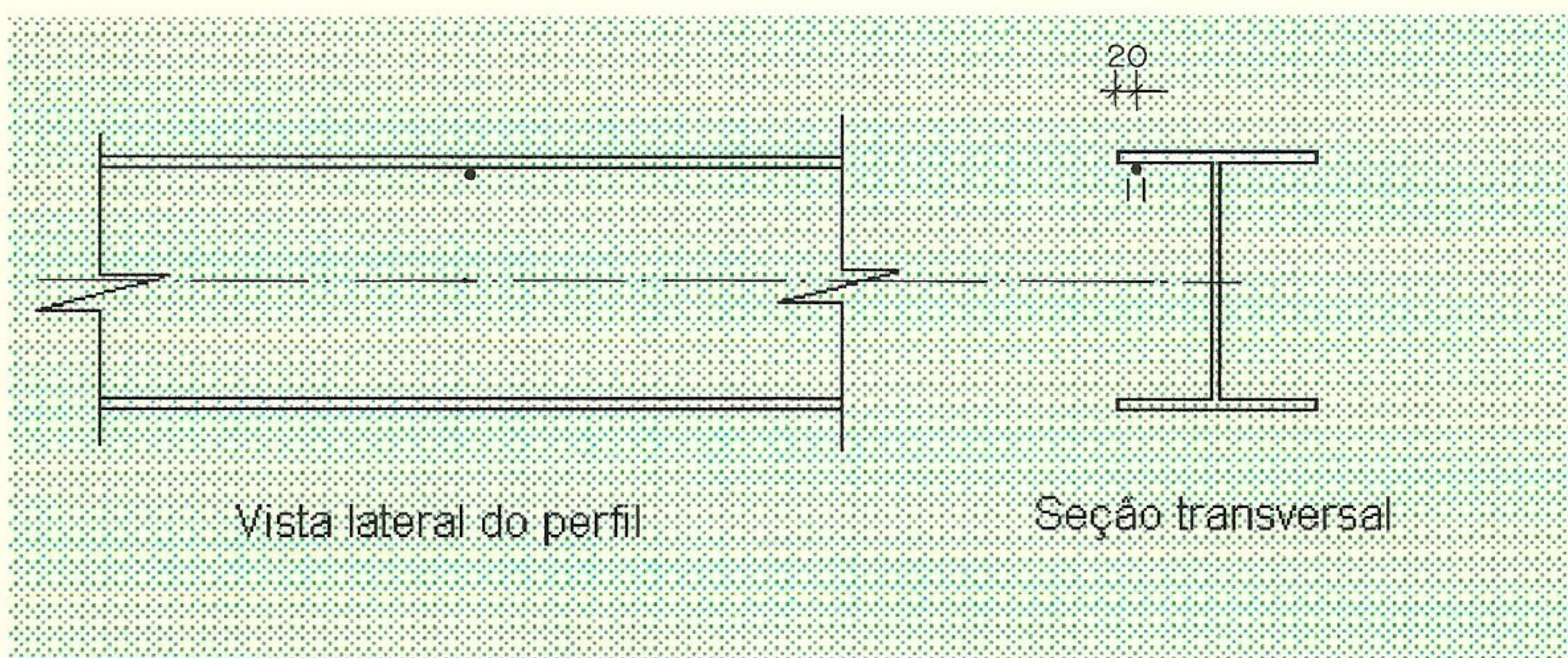
Gráfico 50 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 10 do perfil 02.

Tabela 51 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 11

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-181	-136	-180	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-175	-136	-174	
20	0,508	-190	-159	-192	Tensão de alimentação da roseta: 2,0027 V
30	0,762	-205	-176	-198	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	-211	-185	-203	
50	1,270	-213	-187	-201	Diâmetro do furo (D_o): 37 divisões
60	1,524	-216	-190	-200	
70	1,778	-219	-191	-198	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	-218	-192	-201	
90	2,286	-219	-194	-198	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	-217	-195	-195	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 52 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	6	0	6	12	0	12	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	23	17	59
0,508	0,099	-15	-23	-18	-33	-3	13	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	-39	-58	-33
0,762	0,148	-15	-17	-6	-21	9	13	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	28	-29	-10
1,016	0,198	-6	-9	-5	-11	1	7	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	41	-12	-6
1,270	0,247	-2	-2	2	0	4	4	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	23	-2	2
1,524	0,296	-3	-3	1	-2	4	4	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	23	-4	1
1,778	0,346	-3	-1	2	-1	5	1	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	6	-3	1
2,032	0,395	1	-1	-3	-2	-4	0	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	0	-3	0
2,286	0,445	-1	-2	3	2	4	6	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	28	-1	4
2,540	0,494	2	-1	3	5	1	7	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	41	1	6

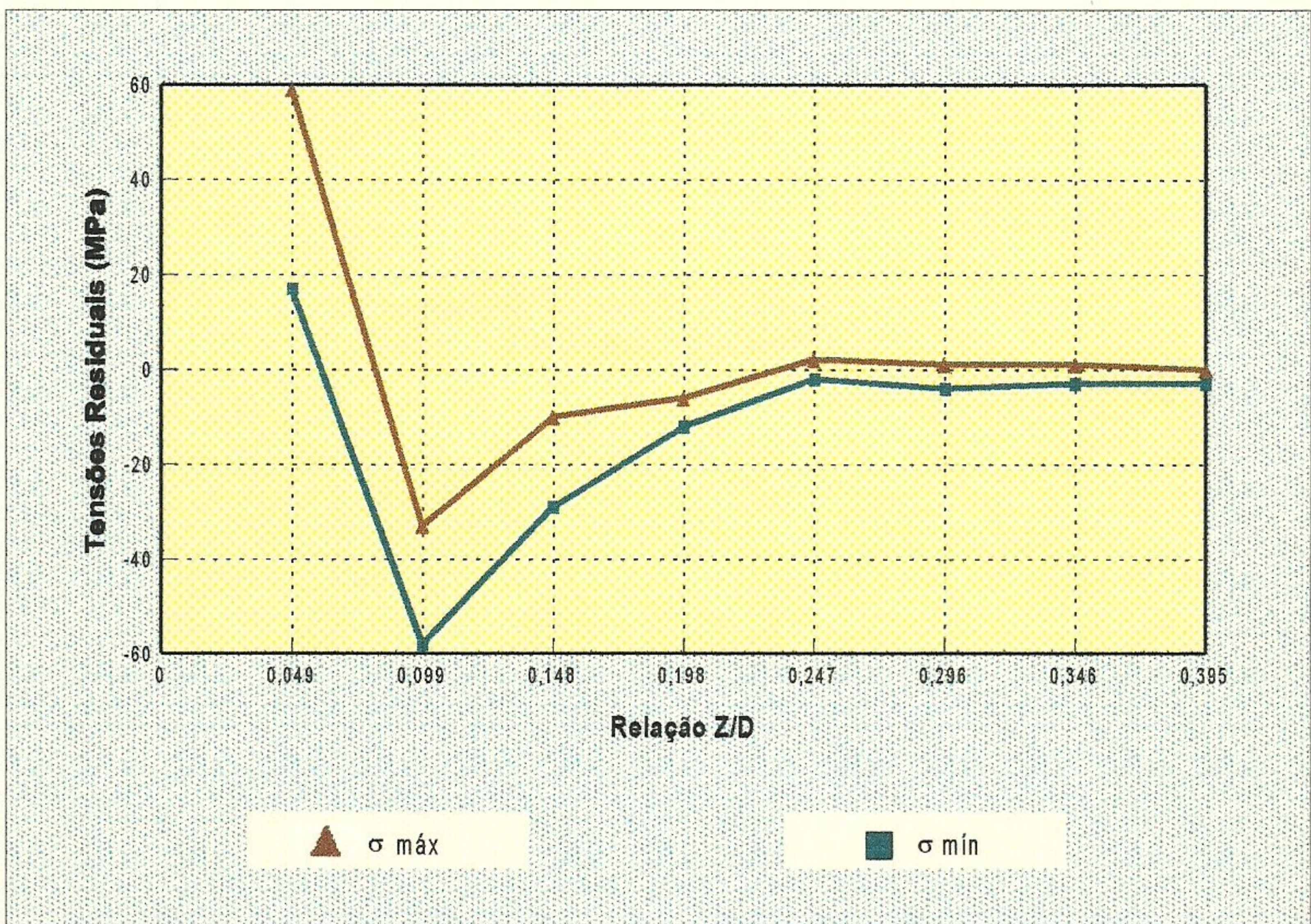


Gráfico 51 - Valores de tensões residuais para o ponto 11 do perfil 02.

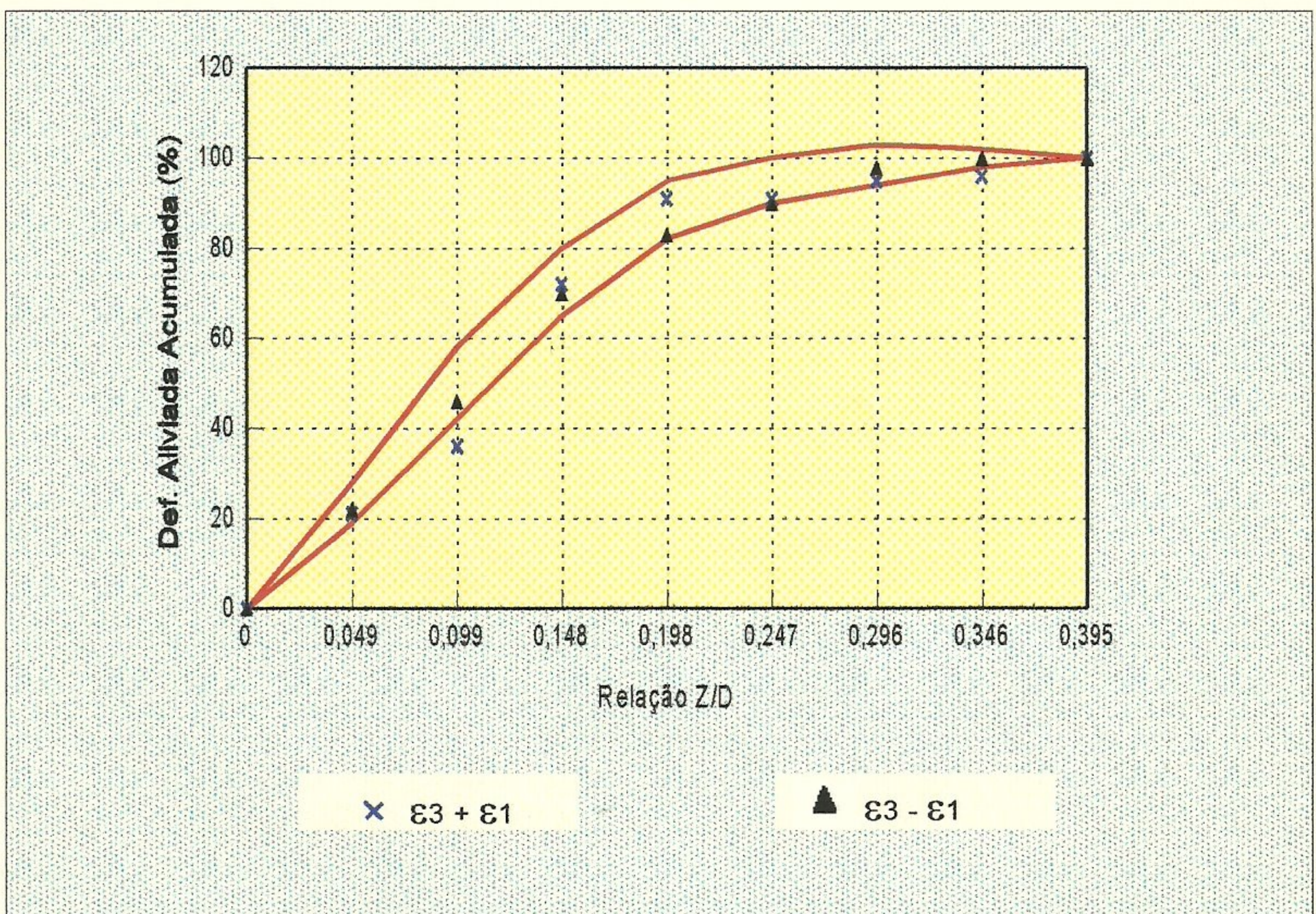


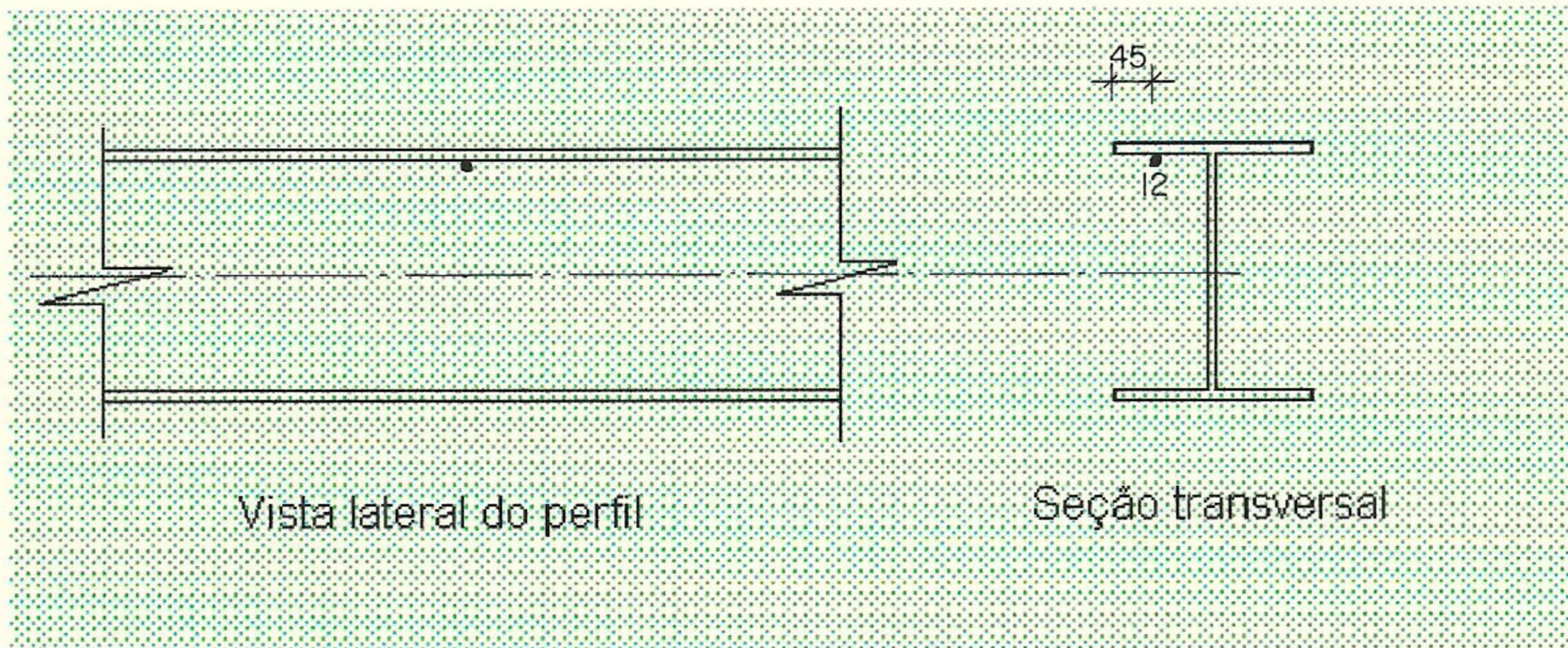
Gráfico 52 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 11 do perfil 02.

