

LEVANTAMENTO DAS CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO DE PRODUTOS DA  
CSN PARA ESTAMPAGEM E CONFORMAÇÃO. (1)

Engº Radamanto Alves do Nascimento (2)  
Engº Mozart de Castro França (3)  
Engº Paulo Cesar da Silva (4)  
T.I. Célio de Jesus Marcelo (5)

R E S U M O

O trabalho aborda o levantamento de curvas limite de conformação (CLC) de três produtos planos, fabricados pela CSN, para estampagem extra profunda.

Foi adotado o ensaio de conformação de corpos de prova octogonais e o ensaio de tração com corpos de prova de formatos especiais, visando a cobertura satisfatória dos dois ramos da CLC.

Foi feita uma lubrificação variada no ensaio de conformação e observada sua influência no posicionamento dos pontos obtidos.

- 
- (1) Contribuição Técnica ao XVI Simpósio da COLAM - Niterói, RJ, outubro 1979.
  - (2) Membro da ABM, Engenheiro Industrial e Metalúrgico; Pesquisador B do Centro de Pesquisas da CSN.
  - (3) Membro da ABM, Engenheiro de Minas e Metalurgia; Superintendente Geral do Centro de Pesquisas da CSN.
  - (4) Membro da ABM, Engenheiro Industrial e Metalúrgico; Pesquisador Assistente do Centro de Pesquisas da CSN.
  - (5) Técnico de Indústria do Centro de Pesquisas da CSN.

1.

## INTRODUÇÃO

Foram escolhidos três produtos da CSN como representativos dos materiais destinados à estamparia em geral: chapas finas laminadas a frio e recozidas (CFF), folhas de flandres de tempera T1 (FL) e chapas finas revestidas de zinco por processo contínuo (CZ). Todos os produtos escolhidos destinam-se à estampagem extra-profunda, são resistentes ao envelhecimento e o aço base é acalmado ao alumínio. Esta escolha deve-se ao pouco conhecimento que se pode obter em literatura sobre CLC de chapas recobertas e, por outro lado, ao grande número de trabalhos publicados que tratam de chapas finas laminadas a frio, semelhantes à CFF citada. Pretende-se mostrar, paralelamente, que fatores como forma de grão, coeficiente de anisotropia normal e espessura influenciam no posicionamento da curva, mesmo em se tratando de materiais diferentemente processados. Mostra-se também que a lubrificação, quando corretamente utilizada, possibilita que se possa varrer uma faixa bastante extensa dos valores de deformação principais maiores e menores.

2.

## MATERIAL UTILIZADO E SUAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

Os dados de processamento, composição química, análise metalográfica e propriedades mecânicas do material utilizado são mostrados abaixo, nas tabelas de I a IV, respectivamente.

TABELA I - PROCESSAMENTO

DADOS	CFF	FL	CZ
Espessura (mm)	0,75	0,32	0,75
Temp. acabamento(°C)	880	850	860
Temp. bobinamento(°C)	540	540	580
Revestimento (1)	-	25	Tipo B
Ciclo de	520-510/8	520-570/8	270/24
Recozimento(°C/h)	660/12	660/10	

(1) FL revestimento 25 = 0,25 lb/cb ou 5,6 g/m<sup>2</sup>  
 CZ revestimento tipo B = 244/273 g/m<sup>2</sup>

TABELA II - COMPOSIÇÃO QUÍMICA %

ELEMENTO	CFF	FL	CZ
C	0,06	0,04	0,05
Mn	0,33	0,31	0,35
P	0,007	0,006	0,006
S	0,017	0,017	0,024
Si	<0,01	<0,01	<0,01
Al total	0,043	0,049	0,072
Al solúvel	0,033	0,046	0,060
N <sub>2</sub>	0,0034	0,0046	0,0023

TABELA III - ANÁLISE METALOGRAFICA

FATOR	CFF	FL	CZ
Diâmetro médio grão(mm)	0,061	0,016	0,010
Tamanho grão ASTM	9,0	9,0	10,0
Forma dos dx/dy	1,176	1,290	1,100
grãos dx/dy	2,041	2,420	1,220
Frequência cementita (1)	1-2	1-2	0-1
sulfeto	1-2	1-2	1-2
aluminato	1-2	1-2	2-3
silicato	1	-	-
óxido	-	-	-



ção do tipo de CP trabalhado.

Os ensaios por conformação foram realizados a uma velocidade média de 0,2 cm/min em um sistema punção-matriz acoplado a uma máquina AMSLER/100 t para tração. Foi dada uma carga no prende-chapa função do lubrificante usado e da espessura da chapa a ser deformada.

A Tabela V descreve os lubrificantes utilizados e sua especificação mais comum. Através da utilização de lubrificação variada foi possível abranger uma faixa ampla de valores, no campo tração-tração da CLC.

TABELA V - LUBRIFICAÇÃO

LUBRIFICANTE	ESPECIFICAÇÃO
1. SECO	utilizado para comparação com os demais lubrificantes empregados; tanto o CP quanto a ferramenta foram limpos antes do ensaio;
2. BORRACHA	câmaras de ar de pneumático de automóveis e caminhões com espessura variando de 2,65 a 1,00 mm; foi evidentemente, uma improvisação;
3. PLÁSTICO	folhas de plástico do tipo usado comercialmente para encapar cadernos e livros;
4. FOLHA DE PVC	laminado calandrado de PVC com espessura 0,09/0,10mm, peso 120 g/m <sup>2</sup> + 10%, normalmente utilizado como lubrificante nas indústrias de estampa;
5. GRAXA	graxa à base de lítio (EP-2) empregada normalmente em engrenagens e rolamentos de alta pressão;
6. MOLYKOTE G RAPID	lubrificante pastoso à base de grafita e molibdênio, específico para trabalhos com baixas condições de atrito entre metais;
7. MOLYKOTE 321 R	lubrificante sólido à base de grafita e molibdênio, com alto poder de aderência.

Foi adotado ainda, para o caso especial das chapas recobertas FL e CZ, uma lubrificação peculiarmente chamada "sanduíche", que constou do ensaio de três CP's simultaneamente; foram feitas medições apenas do CP intermediário.

5.

MÉTODOS DE TRABALHO

Para a determinação da CLC de cada material foram ensaiados os grupos de CP's descritos no ítem 3, figuras 1 e 2. No ensaio por tração visava-se determinar pontos no ramo esquerdo da CLC, campo tração-compressão, primeiramente abordado por GOODWIN (3,4) na simulação de estampagens industriais. O ramo direito, campo tração-tração estudado por KEELER (3), foi levantado com base no ensaio por estiramento de CP's octogonais, através de sistema punção-matriz, conforme mostrado nas figuras 3 e 4.

No ensaio por tração a estrição foi acompanhada através de inspeção visual, durante a realização do mesmo. O ensaio foi interrompido ao serem atingidos os valores médios de carga e alongamento mostrados na Tabela VI, abaixo:

TABELA VI - CARGAS E ALONGAMENTOS MÉDIOS PARA APARECIMENTO DA ESTRICÇÃO NO ENSAIO POR TRAÇÃO

TIPO CP	CFF		FL		CZ	
	CARGA(kgf)	AL(%)	CARGA(kgf)	AL(%)	CARGA(kgf)	AL(%)
1	1000	38	400	32	1000	30
2	330	34	140	30	330	30
3	420	13	170	11	430	11
4	300	11	120	10	300	11
5	460	8	190	8	470	7

No ensaio por conformação os CP's foram estirados até a fratura e então, por inspeção visual, separou-se os círculos correspondentes ao sucesso, estrição e região fraturada. Foram analisados apenas os pontos correspondentes à região estriada.

6.