Tabela 53 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 12

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	90	52	-92	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	233	178	-5	
20	0,508	235	169	-18	Tensão de alimentação da roseta: 2,0037 V
30	0,762	245	160	-33	
40	1,016	250	149	-34	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	248	146	-43	
60	1,524	244	145	-52	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
70	1,778	242	140	-60	
80	2,032	241	138	-66	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	240	134	-73	
100	2,540	236	130	-81	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

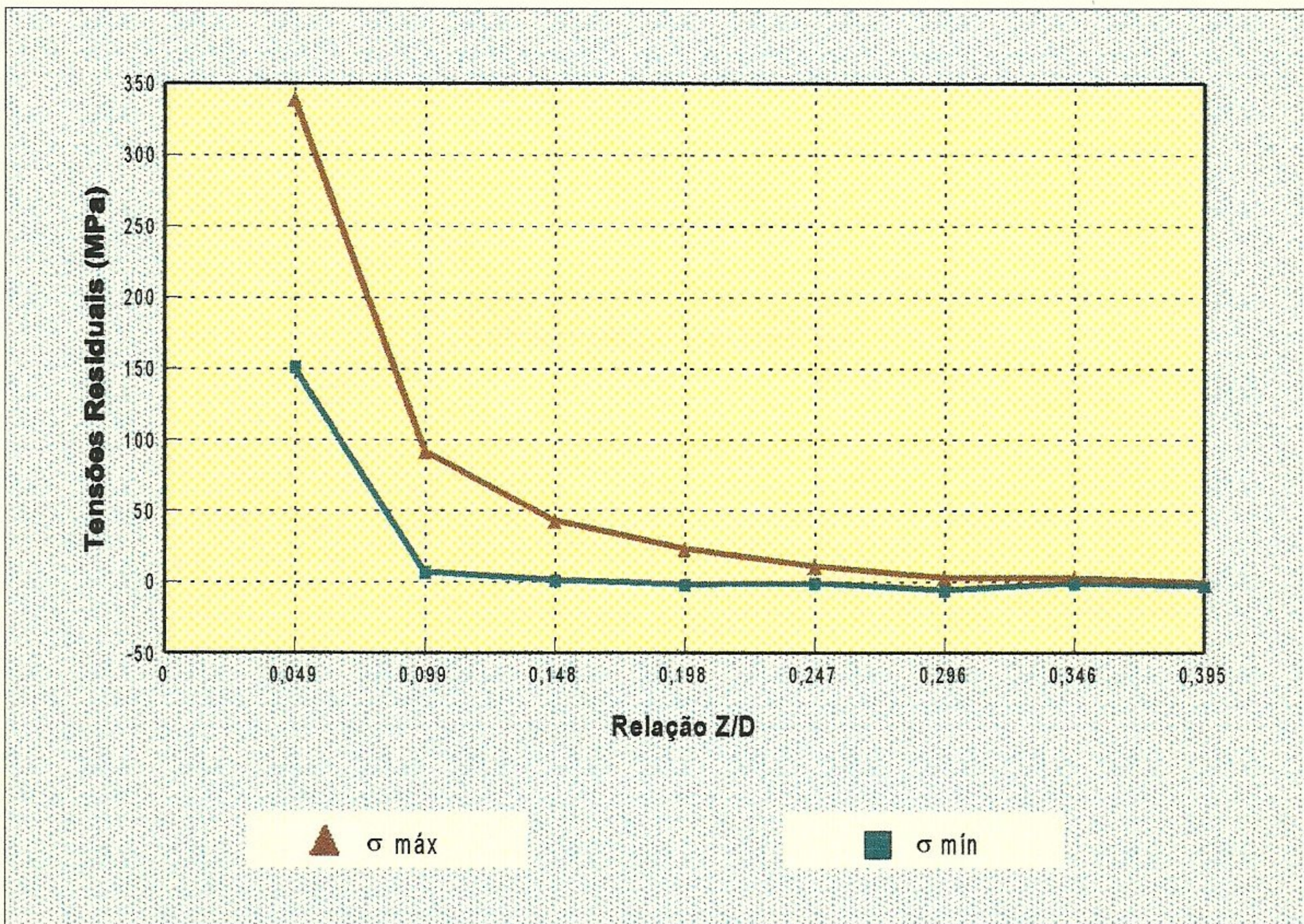


Gráfico 53 - Valores de tensões residuais para o ponto 12 do perfil 02.

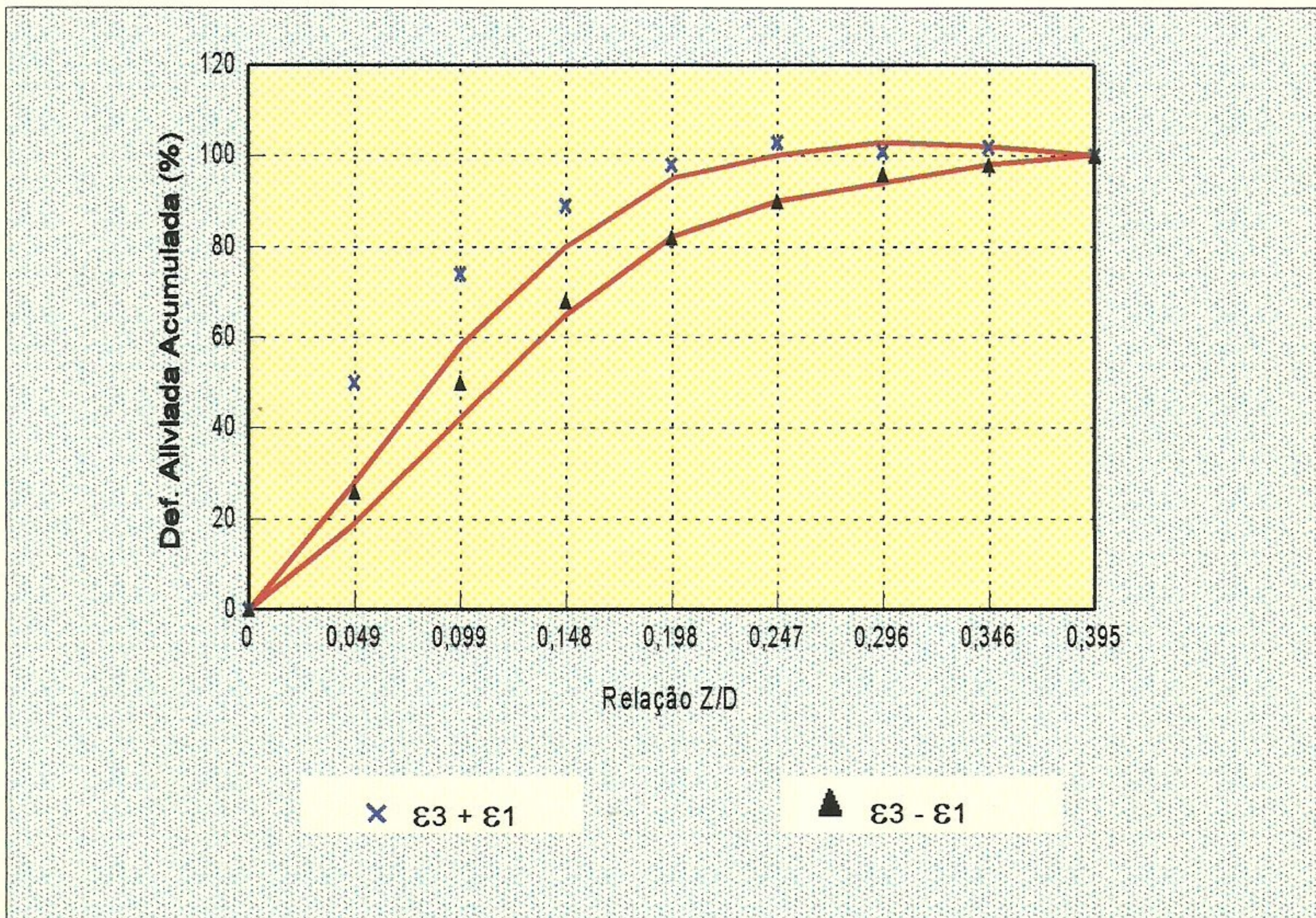


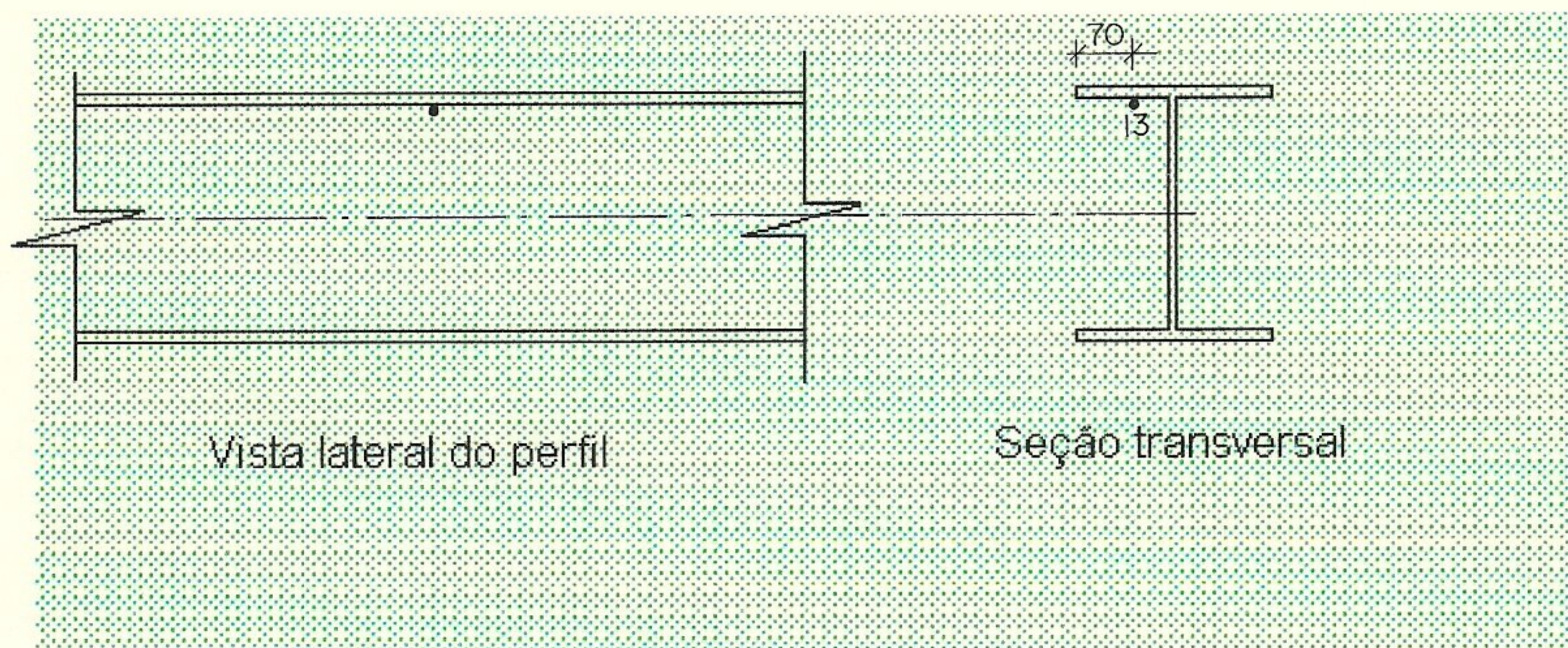
Gráfico 54 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 12 do perfil 02.

Tabela 55 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 13

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	142	-241	210	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	206	-195	223	
20	0,508	247	-175	218	Tensão de alimentação da roseta: 2,0017 V
30	0,762	276	-161	212	
40	1,016	296	-152	205	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	307	-148	201	
60	1,524	312	-147	194	Diâmetro do furo (D_0): 38 divisões
70	1,778	315	-147	192	
80	2,032	315	-148	189	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	314	-149	187	
100	2,540	313	-150	184	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 56 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	42	22	10	51	-32	8	0,025	0,058	7,77671E-08	1,39886E-07	-7	107	224
0,508	0,099	36	14	-7	29	-43	1	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	-1	0	79
0,762	0,148	22	12	-10	12	-32	-12	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	10	-9	32
1,016	0,198	20	3	-8	12	-28	6	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	-6	-4	23
1,270	0,247	11	3	-6	5	-17	-1	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	2	-3	11
1,524	0,296	5	1	-5	0	-10	-2	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	6	-4	4
1,778	0,346	-1	0	-4	-5	-3	-5	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	30	-6	-1
2,032	0,395	2	-1	-2	0	-4	2	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	-13	-2	2
2,286	0,445	-2	-1	-3	-5	-1	-3	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	36	-5	-2
2,540	0,494	-2	-1	-2	-4	0	-2	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	13	-4	-2

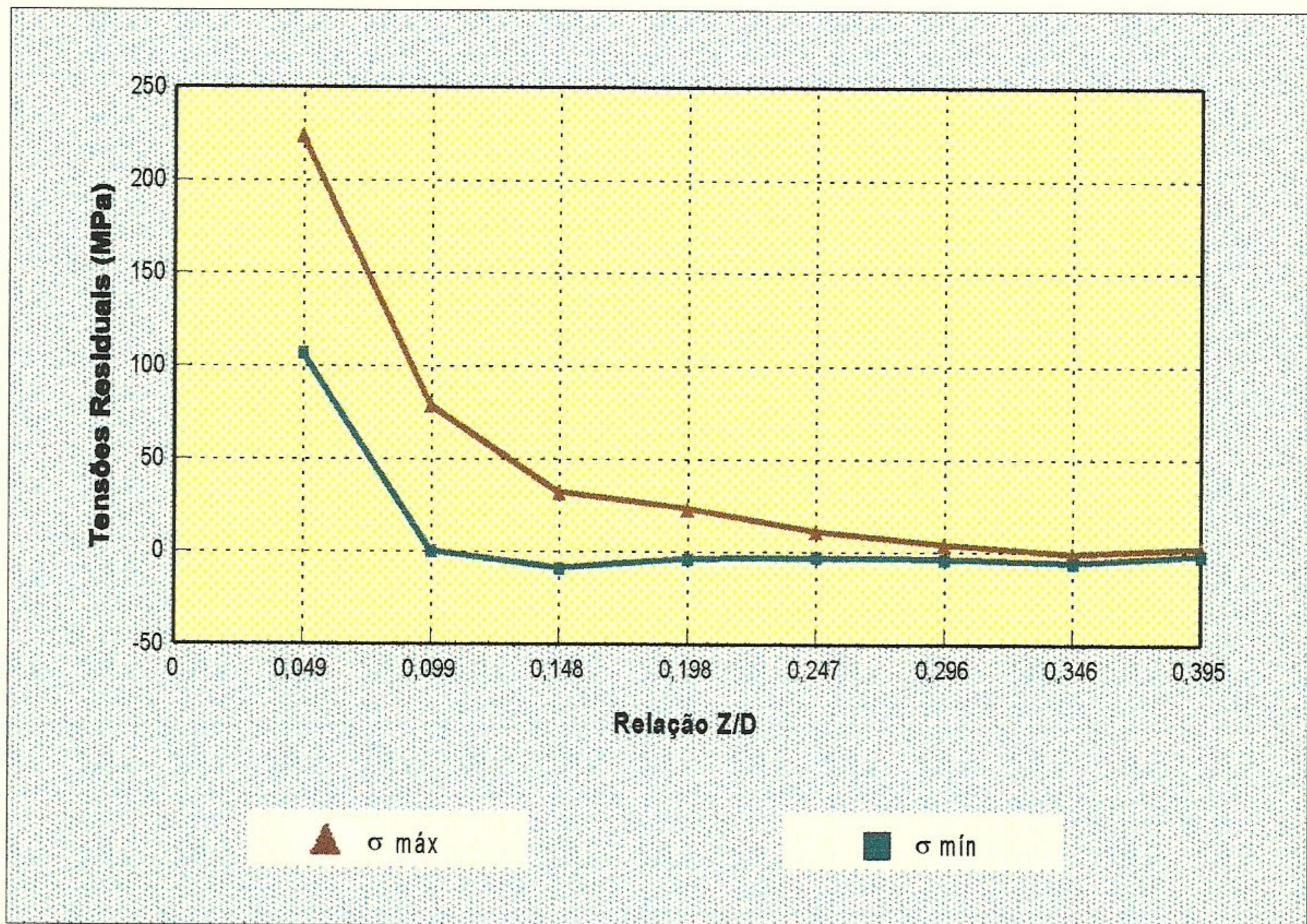


Gráfico 55 - Valores de tensões residuais para o ponto 13 do perfil 02.