## ANÁLISE DOS DADOS - RESULTADOS

Uma vez deformados os corpos de prova dentro dos critérios preestabelecidos foi feita a leitura das deformações sofridas pelos círculos adjacentes à fratura ou simplesmente estriccionados. A manipulação dos dados obtidos, a fim de tornar possível a representação gráfica pretendida, foi feita com base nas equações (1) e (2) mostradas abaixo, respectivamente alongamento verdadeiro ou logarítmico e alongamento convencional.

$$\text{Eq. (1)} \quad E = \ln \frac{L_f}{L_o} \qquad \text{Eq. (2)} \quad e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

E - alongamento verdadeiro ou logarítmico

e - alongamento convencional percentual

L<sub>o</sub> - diâmetro do círculo original

L<sub>f</sub> - comprimento dos eixos principais da elipse

Na equação (1) está implícito a aceitação da hipótese de constância do volume.

As deformações principais acontecem em cada círculo deformado para elipse e são consideradas como deformação principal maior (E<sub>1</sub> ou e<sub>1</sub>), na direção da maior alongamento e deformação principal menor (E<sub>2</sub> ou e<sub>2</sub>), na direção perpendicular à primeira.

Na representação gráfica das CLC usou-se plotar a média e o desvio padrão dos pontos obtidos, no caso das deformações verdadeiras, por lubrificante utilizado ou por tipo de CP de tração.

Para as curvas por deformações convencionais plotou-se a média dos valores obtidos por CP e lubrificante, unicamente.

Mostra-se na figura 5 a CLC para uma CFF, levantada segundo as condições anteriormente descritas, ajustada manualmente como envoltória inferior dos pontos médios das deformações verdadeiras à estrição. Observa-se que há uma diferença entre os valores de  $E_1$  obtidos no CP nº 5 e o do CP 11(150), próximos ao eixo de estado plano de deformações ( $E_2 = 0$ ). Esta diferença deve ser ocasionada pelo forte entalhe existente no CP nº 5, com o qual se tentava chegar ao estado plano de deformação ideal. Corroborando as afirmações de KAINLIS (5), quando cita NAKAZIMA e seus métodos experimentais, foi encontrado um valor mais próximo do eixo  $E_2 = 0$  no CP 11(150), onde atrito e morfologia levaram a um valor médio de 0,015 para  $E_2$ , além de uma maior representatividade deste método, em relação a conformações reais.

Ao se analisar o formato da curva, observa-se que GRUMBACH(4) mostrou curvas à estrição com morfologia semelhante, onde a região de transição, de um para outro ramo, tem  $E_1 = 0,2$ , aproximadamente.

Os valores de deformação verdadeiras foram transformados para deformações convencionais e foi plotada a figura 6. Nesta figura foi convencionada a não inclusão do CP nº 5 do ramo esquerdo.

Esta convenção tornou possível o ajuste de uma curva envoltória inferior com formato clássico, bastante semelhante àquela obtida por KEELER e GOODWIN (3). Considerou-se que o CP nº 5, devido a possuir um entalhe bastante pronunciado a fim de simular uma estampagem rigorosa com elevado grau de dificuldade, tem menor representatividade que os demais, se comparado à maioria das peças reais produzidas industrialmente.

A Tabela VII a seguir, mostra as cargas aplicadas ao prendechapas e a carga de comprimento de cada CP, bem como a lubrificação utilizada em cima - entre o punção e a chapa e

abaixo - entre a chapa e a matriz.

TABELA VII - CFF - CARGAS E LUBRIFICAÇÃO

Nº CP	P.CHAPA(t)	C.RUTURA(t)	LUBRIFICAÇÃO(SUP./INF.)
11(150)	4	4	graxa / seco
13	6	5	seco / seco
21	6.2	6	Molik. G / Molik. G
14	4	6.5	1 PVC / 1 PVC
15	4	6	2 PVC / 1 PVC
12	9	5.5	seco / 1BG + Graxa
11	5	6	graxa / graxa
3	17	7	1 BG / 1 BF
1	5	5.6	4 PVC + graxa / seco
18	18.7	6.6	2 BG + graxa / seco
16	4.5	7	3 PVC / 2 PVC

A análise da Tabela VII e das figuras 5 e 6 mostra que, a medida que a lubrificação torna-se mais efetiva há uma tendência da curva para o eixo  $E_1 = E_2$  de expansão biaxial perfeita. Neste material constatou-se a importância da lubrificação entre a chapa e a matriz. Trata-se de uma região de atrito elevado, dobramentos severos e que pode atuar significativamente no comportamento de uma chapa sem recobrimento como neste caso.

## 6.2

### FOLHAS DE FLANDRES

A figura 7 mostra a CLC para FL com deformações verdadeiras à estricção. Novamente é observada a diferença de nível entre os dois ramos, podendo-se concluir ser devida aos mesmos fatores já citados. Repete-se aqui a característica dos métodos de NAKAZIMA (5) com menores valores de  $E_2$  no CP 2(150). Com base nas razões expostas no item anterior, retirou-se o

CP nº 5 (campo tração-compressão) e ajustou-se manualmente uma envoltória inferior aos pontos obtidos por deformação convencional. Obteve-se uma curva de formato semelhante às obtidas por KAINLIS(5), separando os pontos estriccionados daqueles de sucesso na conformação. A figura 4 mostra a CLC à estricção obtida por cálculo da deformação convencional dos pontos dos CP's de FL-T1 utilizados.

TABELA VIII - FL T1 - CARGAS E LUBRIFICAÇÃO

Nº CP	P.CHAPA(t)	C.RUTURA(t)	LUBRIFICAÇÃO (SUP./INF.)
2(150)	0,5	4	sanduíche
1	1,5	1,7	Seco / seco
5	1,7	2	2 PVC / 2 PVC
3	1,5	2,3	Molik G / seco
4	1,6	2	Molik G Aq / seco(chapa aquec.)
8	5	3	1 BF + graxa / 1BF + graxa
2	1,6	2,1	1 PVC / 1 PVC
9	10	2,8	1 BG + graxa / seco
7	2	2,4	4 PVC + graxa / seco
6	4,5	2,4	2 BG + graxa / seco

A Tabela VIII acima, apresenta os valores das cargas de prenda-chapa e lubrificação utilizadas e as cargas de rutura de cada CP. Observa-se que o incremento de lubrificação mais importante está no lado superior, punção-chapa, havendo muito pouca influência do lubrificante no lado chapa-matriz. Esta característica, provavelmente, deve ser devido às propriedades lubrificantes da camada de estanho e à pequena área de contato chapa-matriz se comparada ao contato punção-chapa.

A figura 9 mostra a CLC obtida com grades impressas eletroliticamente em chapas galvanizadas e plotadas com deformação verdadeiras. As mesmas características das curvas anteriores quanto à diferença entre os dois ramos, esquerdo e direito, estão presentes neste caso. Apesar de não haver em literatura, CLC para material semelhante e não ser possível a comparação portanto, pode ser observado que a CLC aqui apresenta valores médios de  $E_1$  mais baixos que os obtidos para CFF - figura 5. Isto vem de encontro aos valores dos parâmetros de estampabilidade ( $\bar{r}$  e  $n$ ) medidos para CFF e CZ, significativamente menores neste último material (vide Tabela IV). Por outro lado, o formato quase equiaxial do grão CZ (Tabela III) poderia explicar o grande afastamento do CP nº 6, próximo ao eixo das expansões biaxiais perfeitas  $E_1 = E_2$ .

Na figura 10, feito o mesmo tratamento dado às curvas anteriores quanto ao CP nº 5, obteve-se uma CLC por deformação convencional à estrição em tudo semelhante àquela da CFF - figura 6 - com níveis mais baixos de  $e_1$ .

A Tabela IX mostra a lubrificação e cargas envolvidas no processo de conformação da CZ, listando os CP's em ordem crescente de valores de  $E_2$ .