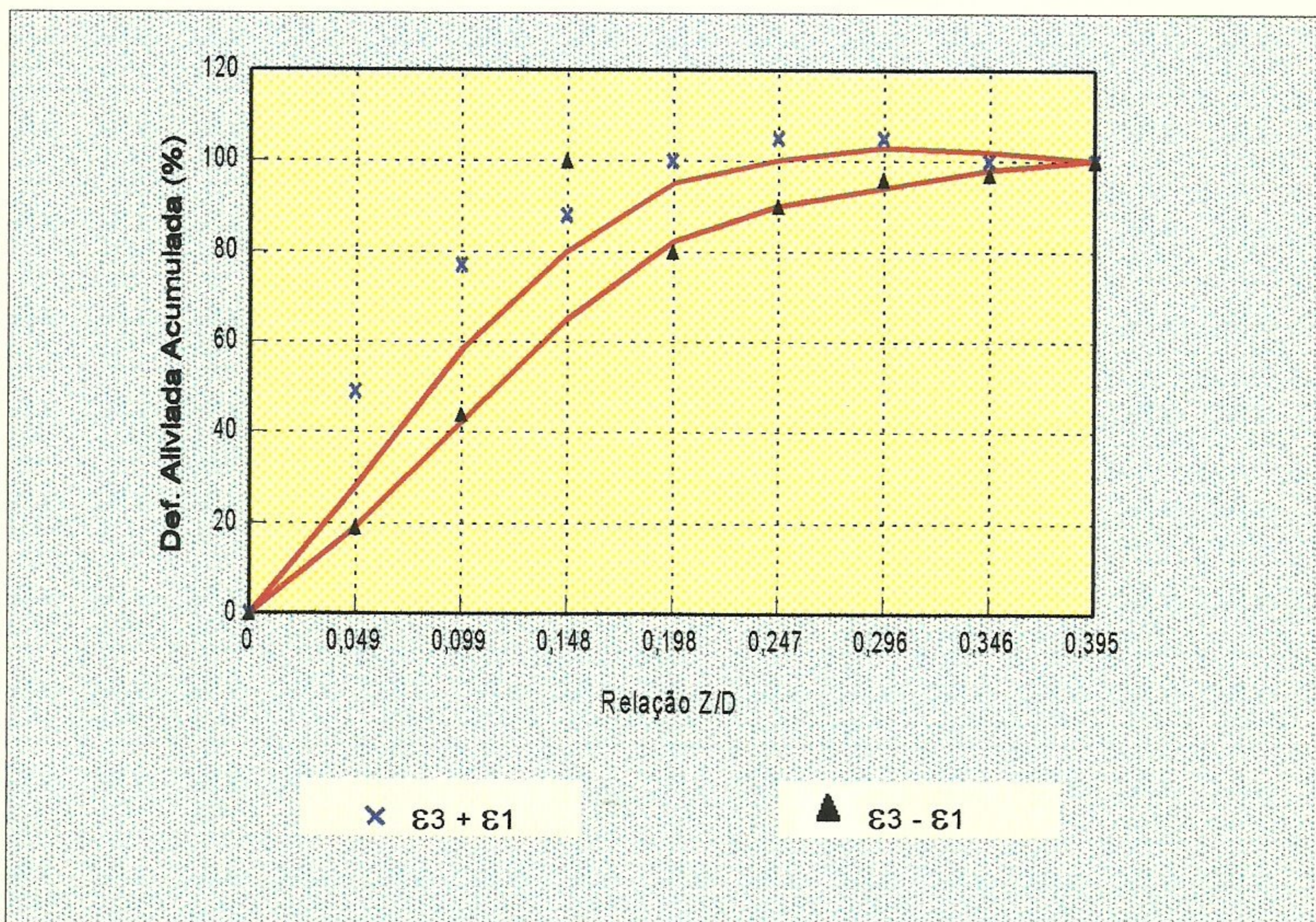


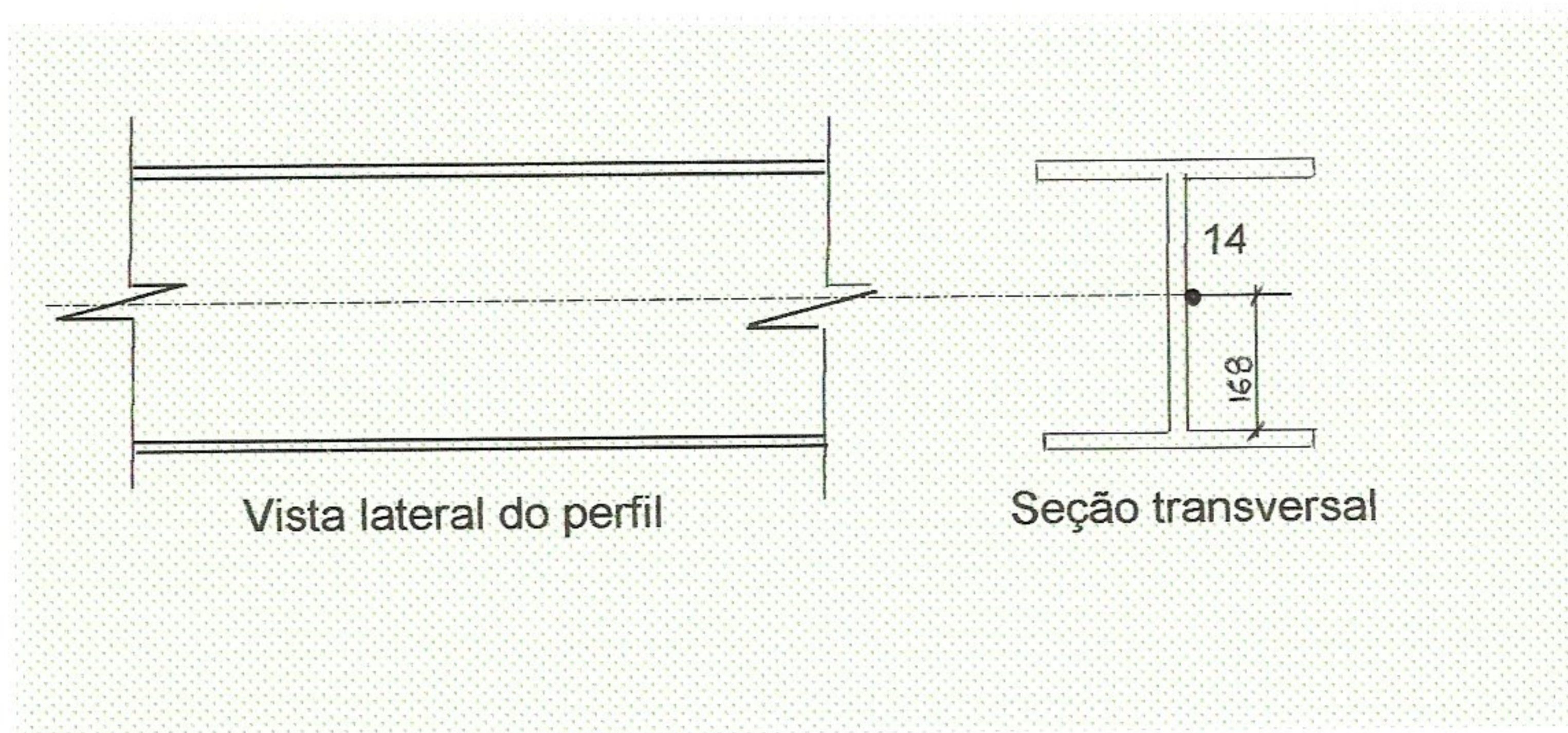
Gráfico 56 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 13 do perfil 02.

Tabela 57 - Dados experimentais obtidos para o perfil 14

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 14

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		TABELA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	319	680	-99	Coeficiente de sensibilidade (fator gage) - Fk:2,02
10	0,254	366	703	-93	
20	0,508	409	721	-132	Tensão de alimentação da roseta: 2,0017
30	0,762	441	725	-141	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	477	732	-154	
50	1,270	490	734	-160	Diâmetro do furo (Do): 38 divisões
60	1,524	499	736	-167	
70	1,778	506	735	-123	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	506	735	-124	
90	2,286	502	734	-130	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	504	733	-132	
					Roseta segundo Norma ASTM E-837/94

Observações:

Tabela 58 – Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente				Tensão (MPa)		
Z (mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_2 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	47	22	7	53	-40	10	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	-7	99	245
0,508	0,099	43	17	-38	5	-80	-29	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	10	-73	86
0,762	0,148	34	6	-9	25	-43	13	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	-8	-3	51
1,016	0,198	31	6	-14	17	-45	5	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	-3	-8	35
1,270	0,247	16	2	-5	11	-21	7	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	-9	-1	17
1,524	0,296	10	1	-7	3	-17	1	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	-2	-4	9
1,778	0,346	6	0	42	48	36	48	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	27	12	56
2,032	0,395	0	0	1	1	1	1	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	23	0	1
2,286	0,445	-2	-4	-7	-9	-5	-1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	6	-8	-4
2,540	0,494	-2	0	-2	-4	0	-4	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	23	-4	-1

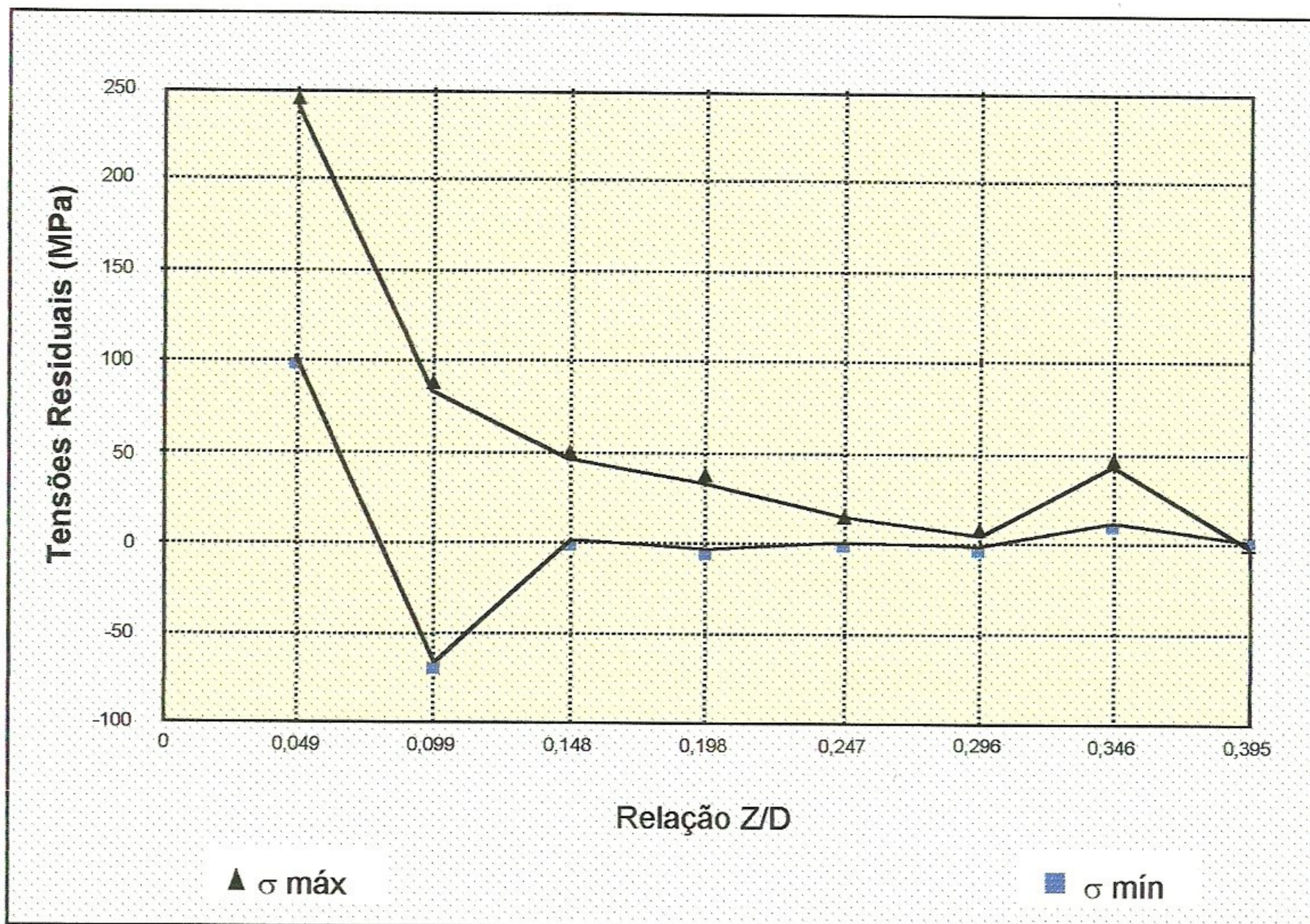


Gráfico 57 - Valores de tensões residuais para o ponto 14 do perfil 02.

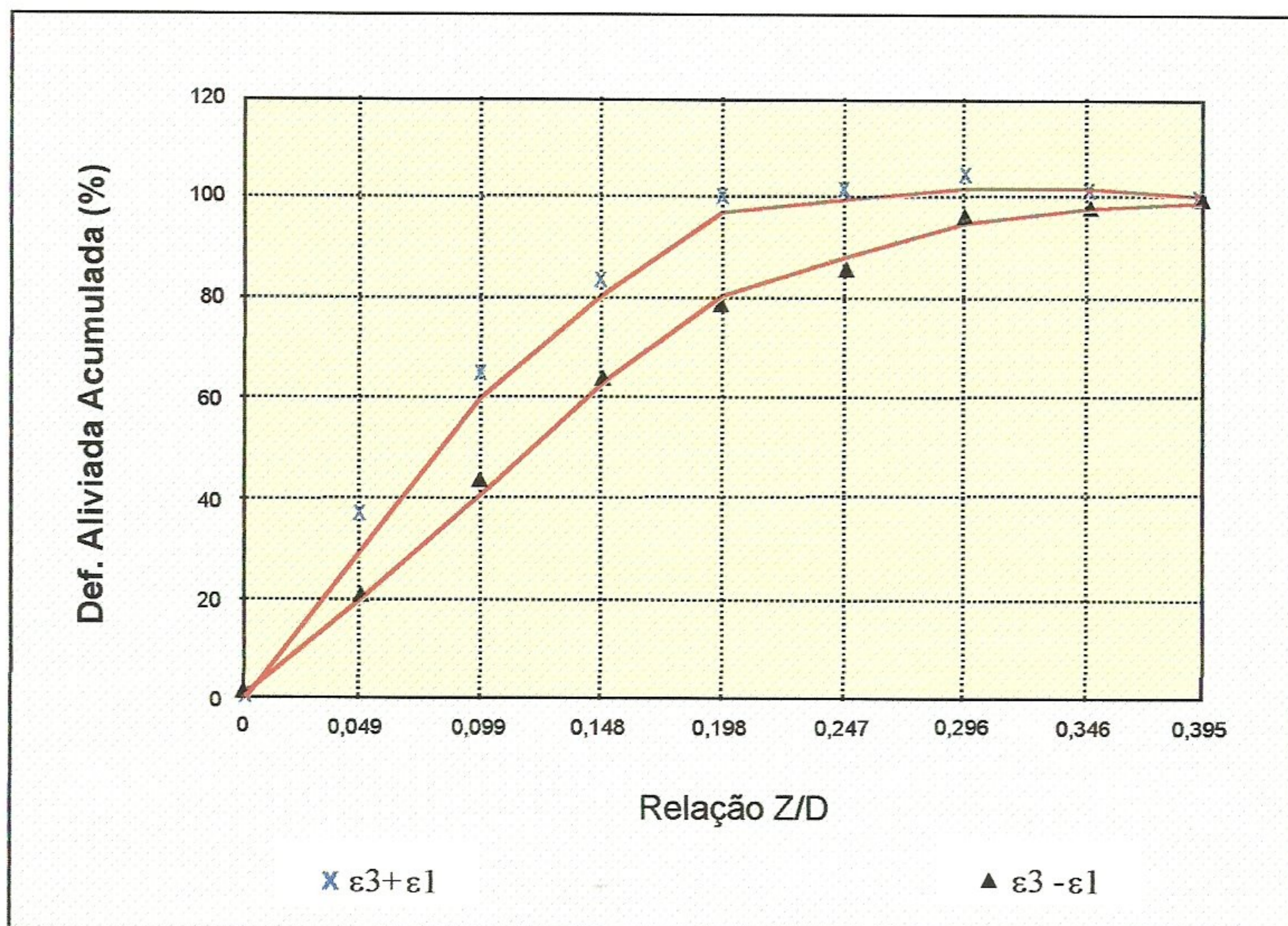


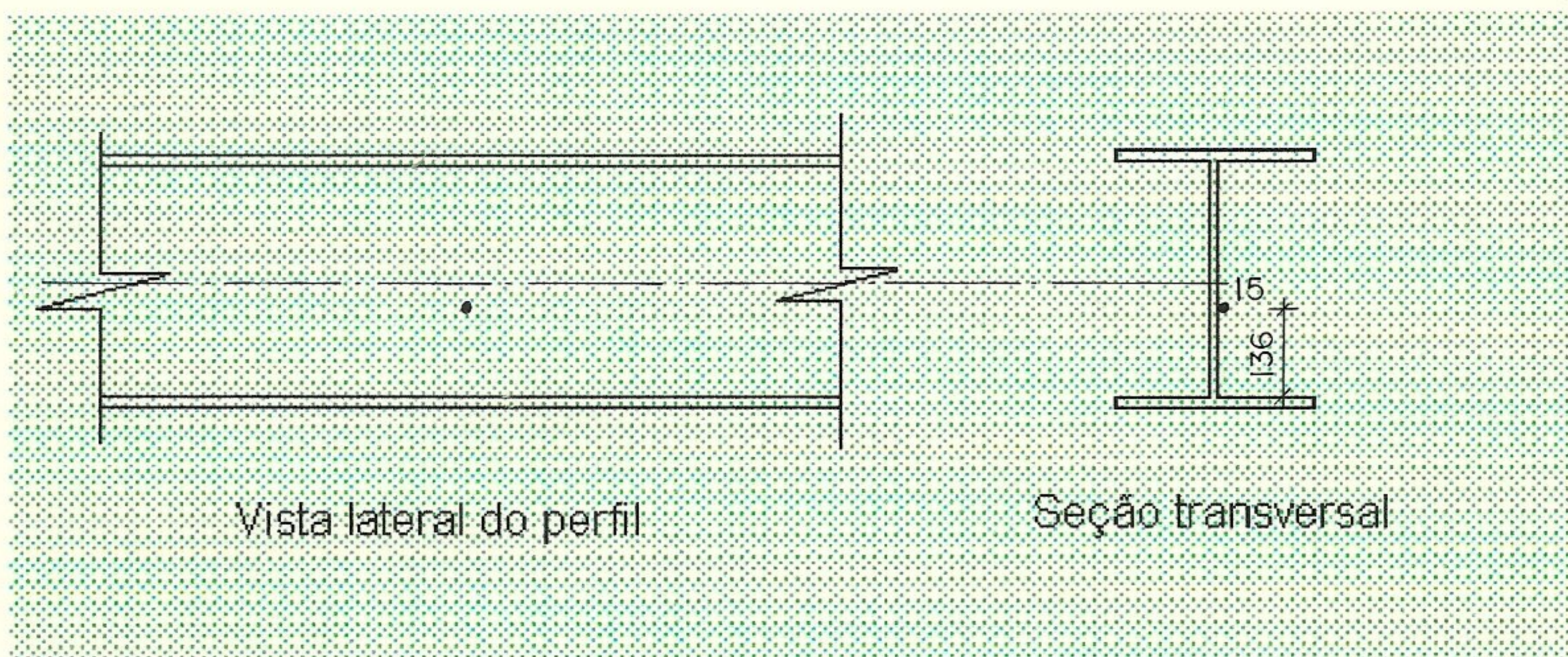
Gráfico 58 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 14 do perfil 02