TABELA IX - CZ - CARGAS E LUBRIFICAÇÃO

Nº CP	P.CHAPA(t)	C.RUTURA(t)	LUBRIFICAÇÃO (SUP./INF.)
1(150)	10	5,8	Sanduiche / BG
13	7	4	Seco / seco
8	3	5,5	Seco / seco
1	6	4,4	Seco / seco
12	3	6,5	1 PVC / seco
7	5	4,7	Molik 321 Aq/Seco(chapa aquec.)
11	3	5,5	3 PVC / seco
10	3	5,4	Molik G / seco
14	7	5,1	Graxa / seco
4	7	5,1	5 PVC / seco
3	10	5,1	1 BG + graxa / seco
2	7	4,8	6 PVC / seco
6	12	4,2	3BF / seco

Observa-se na tabela acima que todos os CP's, à exceção do 1(150) não receberam lubrificação adicional na parte inferior. A experiência mostrou que a contribuição do lubrificante nesta região é mínima o que poder-se-ia variar o campo tração-tração sem seu emprego, da maneira como foi feito. O CP 1(150) foi conformado entre outra chapa de mesmas dimensões de CZ e uma folha de borracha. Os CP's 13, 8 e 1 foram conformados em velocidades decrescentes, nas mesmas condições de lubrificação, donde suas diferenças em deformações  $E_1$  e  $E_2$ .

## 7. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

A aplicação da curva limite de conformação nas relações CSN-clientes já foi efetuada em oportunidade anterior (6) provando ser este um valioso instrumento na determinação de produtos para o projeto e confecção de peças por estampagem.

O presente trabalho, abordando o levantamento das CLC de três produtos principais, processados pela CSN para atendimento ao mercado estampador, pretende colaborar para o incremento destas relações.

Foram utilizados dois métodos particulares de simulação: o ensaio de tração simulando a estampagem em seus diversos graus de rigor e o ensaio de estiramento ou conformação por punção elíptico, para simular as peças ou partes de peças onde de estiramentos são operações essenciais.

Observou-se que os recobrimentos de estanho (FL) e zinco (CZ) atuam como lubrificantes suaves. A experiência mostrou que a lubrificação na região chapa-matriz só possui importância significativa no caso de chapas não recobertas (CFF).

Foi visto que a CFF é o produto que melhor se presta às operações de conformação, afirmação essa que corrobora os valores encontrados para os parâmetros  $\bar{r}$  e  $n$  deste material. Foi

visto também que, devido a sua maior isotropia, a CZ admite conformação até quase a expansão biaxial perfeita.

Deverã ser investigada uma maior gama de bitolas, destes e de outros produtos planos da CSN, com vistas à confecção de um mapa onde possa ser possível a visualização da influência da espessura na posição da CLC à estrição.

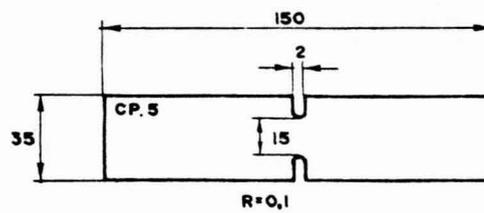
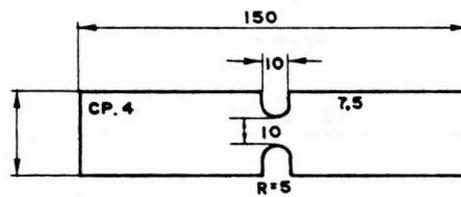
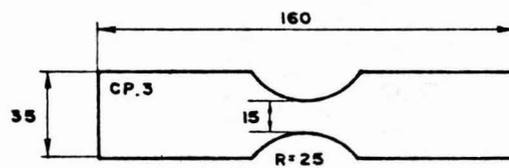
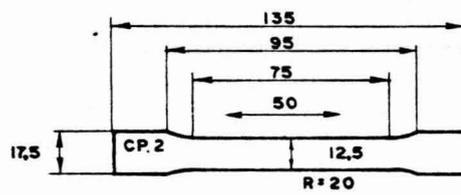
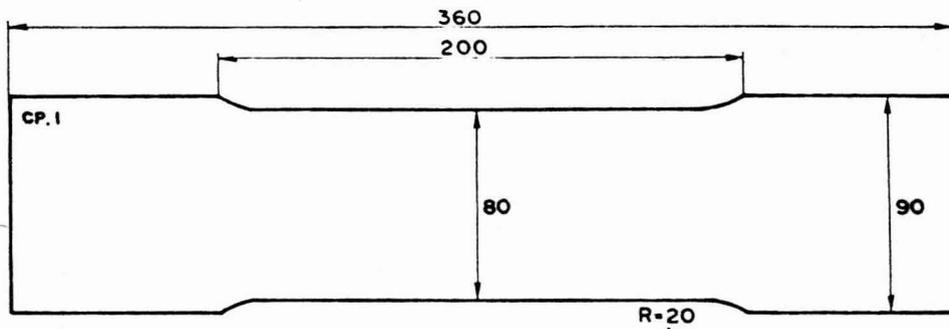
O ensaio de tração, bastante empregado por pesquisadores europeus no estudo da CLC, traduz uma situação de atrito nulo na estampagem e, portanto, não muito próxima da maioria dos casos reais.

O material para estampagem produzido pela CSN comporta-se de modo similar a outros mostrados na literatura disponível sobre o assunto.

/vsm.

## BIBLIOGRAFIA

1. Mozart, C.F. - Publicação Interna CSN/1978 - Característica Metalográficas dos Aços SM para FL-T3.
2. Radamanto, A.N. ; Paulo, C.S. ; Célio, J.M. - Publicação Interna CSN/1979 - Procedimento para Obtenção das Curvas Limite de Conformação.
3. Keeler, S.P. - Sheet Metal Industries (agosto 71) Understanding Sheet Metal Formability.
4. M. Grumbach, J. Peuetier, J. Samson - Revue de Metallurgie (fevereiro 75) Les Tôles Minces Pour Emboutissage Dans L'Industrie Automobile.
5. G. de Kanlis, M. Entringer, J. Calas (Publicação Sollac) Drawability of Tinsplate Forming Limit Diagrams And Industrial Application.



MEDIDAS EM mm

FIG. 1 - CORPOS DE PROVA COM ENTALHES ESPECIAIS USADOS NO EN SAIO POR TRACAO

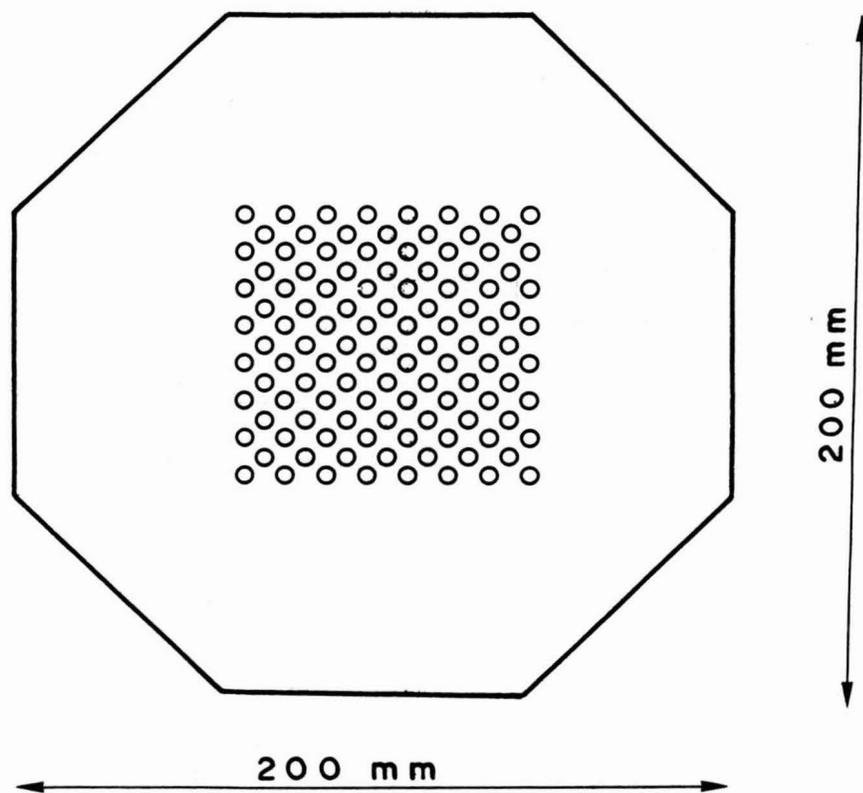


FIG. 2 - CORPO DE PROVA OCTOGONAL PREPARADO PARA ENSAIO POR CONFORMAÇÃO.