Tabela 59 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 15

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



Vista lateral do perfil

Seção transversal

PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	192	-331	275	
10	0,254	216	-298	291	
20	0,508	226	-280	300	Tensão de alimentação da roseta: 2,0035 V
30	0,762	232	-270	307	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	235	-263	307	
50	1,270	236	-260	308	Diâmetro do furo (D_o): 37 divisões
60	1,524	237	-258	306	
70	1,778	236	-256	306	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	234	-259	304	
90	2,286	231	-259	-302	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	233	-257	301	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 60 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	24	33	16	40	-8	-26	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	36	79	175
0,508	0,099	10	18	9	19	-1	-17	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	43	10	42
0,762	0,148	6	10	7	13	1	-7	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	41	8	17
1,016	0,198	3	7	0	3	-3	-11	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	37	-3	8
1,270	0,247	1	3	1	2	0	-4	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	-32	0	3
1,524	0,296	1	2	-2	-1	-3	-5	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	30	-3	1
1,778	0,346	-1	2	0	-1	1	-5	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	-39	-3	1
2,032	0,395	-2	-3	-2	-4	0	2	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	-13	-4	-2
2,286	0,445	-3	0	-2	-5	1	-5	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-39	-5	-2
2,540	0,494	2	2	-1	1	-3	-3	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	23	-1	2

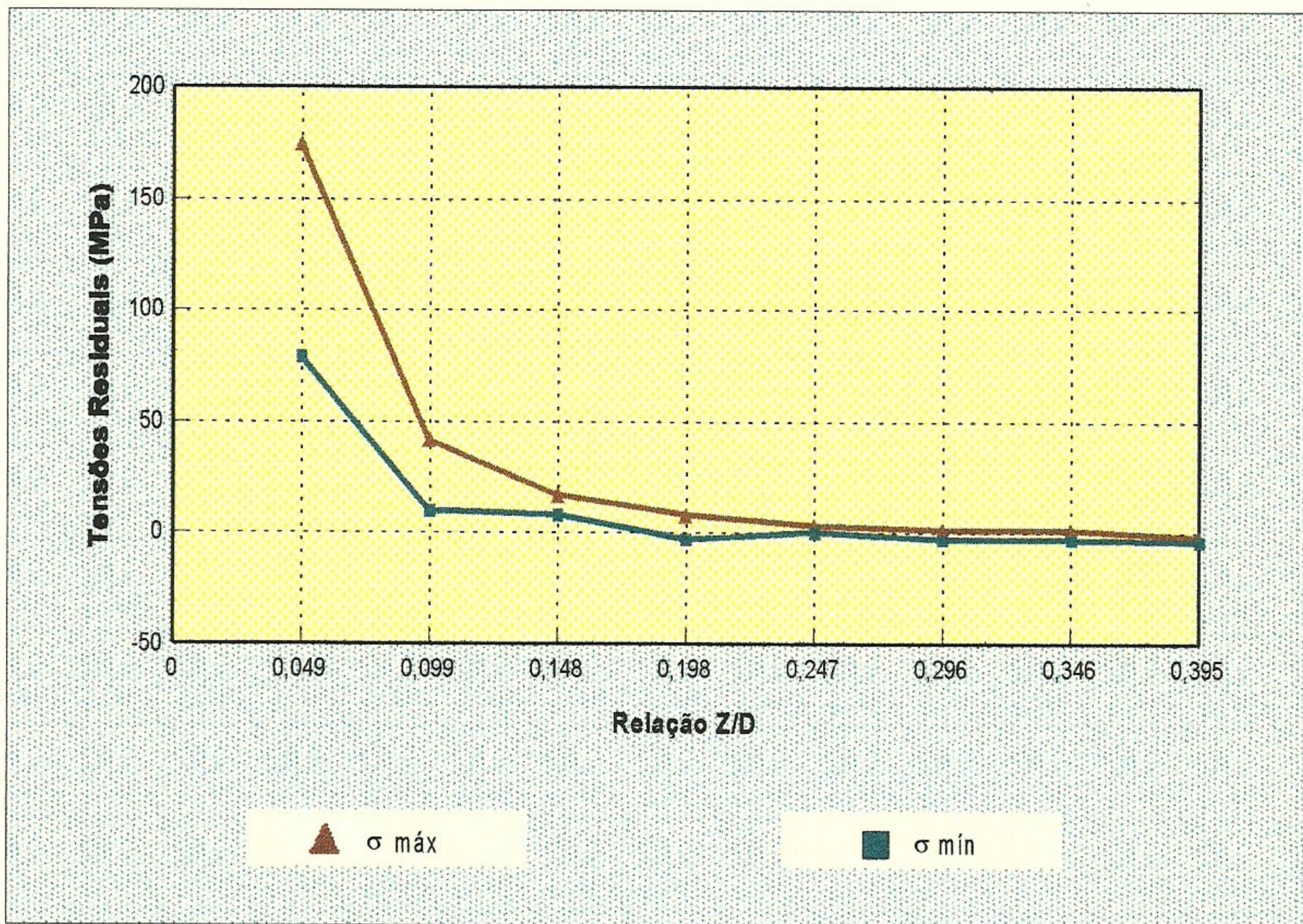


Gráfico 59 - Valores de tensões residuais para o ponto 15 do perfil 02.

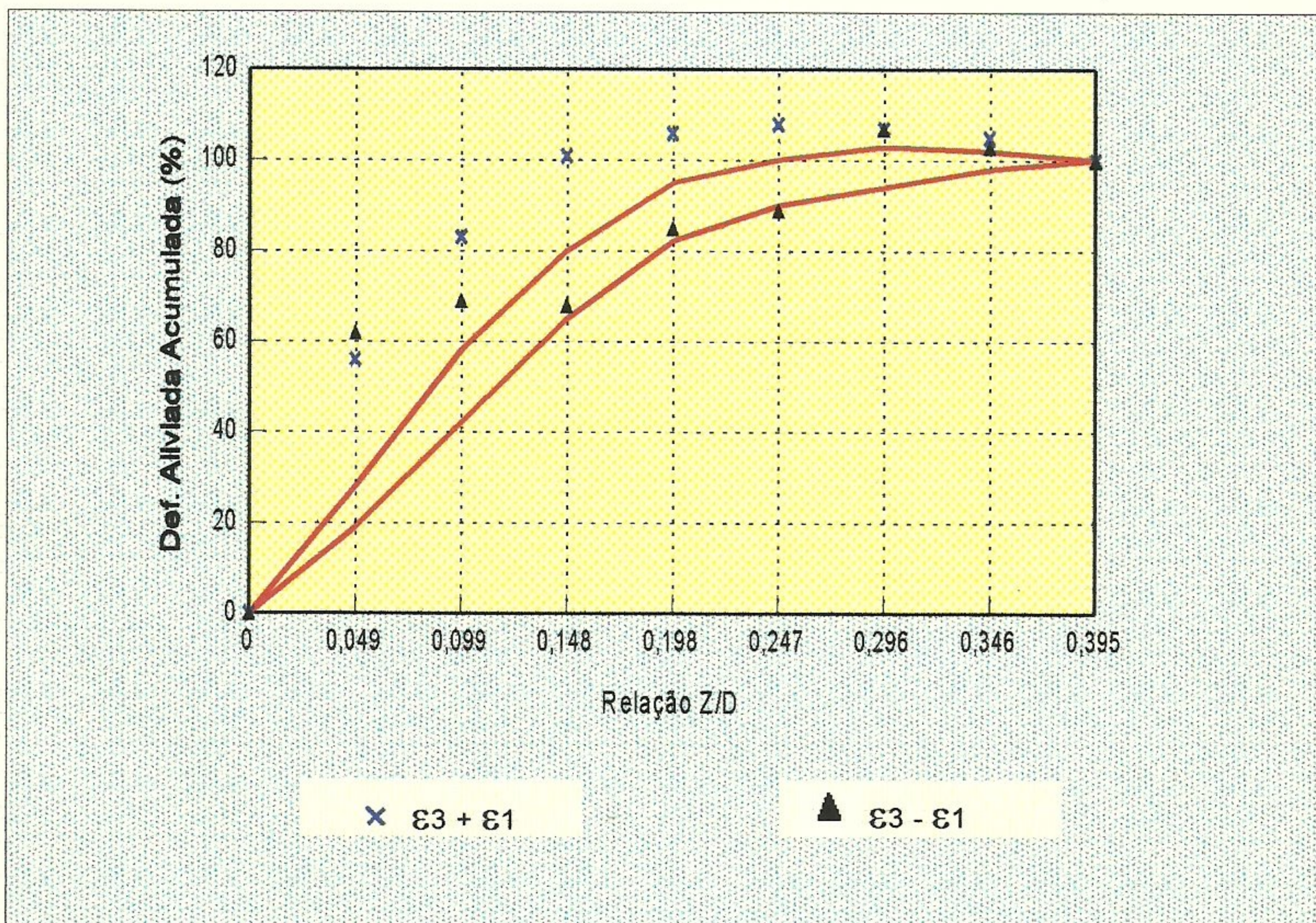


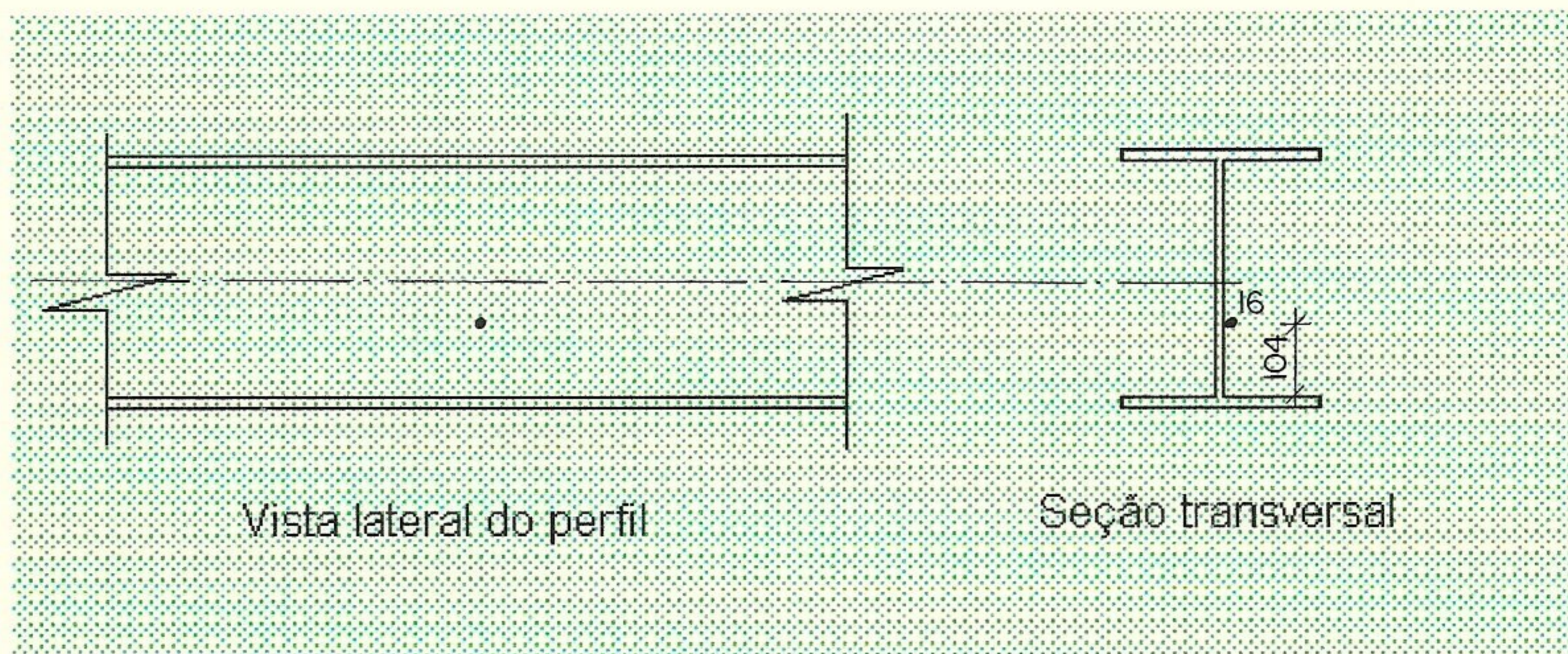
Gráfico 60 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 15 do perfil 02.

Tabela 61 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 16

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	10	335	419	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	35	359	434	
20	0,508	49	376	441	Tensão de alimentação da roseta: 2,0035 V
30	0,762	59	389	447	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	63	397	449	
50	1,270	68	403	448	Diâmetro do furo (D_0): 37 divisões
60	1,524	68	405	446	
70	1,778	67	407	445	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	67	407	442	
90	2,286	66	407	443	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	66	406	443	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 62 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	25	24	15	40	-10	-8	0,025	0,058	7,77671E-08	1,39886E-07	19	104	150
0,508	0,099	14	17	7	21	-7	-13	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	31	15	42
0,762	0,148	10	13	6	16	-4	-10	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	34	9	22
1,016	0,198	4	8	2	6	-2	-10	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	39	0	10
1,270	0,247	5	6	-1	4	-6	-8	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	27	-1	7
1,524	0,296	0	2	-2	-2	-2	-6	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	36	-4	1
1,778	0,346	-1	2	-1	-2	0	-6	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	36	-4	1
2,032	0,395	0	0	-3	-3	-3	-3	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	23	-4	-1
2,286	0,445	-1	0	1	0	2	0	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	0	-1	1
2,540	0,494	0	-1	0	0	0	2	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	0	-1	1

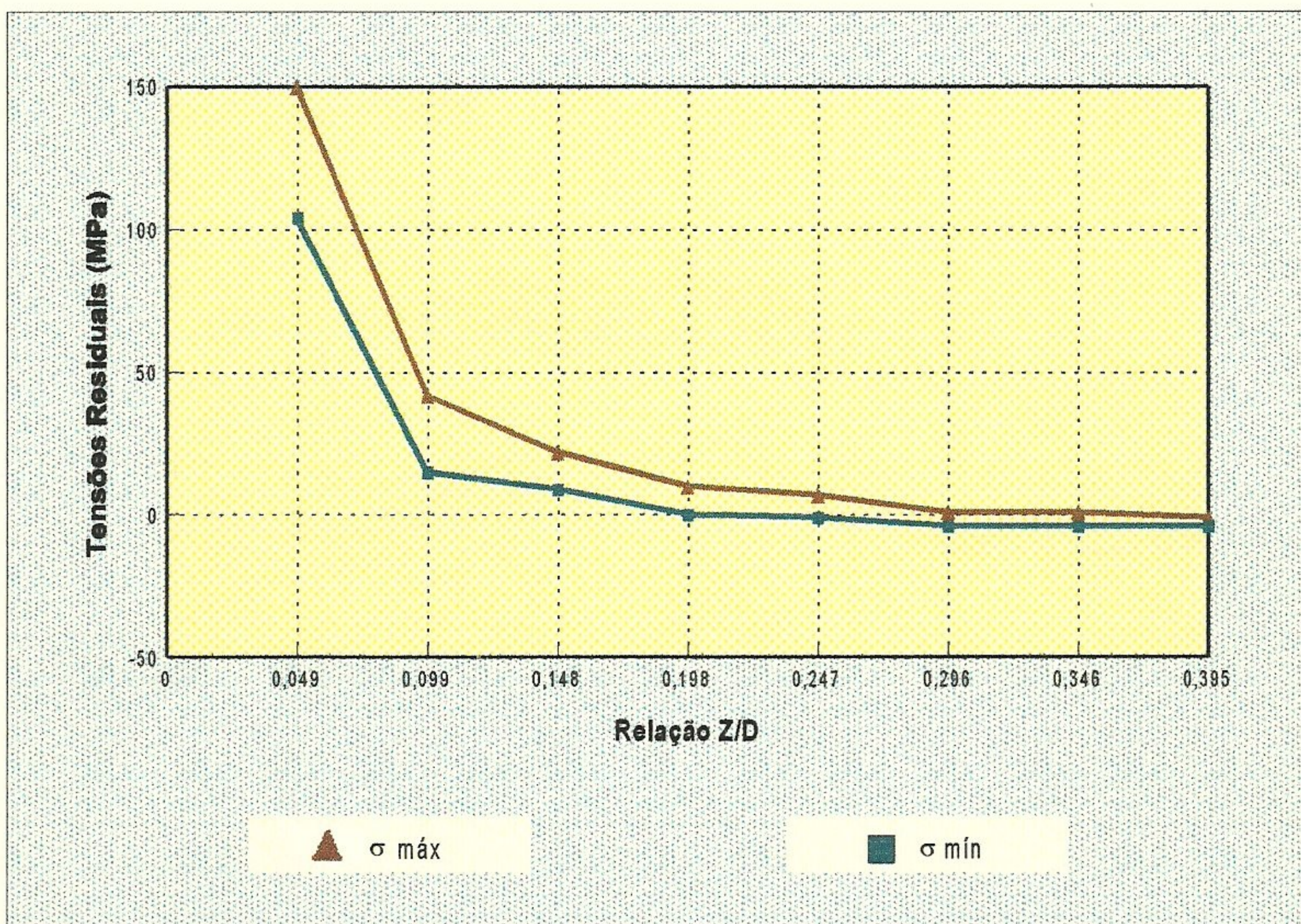


Gráfico 61 - Valores de tensões residuais para o ponto 16 do perfil 02.

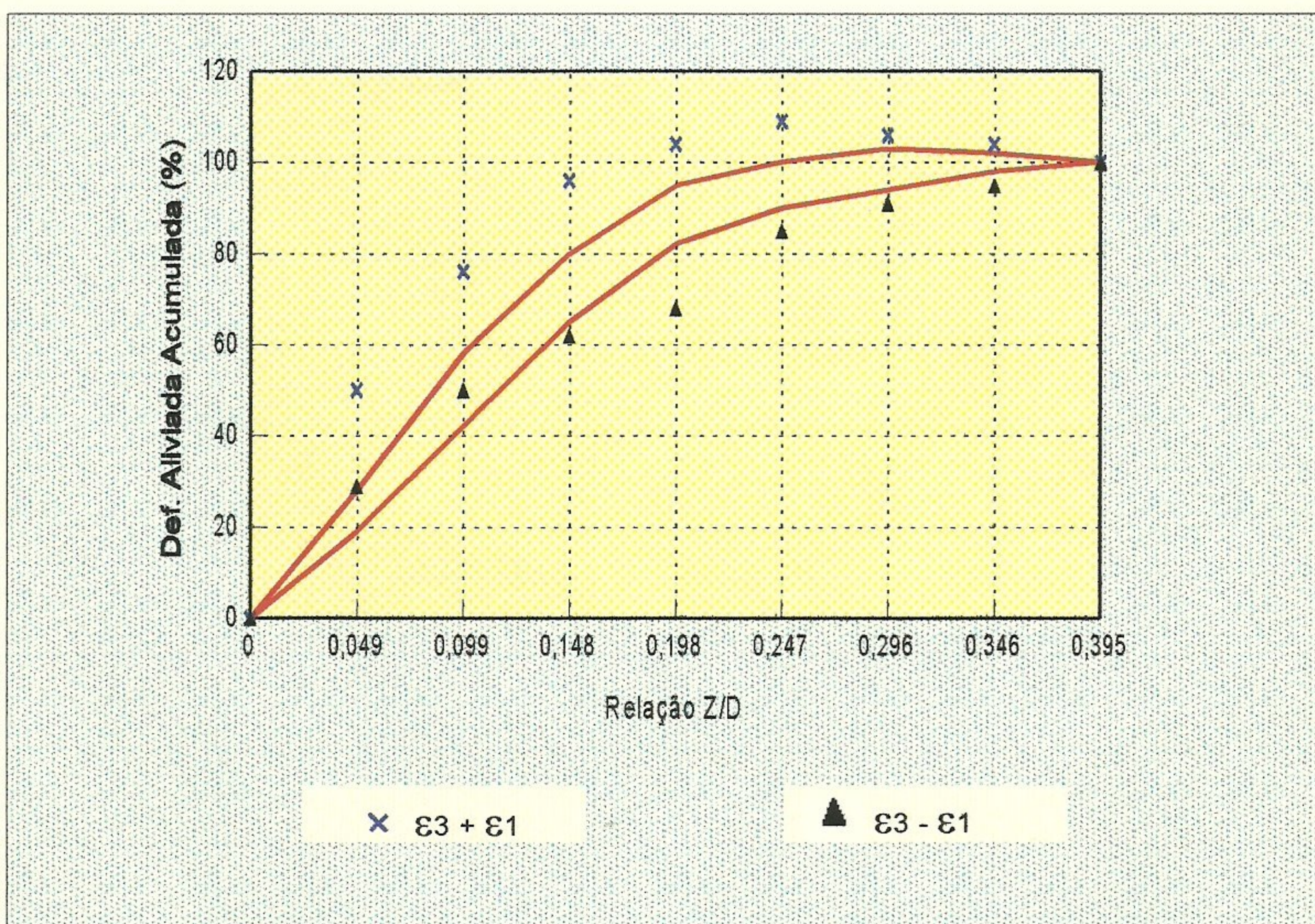


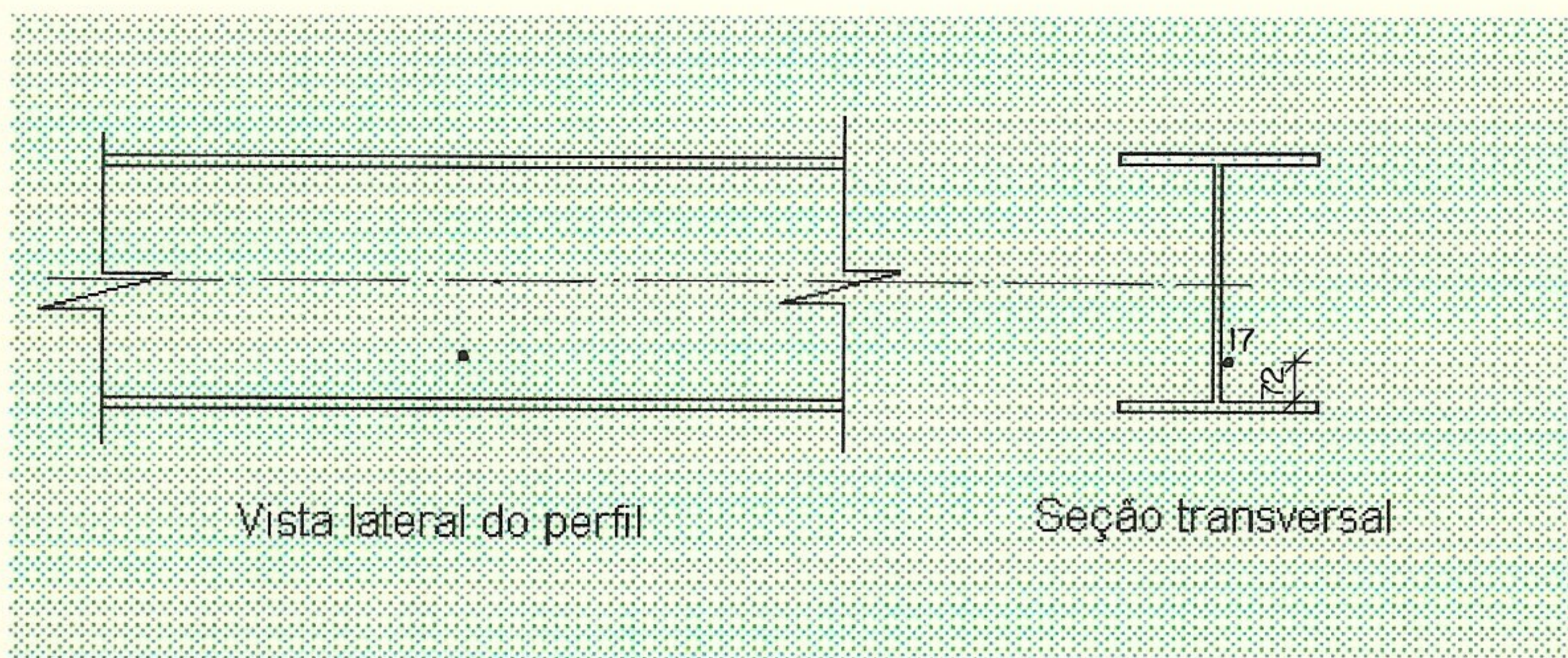
Gráfico 62 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 16 do perfil 02.

Tabela 63 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 17

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	150	-305	89	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	176	-286	107	
20	0,508	194	-267	111	Tensão de alimentação da roseta: 2,0033 V
30	0,762	206	-252	112	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
40	1,016	217	-243	114	
50	1,270	222	-236	111	Diâmetro do furo (D_o): 38 divisões
60	1,524	226	-232	110	
70	1,778	225	-234	107	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
80	2,032	225	-233	106	
90	2,286	224	-235	103	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
100	2,540	222	-236	102	
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 64 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	26	19	18	43	-8	6	0,025	0,058	7,77671E-08	1,39866E-07	-18	122	157
0,508	0,099	18	19	4	22	-14	-16	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	24	11	50
0,762	0,148	12	15	1	13	-11	-17	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	29	0	24
1,016	0,198	11	9	2	13	-9	-5	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	15	6	15
1,270	0,247	5	7	-3	2	-8	-12	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	28	-4	7
1,524	0,296	-443	4	-1	-444	442	-452	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	-23	-567	-82
1,778	0,346	446	-2	-3	443	-449	447	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	-22	83	552
2,032	0,395	0	1	-1	-1	-1	-3	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	36	-2	0
2,286	0,445	-1	-2	-3	-4	-2	0	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	0	-4	-2
2,540	0,494	-2	-1	-1	-3	1	-1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	-23	-3	-2

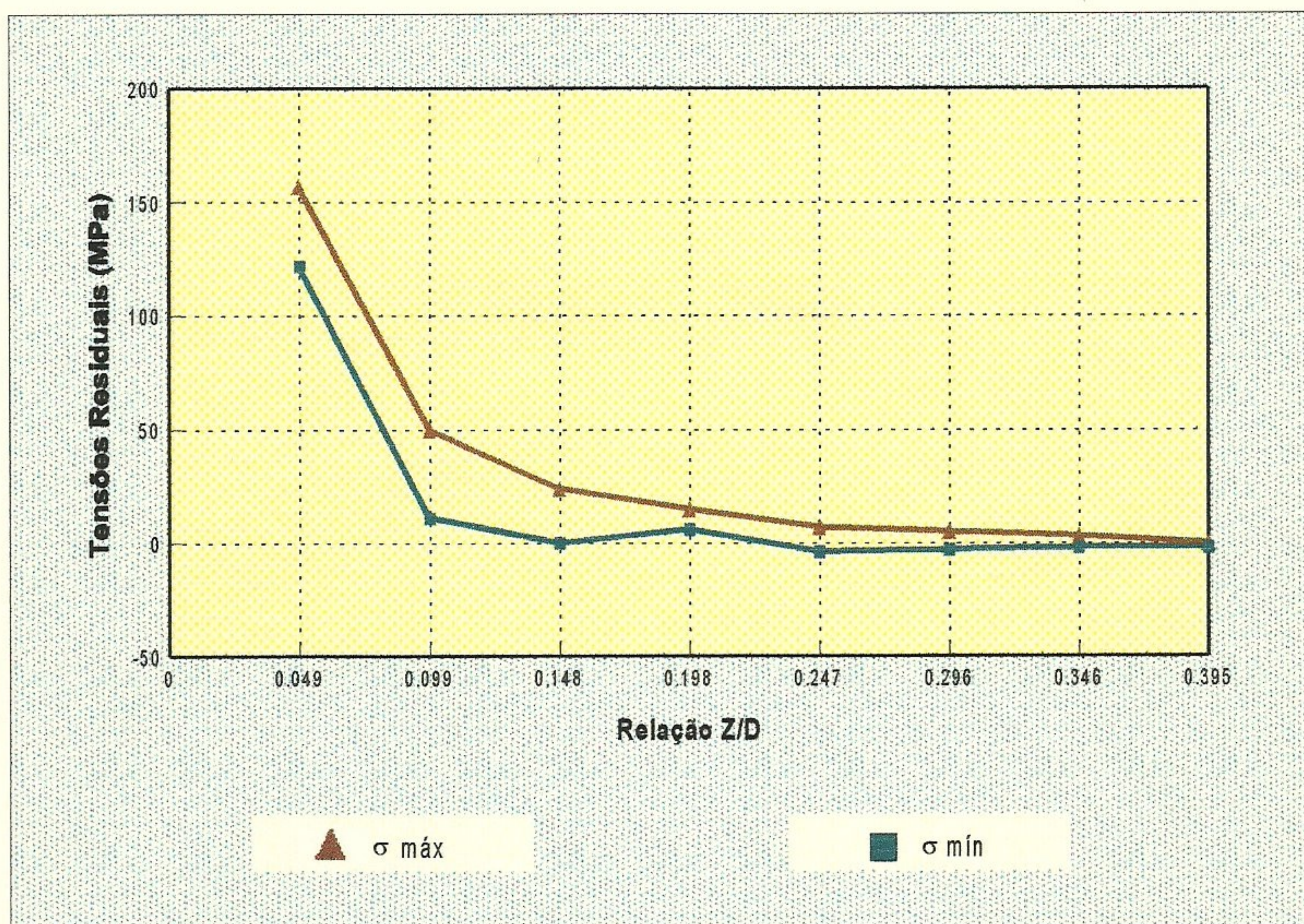


Gráfico 63 - Valores de tensões residuais para o ponto 17 do perfil 02.