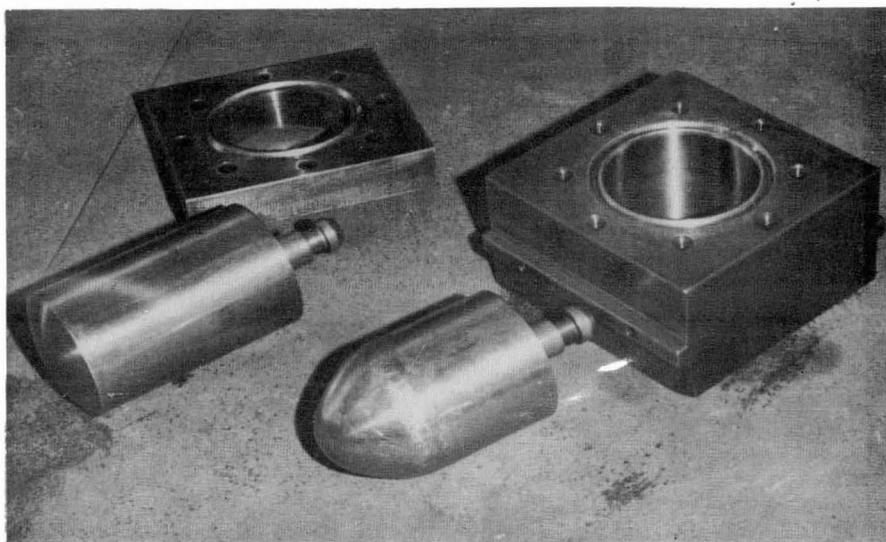


FIG. 3 - O SISTEMA PUNÇÃO-MATRIZ E SUAS DIVERSAS PARTES.

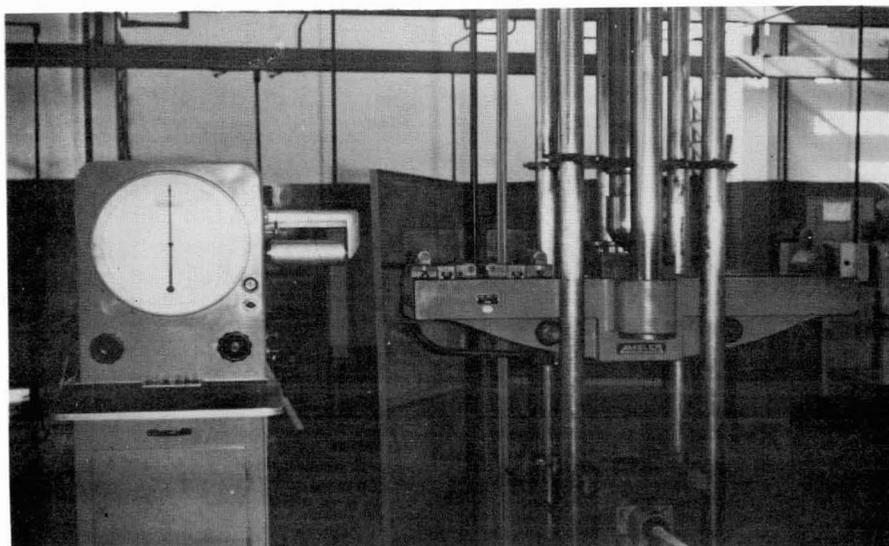


FIG. 4 - O SISTEMA PUNÇÃO-MATRIZ ACOPLADO À MÁQUINA AMSLER / 100 T.