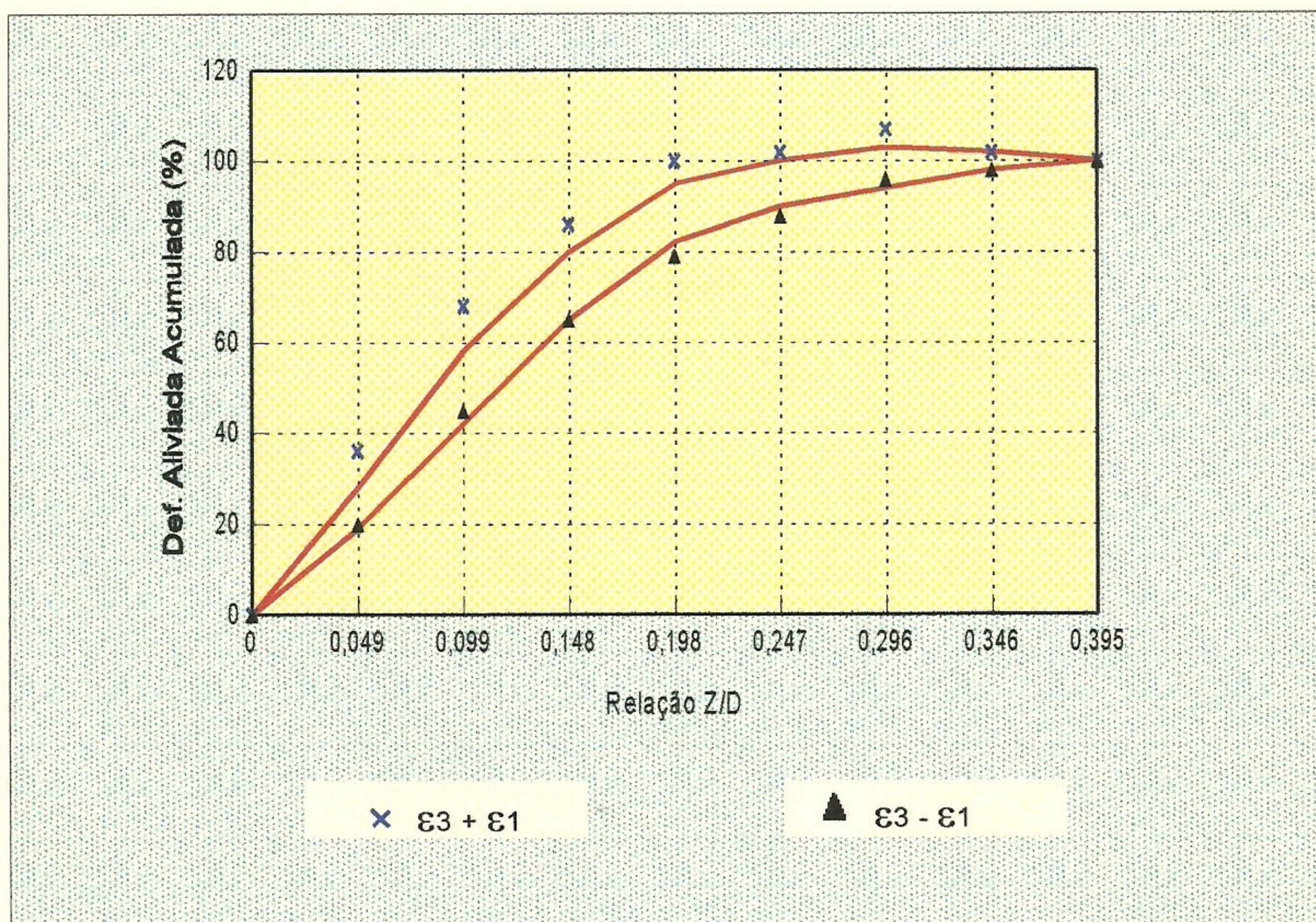


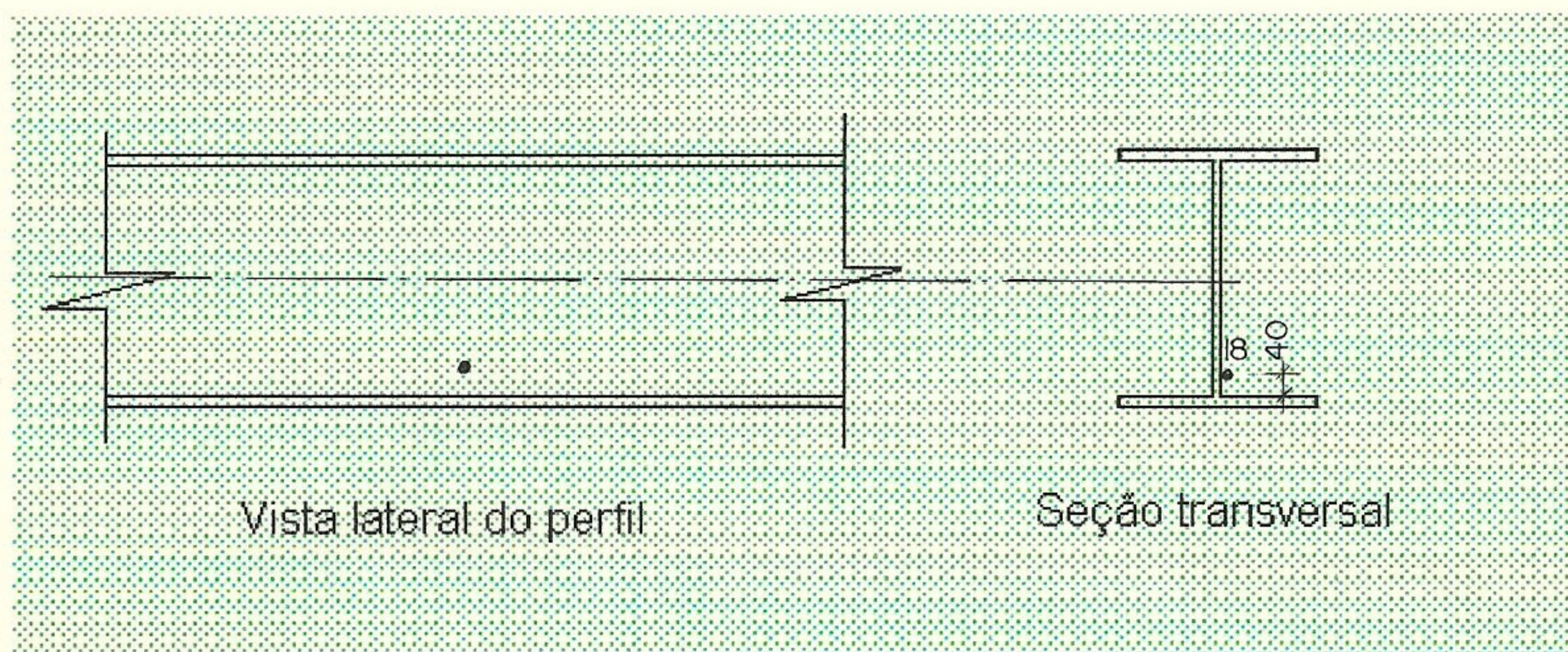
Gráfico 64 - Avaliação da uniformidade da distribuição de tensões residuais para o ponto 17 do perfil 02.

Tabela 65 - Dados experimentais obtidos para o perfil 02

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO: 18

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



PROFUNDIDADE DO FURO		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Z traços	Z (mm)	V1 (μV)	V2 (μV)	V3 (μV)	
0	0,000	-91	-544	-315	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2,02
10	0,254	-67	-526	-305	
20	0,508	-50	-505	-307	Tensão de alimentação da roseta: 2,0031 V
30	0,762	-38	-487	-307	
40	1,016	-27	-478	-309	Diâmetro característico da roseta (D): 5,14 mm
50	1,270	-24	-471	-312	
60	1,524	-23	-468	-313	Diâmetro do furo (D_0): 38 divisões
70	1,778	-21	-464	-315	
80	2,032	-20	-465	-315	Módulo de elasticidade do material (E): 208.000 MPa
90	2,286	-20	-464	-316	
100	2,540	-19	-463	-316	Coeficiente de Poisson do material (ν): 0,29
					Roseta segundo Norma ASTM E 837/94

Observações:

Tabela 66 - Planilha para cálculo de tensões residuais equivalentes e direções principais

Profundidade		Deformação Medida ($\mu\epsilon$)			Deformação Aliviada ($\mu\epsilon$)			Coeficiente					Tensão (MPa)	
Z(mm)	Z/D	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	$\epsilon_1 + \epsilon_3$	$\epsilon_3 - \epsilon_1$	$\epsilon_1 + \epsilon_3 - 2\epsilon_2$	a	b	A	B	α	σ_{min}	σ_{max}
0,254	0,049	24	18	10	34	-14	-2	0,025	0,058	7,77671E-08	1,3986E-07	4	83	133
0,508	0,099	17	21	-2	15	-19	-27	0,058	0,111	1,8042E-07	2,67663E-07	27	-10	51
0,762	0,148	12	18	0	12	-12	-24	0,084	0,171	2,61297E-07	4,12346E-07	32	-5	27
1,016	0,198	11	9	-2	9	-13	-9	0,099	0,219	3,07958E-07	5,28093E-07	17	0	15
1,270	0,247	3	7	-3	0	-6	-14	0,106	0,25	3,29732E-07	6,02845E-07	33	-6	6
1,524	0,296	1	3	-1	0	-2	-6	0,11	0,27	3,42175E-07	6,51073E-07	36	-2	2
1,778	0,346	2	4	-2	0	-4	-8	0,112	0,28	3,48396E-07	6,75187E-07	32	-3	3
2,032	0,395	1	-1	0	1	-1	3	0,113	0,282	3,51507E-07	7,83699E-07	-36	0	2
2,286	0,445	0	1	-1	-1	-1	-3	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	36	-2	2
2,540	0,494	1	1	0	1	-1	-1	0,114	0,283	3,54618E-07	6,82421E-07	23	0	1

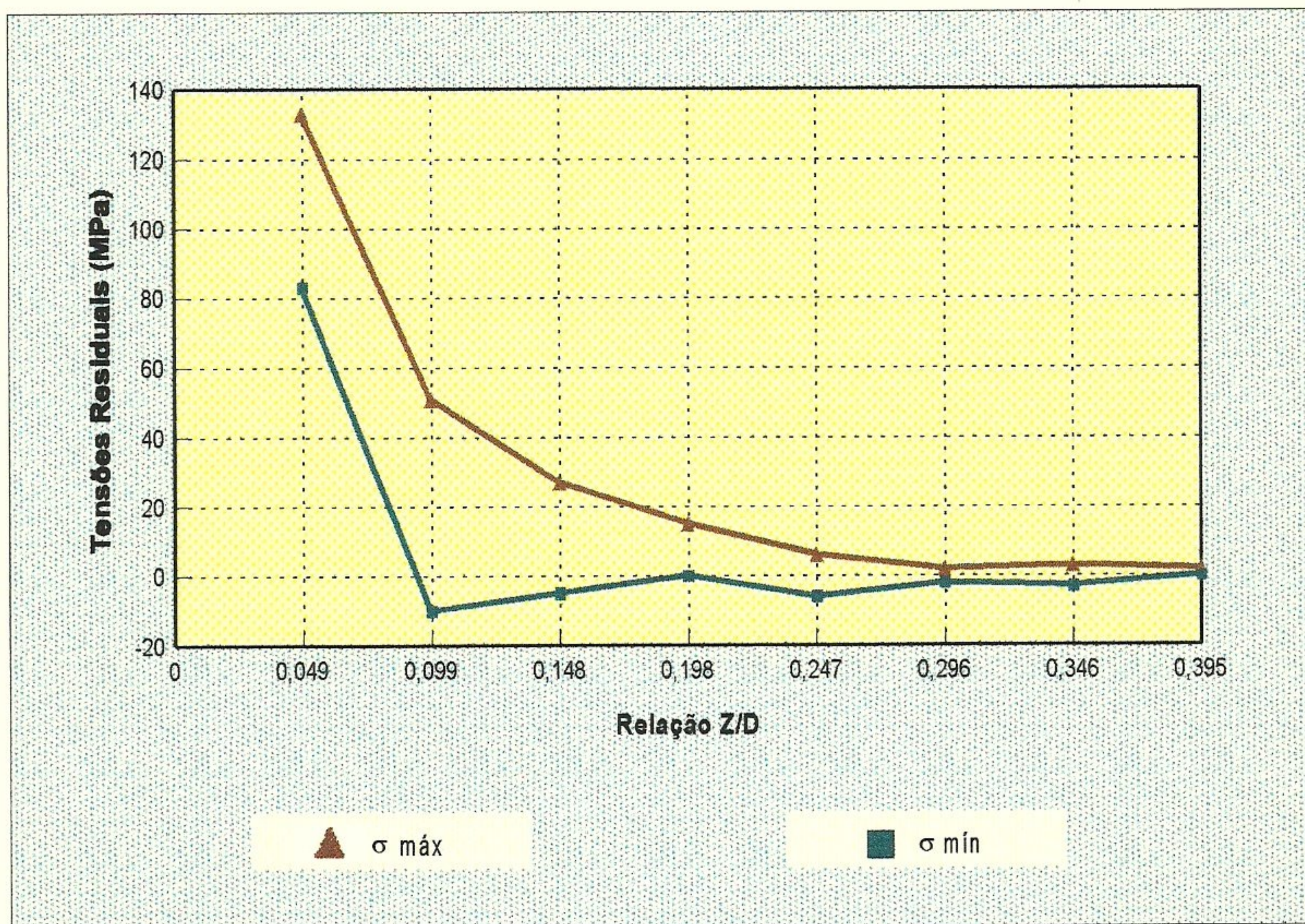


Gráfico 65 - Valores de tensões residuais para o ponto 18 do perfil 02.

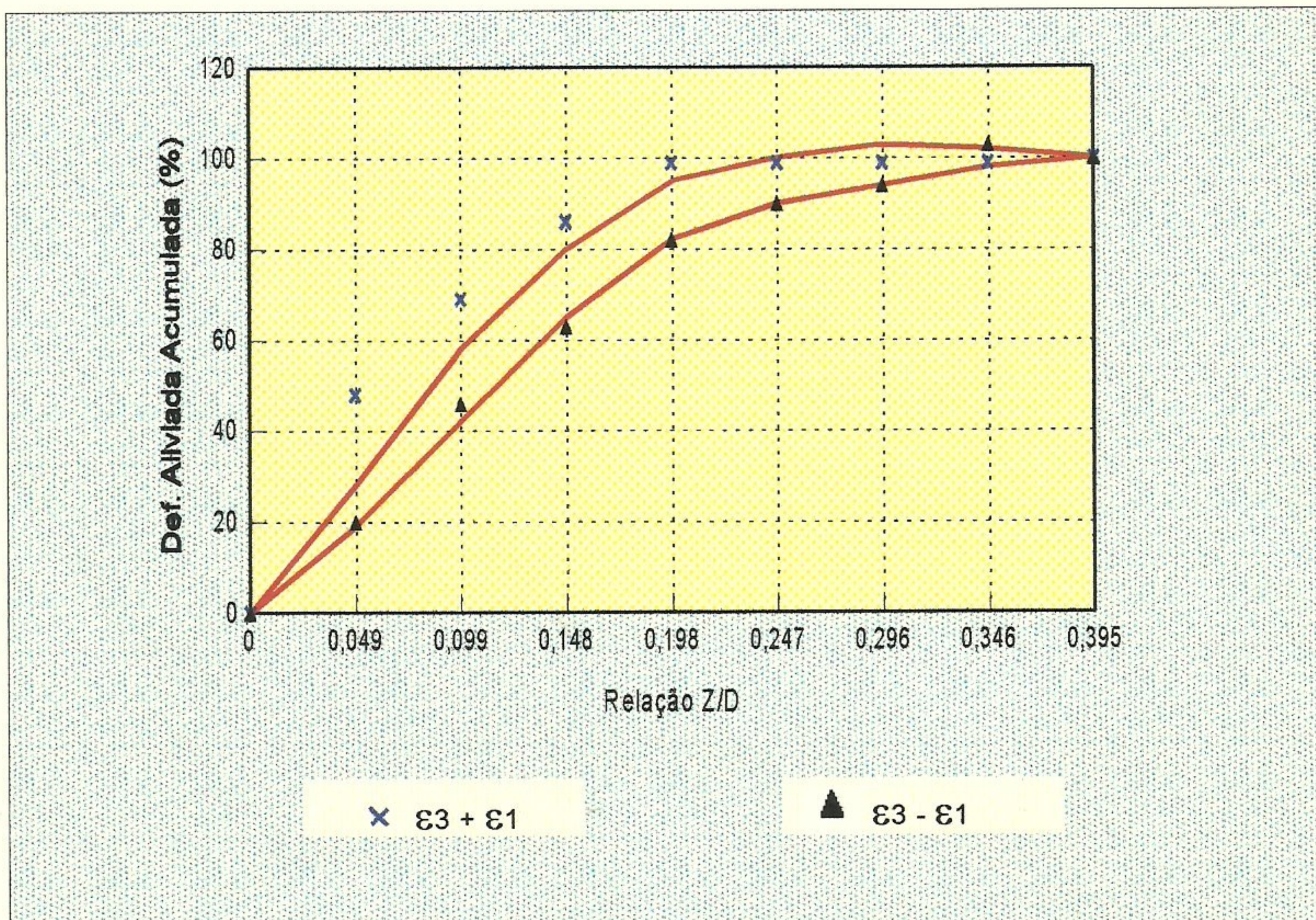


Gráfico 66 - Avaliação da uniformidade de distribuição de tensões residuais para o ponto 18 do perfil 02.

APÊNDICE II

Programa para Análise de Tensões Residuais Utilizando o
Método do Furo Central

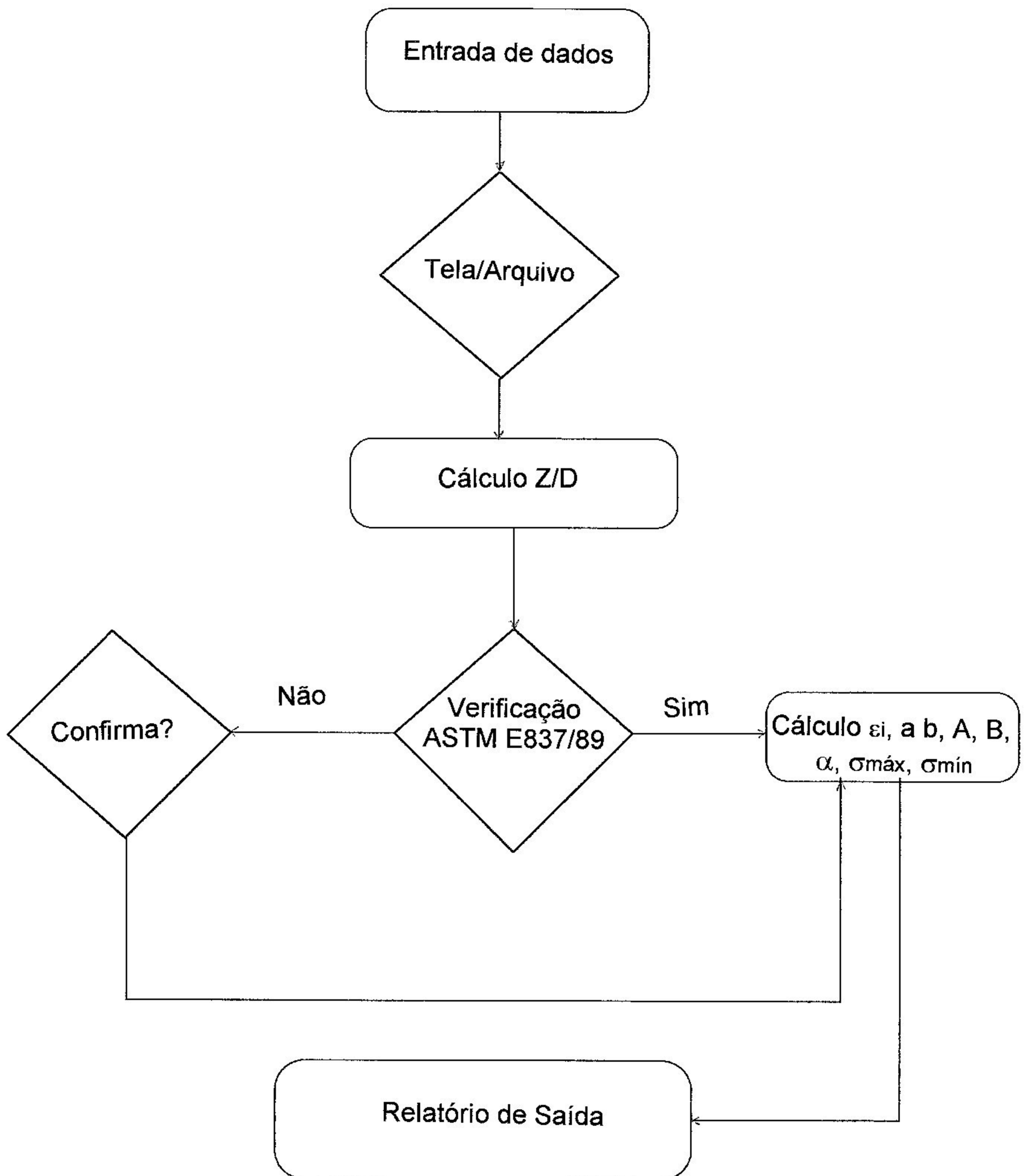


Figura 01 . Fluxograma para análise de tensões residuais

Program PANTE:

(PROGRAMA PARA ANALISE DE TENSOES RESIDUAIS UTILIZANDO O
METODO DO FURO CENTRAL

Variaveis:

dados de entrada

NE = numero de ensaios
PE = peca ensaiada
PO = ponto ensaiado
M = material
E = modulo de elasticidade
Ni = coeficiente de Poisson
DO = diametro do furo
D = diametro da roseta
FK = coeficiente de sensibilidade da roseta
V = voltagem inicial da roseta
NP = numero de profundidades do furo
MDM = matriz das deformacoes medidas
MDA = matriz das deformacoes aliviadas

variaveis de calculo

NuE = numero do ensaio
Z = profundidades do furo
DA = deformacao aliviada por incremento
DELTA = deformacao aliviada total
DAP = deformacao aliviada em porcentagem
MC = matriz de coeficientes
aa, bb, A, B = constantes de calibracao
ALFA = angulo de tensoes principais
SIGMA = tensao principal maxima/minima
X = relacao profundidade/diametro da roseta

}

uses

crt;

var

I, J, K, NE, E, NP, NuE : longint;
Aux, PE, PO, M : string [40];
Ni, DO, D, FK, V, al, b1, a1, b2 : real;
Z, aa, bb, A, B, ALFA, X : array [1..11] of real;
MDM, MDA, DA, DAP, MC : array [1..11,1..3] of real;
DELTA : array [1..3] of real;
SIGMA : array [1..11,1..3] of real;
T, S, TE, DE : text;

begin

assign (S, 'saida'); rewrite(S);
writeln (S, ' ANALISE DE TENSOES RESIDUAIS - DADOS PARA CONFERENCIA ');
{ leitura de dados }
assign (T, 'exemp');
reset (T);
readln (T, NE);
for K := 1 to NE do
begin
writeln (S);
writeln (S, ' Numero do Ensaio: ', K);
readln (T, PE); writeln (S, ' Peca ensaiada: ', PE);

```

readln (T, M);   readln (T, E1);
readln (T, Ni);
readln (T, D0);  writeln (S, ' Diametro do furo (divisoes): ', D0:1:4);
readln (T, D);   readln (T, V);  writeln (S, ' Voltagem inicial: ', D0:1:4);
readln (T, FK);  readln (T, NP);
writeln (S);
writeln (S, ' Prof. (div.)  E1      E2      E3');
for I := 1 to NP do
begin
  read (T, Z[I]);  write(S,Z[I]:6:3, ' ');
  for J := 1 to 3 do
  begin
    read(T, MDA[I,J]);
    { MDM[I,J] := MDA[I,J] * 4 / (FK*V*1000000); }
    MDM[I,J] := MDA[I,J] / 1000000;
    write(S,MDA[I,J]:8:0, ' ');
  end;
  writeln (S);  readln(T);
end;
end;
{ Calculo das deformacoes aliviadas }
for K := 1 to NE do
begin
  str(K,aux);
  assign (TE, 'tensao'+aux);  rewrite(TE);
  assign (DE, 'def'+aux);  rewrite(DE);
  writeln (S);
  writeln(S, ' ANALISE DE TENSORES RESIDUAIS PELO METODO DO FURO CENTRAL');
  writeln (S);
  writeln (S, ' Numero do ensaio: ',K);  writeln (S);
  writeln (S, ' Peca ensaiada: ',PE);  writeln (S);
  writeln (S, ' Ponto ensaiado: ',PO);  writeln (S);
  writeln (S, ' Material: ',M);  writeln (S);
  writeln (S, ' Diametro do furo: ',D0:1:3);  writeln (S);
  writeln (S, ' Diametro da roseta: ',D:1:3);  writeln (S);
  writeln (S, ' Coefficiente de sensibilidade da roseta: ',FK:1:3);  writeln (S);
  writeln (S, ' Modulo de elasticidade longitudinal: ',E, ' MPa');  writeln (S);
  writeln (S, ' Coefficiente de Poisson: ',Ni:1:3);  writeln (S);
  writeln (S);
  writeln (S);

  for I := 1 to NP do
  begin
    {Apos o teste (exemplo) multiplicar o segundo membro desta equacao
    por 4/(FK*V)- Atencao para E-3 ou E-6}
    DA [1,1] :=(MDM[I,1] + MDM[I,3])*4/(FK*V);
    DA [1,2] :=(MDM[I,3] - MDM[I,1])*4/(FK*V);
    DA [1,3] :=(MDM[I,3] + MDM[I,1] - 2*MDM[I,2])*4/(FK*V);
  end;
  for I := 1 to 3 do
    DELTA[I] := DA[NP,I] - DA[1,I];
  for I := 1 to NP do
    for J := 1 to 3 do
      DAP [I,J] := abs(DA[I,J] / DELTA[J] * 100);
  { Calculo dos coeficientes aa e bb (constantes de calibracao -

```

definidos pelo Metodo dos Elementos Finitos por Schafer e apresentados no Boletim Tecnico do RS-200 da Micro-Measurements

```

for I := 1 to NP do
begin
}
for I:= 2 to NP do
begin
X[I] := Z[I]/D;
if (D0/D < 0.30) or (D0/D > 0.50) then begin
writein (S, ' * '); writein; end;

if (D0/D >= 0.30) and (D0/D < 0.32) then
begin
a1 := -73.4*exp(5*ln(X[I])) + 117*exp(4*ln(X[I])) - 52.3*exp(3*ln(X[I]))
+ 7.84*sqr(X[I]) + 0.195*X[I] + 0.00137;
b1 := 333*exp(5*ln(X[I])) - 170*exp(4*ln(X[I])) + 12.1*exp(3*ln(X[I]))
+ 3.27*sqr(X[I]) + 0.780*X[I] + 0.00212;
a2 := 106*exp(5*ln(X[I])) - 3.30*exp(4*ln(X[I])) - 24.8*exp(3*ln(X[I]))
+ 5.32*sqr(X[I]) + 0.347*X[I] + 0.00102;
b2 := -993*exp(5*ln(X[I])) + 729*exp(4*ln(X[I])) - 205*exp(3*ln(X[I]))
+ 25.2*sqr(X[I]) + 0.0996*X[I] + 0.00857;
aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.30) + a1;
bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.30) + b1;
end;
if (D0/d >= 0.32) and (D0/d < 0.34) then
begin
a1 := 106*exp(5*ln(X[I])) - 3.30*exp(4*ln(X[I])) - 24.8*exp(3*ln(X[I]))
+ 5.32*sqr(X[I]) + 0.347*X[I] + 0.00102;
b1 := -993*exp(5*ln(X[I])) + 729*exp(4*ln(X[I])) - 205*exp(3*ln(X[I]))
+ 25.2*sqr(X[I]) + 0.0996*X[I] + 0.00857;
a2 := -460*exp(5*ln(X[I])) + 374*exp(4*ln(X[I])) - 114*exp(3*ln(X[I]))
+ 14.0*sqr(X[I]) + 0.130*X[I] + 0.00347;
b2 := -247*exp(5*ln(X[I])) + 258*exp(4*ln(X[I])) - 101*exp(3*ln(X[I]))
+ 15.5*sqr(X[I]) + 0.608*X[I] + 0.00651;
aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.32) + a1;
bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.32) + b1;
end;
if (D0/d >= 0.34) and (D0/d < 0.36) then
begin
a1 := -460*exp(5*ln(X[I])) + 374*exp(4*ln(X[I])) - 114*exp(3*ln(X[I]))
+ 14.0*sqr(X[I]) + 0.130*X[I] + 0.00347;
b1 := -247*exp(5*ln(X[I])) + 258*exp(4*ln(X[I])) - 101*exp(3*ln(X[I]))
+ 15.5*sqr(X[I]) + 0.608*X[I] + 0.00651;
a2 := -67.5*exp(5*ln(X[I])) + 124*exp(4*ln(X[I])) - 56.6*exp(3*ln(X[I]))
+ 8.68*sqr(X[I]) + 0.423*X[I] + 0.00192;
b2 := -490*exp(5*ln(X[I])) + 437*exp(4*ln(X[I])) - 154*exp(3*ln(X[I]))
+ 22.8*sqr(X[I]) + 0.333*X[I] + 0.0106;
aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.34) + a1;
bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.34) + b1;
end;
if (D0/d >= 0.36) and (D0/D < 0.38) then
begin
a1 := -67.5*exp(5*ln(X[I])) + 124*exp(4*ln(X[I])) - 56.6*exp(3*ln(X[I]))
+ 8.68*sqr(X[I]) + 0.423*X[I] + 0.00192;
b1 := -490*exp(5*ln(X[I])) + 437*exp(4*ln(X[I])) - 154*exp(3*ln(X[I]))
+ 22.8*sqr(X[I]) + 0.333*X[I] + 0.0106;

```

```

      + 14.1*sqr(X[I]) + 0.293*X[I] + 0.00374;
b2 := - 5.26*exp(5*ln(X[I])) + 158*exp(4*ln(X[I])) - 99.3*exp(3*ln(X[I]))
      + 18.2*sqr(X[I]) + 0.704*X[I] + 0.00746;
aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.36) + a1;
bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.36) + b1;
end;
if (D0/d >= 0.38) and (d0/d < 0.40) then
begin
a1 := - 308*exp(5*ln(X[I])) + 303*exp(4*ln(X[I])) - 107*exp(3*ln(X[I]))
      + 14.1*sqr(X[I]) + 0.293*X[I] + 0.00374;
b1 := - 5.26*exp(5*ln(X[I])) + 158*exp(4*ln(X[I])) - 99.3*exp(3*ln(X[I]))
      + 18.2*sqr(X[I]) + 0.704*X[I] + 0.00746;
a2 := - 127*exp(5*ln(X[I])) + 198*exp(4*ln(X[I])) - 89.6*exp(3*ln(X[I]))
      + 13.5*sqr(X[I]) + 0.361*X[I] + 0.00411;
b2 := + 489*exp(5*ln(X[I])) - 230*exp(4*ln(X[I])) + 7.07*exp(3*ln(X[I]))
      + 5.73*sqr(X[I]) + 1.46*X[I] + 0.00168;
aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.38) + a1;
bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.38) + b1;
end;
if (D0/d >= 0.40) and (D0/d < 0.42) then
begin
a1 := - 127*exp(5*ln(X[I])) + 198*exp(4*ln(X[I])) - 89.6*exp(3*ln(X[I]))
      + 13.5*sqr(X[I]) + 0.361*X[I] + 0.00411;
b1 := + 489*exp(5*ln(X[I])) - 230*exp(4*ln(X[I])) + 7.07*exp(3*ln(X[I]))
      + 5.73*sqr(X[I]) + 1.46*X[I] + 0.00168;
a2 := - 733*exp(5*ln(X[I])) + 615*exp(4*ln(X[I])) - 191*exp(3*ln(X[I]))
      + 23.5*sqr(X[I]) + 0.134*X[I] + 0.00656;
b2 := - 96.4*exp(5*ln(X[I])) + 231*exp(4*ln(X[I])) - 121*exp(3*ln(X[I]))
      + 19.9*sqr(X[I]) + 1.13*X[I] + 0.00336;
aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.40) + a1;
bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.40) + b1;
end;
if (D0/d >= 0.42) and (D0/d < 0.44) then
begin
a1 := - 733*exp(5*ln(X[I])) + 615*exp(4*ln(X[I])) - 191*exp(3*ln(X[I]))
      + 23.5*sqr(X[I]) + 0.134*X[I] + 0.00656;
b1 := - 96.4*exp(5*ln(X[I])) + 231*exp(4*ln(X[I])) - 121*exp(3*ln(X[I]))
      + 19.9*sqr(X[I]) + 1.13*X[I] + 0.00336;
a2 := - 585*exp(5*ln(X[I])) + 498*exp(4*ln(X[I])) - 157*exp(3*ln(X[I]))
      + 18.7*sqr(X[I]) + 0.533*X[I] + 0.00291;
b2 := - 743*exp(5*ln(X[I])) + 623*exp(4*ln(X[I])) - 205*exp(3*ln(X[I]))
      + 26.8*sqr(X[I]) + 1.15*X[I] + 0.00406;
aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.42) + a1;
bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.42) + b1;
end;

if (D0/d >= 0.44) and (D0/d < 0.46) then
begin
a1 := - 585*exp(5*ln(X[I])) + 498*exp(4*ln(X[I])) - 157*exp(3*ln(X[I]))
      + 18.7*sqr(X[I]) + 0.533*X[I] + 0.00291;
b1 := - 743*exp(5*ln(X[I])) + 623*exp(4*ln(X[I])) - 205*exp(3*ln(X[I]))
      + 26.8*sqr(X[I]) + 1.15*X[I] + 0.00406;
a2 := - 819*exp(5*ln(X[I])) + 657*exp(4*ln(X[I])) - 196*exp(3*ln(X[I]))
      + 22.5*sqr(X[I]) + 0.551*X[I] + 0.00337;

```

```

    b2 := - 1203*exp(5*ln(X[I])) + 984*exp(4*ln(X[I])) - 310*exp(3*ln(X[I]))
          + 39.8*sqr(X[I]) + 0.764*X[I] + 0.00875;
    aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.44) + a1;
    bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.44) + b1;
end;
if (D0/d >= 0.46) and (D0/d < 0.48) then
begin
    a1 := - 819*exp(5*ln(X[I])) + 657*exp(4*ln(X[I])) - 196*exp(3*ln(X[I]))
          + 22.5*sqr(X[I]) + 0.551*X[I] + 0.00337;
    b1 := - 1203*exp(5*ln(X[I])) + 984*exp(4*ln(X[I])) - 310*exp(3*ln(X[I]))
          + 39.8*sqr(X[I]) + 0.764*X[I] + 0.00875;
    a2 := - 723*exp(5*ln(X[I])) + 623*exp(4*ln(X[I])) - 196*exp(3*ln(X[I]))
          + 23.0*sqr(X[I]) + 0.662*X[I] + 0.00220;
    b2 := - 1540*exp(5*ln(X[I])) + 1191*exp(4*ln(X[I])) - 347*exp(3*ln(X[I]))
          + 40.3*sqr(X[I]) + 1.20*X[I] - 0.00443;
    aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.46) + a1;
    bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.46) + b1;
end;
if (D0/d >= 0.48) and (D0/d <= 0.50) then
begin
    a1 := - 723*exp(5*ln(X[I])) + 623*exp(4*ln(X[I])) - 196*exp(3*ln(X[I]))
          + 23.0*sqr(X[I]) + 0.662*X[I] + 0.00220;
    b1 := - 1540*exp(5*ln(X[I])) + 1191*exp(4*ln(X[I])) - 347*exp(3*ln(X[I]))
          + 40.3*sqr(X[I]) + 1.20*X[I] - 0.00443;
    a2 := - 1104*exp(5*ln(X[I])) + 895*exp(4*ln(X[I])) - 264*exp(3*ln(X[I]))
          + 29.2*sqr(X[I]) + 0.662*X[I] + 0.00164;
    b2 := - 2197*exp(5*ln(X[I])) + 1672*exp(4*ln(X[I])) - 474*exp(3*ln(X[I]))
          + 34*sqr(X[I]) + 0.943*X[I] + 0.0050;
    aa[I] := (a2 - a1)/0.02 * (D0/D - 0.48) + a1;
    bb[I] := (b2 - b1)/0.02 * (D0/D - 0.48) + b1;
end;
A[I] := (1 + Ni) / (2 * E) * aa[I];
B[I] := bb[I] / (2 * E);
end;
( Calculo das direcoes principais e tensoes equivalentes )
for I := 1 to NP do
    ALFA[I] := 1/2 * arctan( (DA[I,1] - 2*BA[I,2] + DA[I,3]) /
                          (DA[I,3] - DA[I,1]) );
for I := 2 to NP do
begin
    SIGMA[I,1] := (MDM[I,1] + MDM[I,3]) / (4 * A[I]) + sqrt((sqr(MDM[I,3] -
    MDM[I,1]) + sqr(MDM[I,3] + MDM[I,1] - 2*MDM[I,2])) /
    (4 * B[I]));
    SIGMA[I,2] := (MDM[I,1] + MDM[I,3]) / (4 * A[I]) - sqrt((sqr(MDM[I,3] -
    MDM[I,1]) + sqr(MDM[I,3] + MDM[I,1] - 2*MDM[I,2])) /
    (4 * B[I]));
end;
writeln (S, '          ANALISE DE TENSOES RESIDUAIS UTILIZANDO O METODO DO FURO CENTRAL          ');
writeln (S, '-----');
writeln (S, ' Profund.   Deformacao Medida   Deformacao Aliviada   Alfa   sigma   sigma ');
writeln (S, ' Z(mm)  Z/D   E1   E2   E3   E3+E1  E3-E1  E3+E1-2E2 (Graus) (MPa) (MPa) ');
writeln (S, '-----');

for I := 1 to NP do
begin
    writeln (S, Z[I]:5:2, (Z[I]/D):7:3, MDM[I,1]*1000000:5:0, MDM[I,2]*1000000:6:0, ' ');

```

```

        DA[I,3]*1000000:8:0, ' ',alfa[I]:8:0, ' ',SIGMA[I,1]*7.029/1000:8:0, ' ',SIGMA[I,2]*7.029/1000:8:0,
writeln (S, DAP[I,1]:38:0, ' ', DAP[I,2]:6:0, ' ', DAP[I,3]:7:0);

{ writeln (S, ' ',41.4*A[I]*1E8:5:3, ' ',4*B[I]*1E8:5:3),aa[I]:11:3,
' ',bb[I]:5:3, ' ',A[I]*1E8:5:3, ' ',B[I]*1E8:5:3,;)}
writeln (S);
writeln (TE, Z[I]/D:7:3, SIGMA[I,1]*7.029/1000:8:0, ' ',SIGMA[I,2]*7.029/1000:8:0);
if (abs(alfa[I]) > 22.5) and (abs(alfa[I]) < 67.5)
    then writeln (DE, Z[I]/D:7:3, DA[I,1]*1000000:7:0, DA[I,3]*1000000:7:0)
    else writeln (DE, Z[I]/D:7:3, DA[I,1]*1000000:7:0, DA[I,2]*1000000:7:0);
end;

end;

close (T); close(S); close (TE); close(DE);

end.

```


APÊNDICE III

Circuito Elétrico Empregado para
Monitoração dos Ensaios

1 - Ponte de Wheatstone

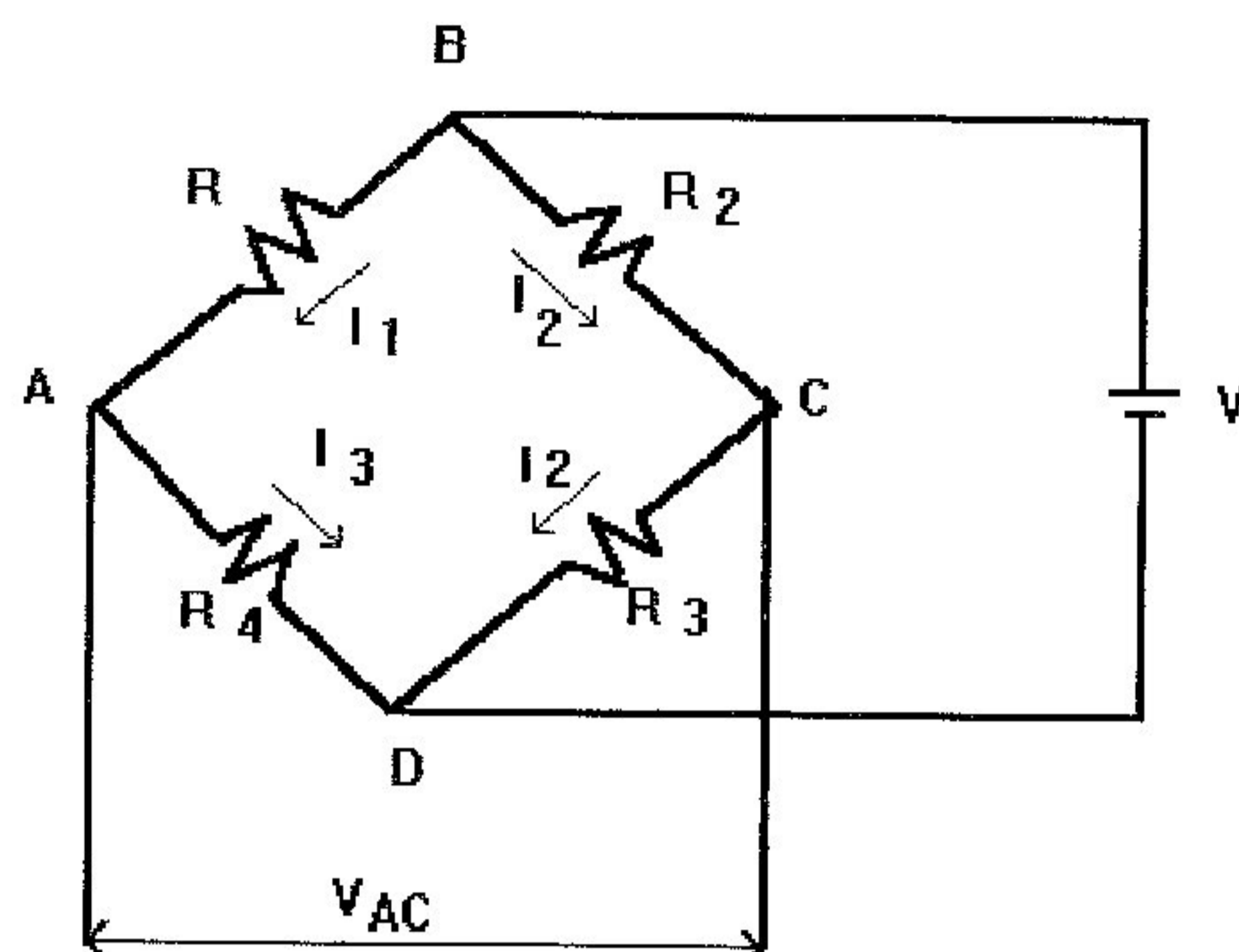


Figura 01 - Circuito elétrico empregado para realização dos ensaios

Na figura 01 temos:

- V: Tensão de alimentação do circuito;
- V_{AC} : Tensão de saída do circuito;
- R_i : Resistência elétrica (extensômetro).

A tensão de saída do circuito é dada por:

$$\Delta V_{AC} = V K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) / 4 \quad (\text{Eq. 01})$$

onde K é o coeficiente de sensibilidade do extensômetro e ε_i é a deformação associada ao ponto onde é fixado o extensômetro.

APÊNDICE IV

Instrumentação e Corte dos Perfis Ensaaiados

1 - Considerações preliminares

Conforme exposto no capítulo 4, não era possível a instalação do aparelho de alinhamento e usinagem do furo entre as mesas dos perfis ensaiados, devido às suas dimensões. Desta forma, após a realização dos ensaios possíveis para todos os pontos, foi feito o corte a maçarico da aba oposta àquela que se pretendia ensaiar.

Durante o corte foram instalados termopares e extensômetros para avaliar uma possível variação na temperatura e redistribuição de tensões residuais na seção transversal.



Figura 01 - Corte em perfil instrumentado para avaliação de variação de temperatura e de deformação

Termopares:

Foi feita uma medição da variação de temperatura antes, durante e após o corte a maçarico. Os resultados indicaram uma variação máxima de 12° C para o perfil 01 e de 20° C para o perfil 02 que, sob o ponto de vista da introdução ou alívio de deformação, pode ser desconsiderada.

Extensômetros:

Foram instalados extensômetros em 03 direções (configuração de roseta) na mesa oposta ao corte, ou seja, em local onde se situariam os pontos a serem ensaiados.

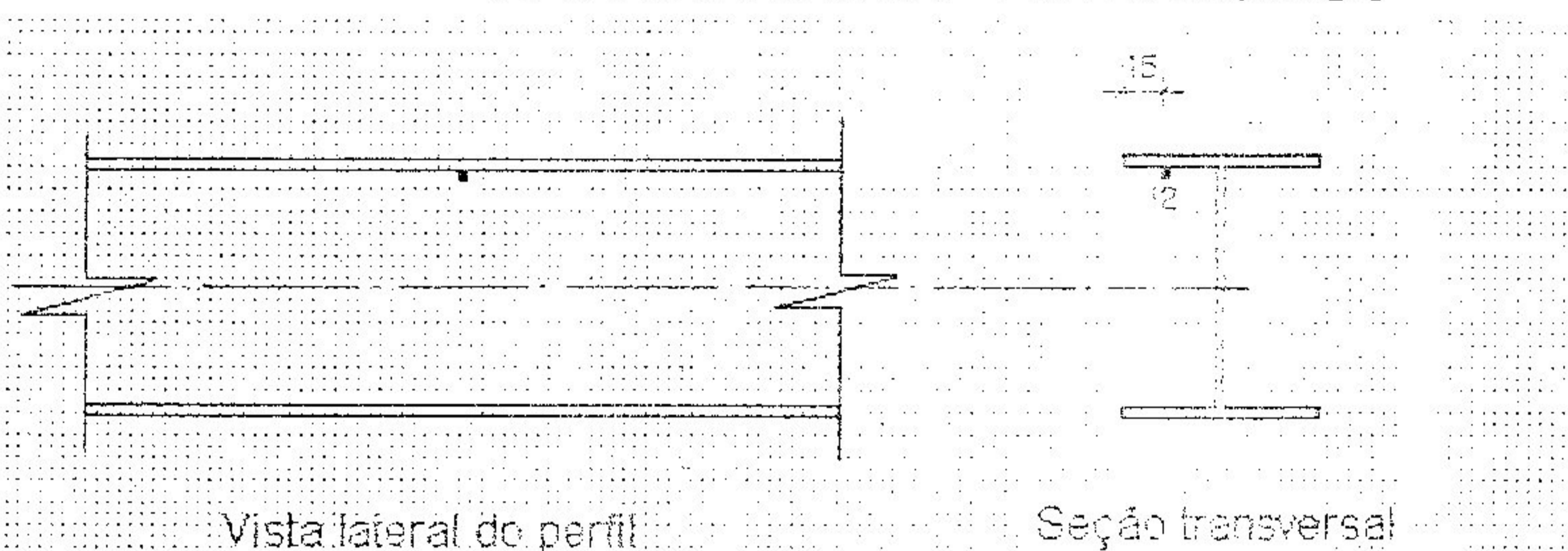
Foram feitas leituras de voltagem inicial (antes do início do corte), durante o corte da mesa, imediatamente após o corte e após o resfriamento do perfil até a temperatura ambiente (03 horas após o corte). Os valores obtidos são apresentados na Tabela 01.

Tabela 01 - Dados experimentais obtidos durante corte do perfil 01

LOCAL DO ENSAIO: Laboratório CDTN

NÚMERO DO PONTO:

POSICIONAMENTO DOS EXTENSÔMETROS - PONTO ENSAIADO



TEMPO (após início)		LEITURA DE VOLTAGEM DOS EXTENSÔMETROS			CARACTERÍSTICAS DA ROSETA E DO ENSAIO
Horas	Minutos	V1 (μ V)	V2 (μ V)	V3 (μ V)	
0	0	60	-321	96	Coeficiente de sensibilidade (Fator gage) - F_k : 2.02 Tensão de alimentação da roseta: 3.00 V
0	5	62	-317	96	
0	15	68	-325	97	
3	15	61	-319	95	
					Módulo de elasticidade do material (E): 208000 MPa
					Coefficiente de Poisson do material (ν): 0.29

Observações:

Como resultado do corte extraiu-se uma amostra de aço para realização de ensaio de tração. O relatório com caracterização do material é apresentado no Certificado de Ensaio CDTN RC-AT1-027/95 apresentado neste Apêndice IV.

TRAÇÃO/COMPRESSÃO – CERTIFICADO DE ENSAIO	número: RC-AT1-027/95	página: 1/1
--	--------------------------	----------------

solicitante:
CEFET/FLÁVIO

DETALHES DO MATERIAL

referência: Pedido verbal	estado do fornecimento: usado <input checked="" type="checkbox"/> não usado <input type="checkbox"/>	seleção da amostra: CDTN <input type="checkbox"/> solicitante <input checked="" type="checkbox"/>
material: Aço carbono	localização do CP: -	

descrição(soldado, fundido, forjado, t.térmico):
-

DADOS TÉCNICOS


norma: ASTM E 8	tipo de amostra: Chapa
equipamento: KRATOS	capacidade (N): 980.000
velocidade cabeçote (cm/min): -	temperatura de ensaio em (°K): 298
tempo de permanência na temperatura: -	atmosfera de ensaio: -
extensômetro: -	
dimensões:	
diâmetro: mm	espessura: 13 mm
largura: 40,5 mm	comprimento: 250 mm
seção transversal: 526,5 mm ²	


dados complementares:


RESULTADOS:

CP	ÁREA	LIMITE ESCOAMENTO (0,2%)	LIMITE RESISTÊNCIA	ALONGAMENTO
Nº	[mm ²]	[kgf/mm ²]	[MPa]	[kgf/mm ²]
01	526,5	32,4	317	50,1
			490	24,8

Belo Horizonte, 06 de dezembro de 1995.


Nirlando Antônio Rocha
Executor


Roberto F. Di Lorenzo
Emitente


Marco A. D. Quinan
Aprovação