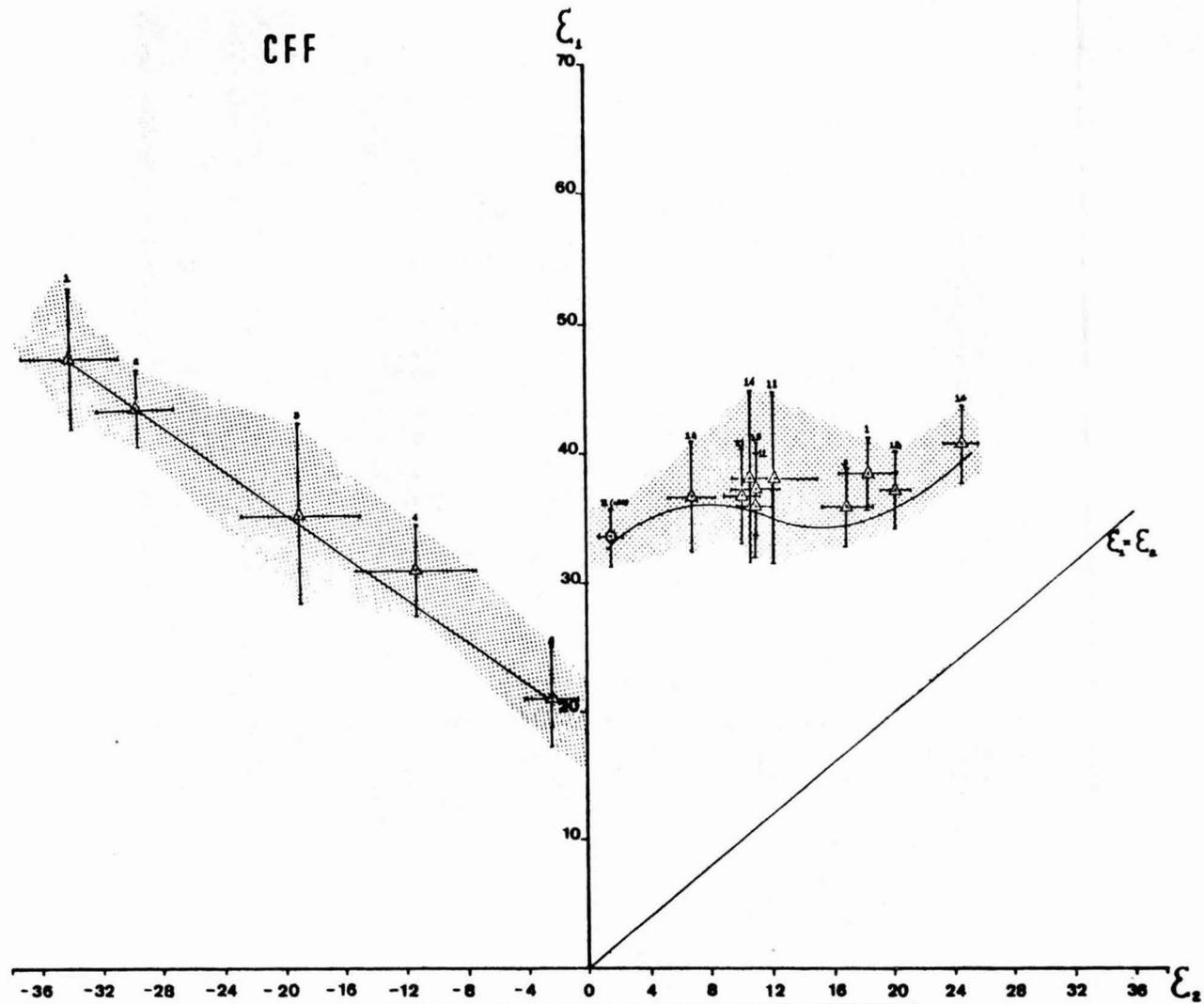


FIG. 5 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO À ESTRICÇÃO POR DEFORMAÇÕES VERDADEIRAS DE CHAPAFINA A FRIO.

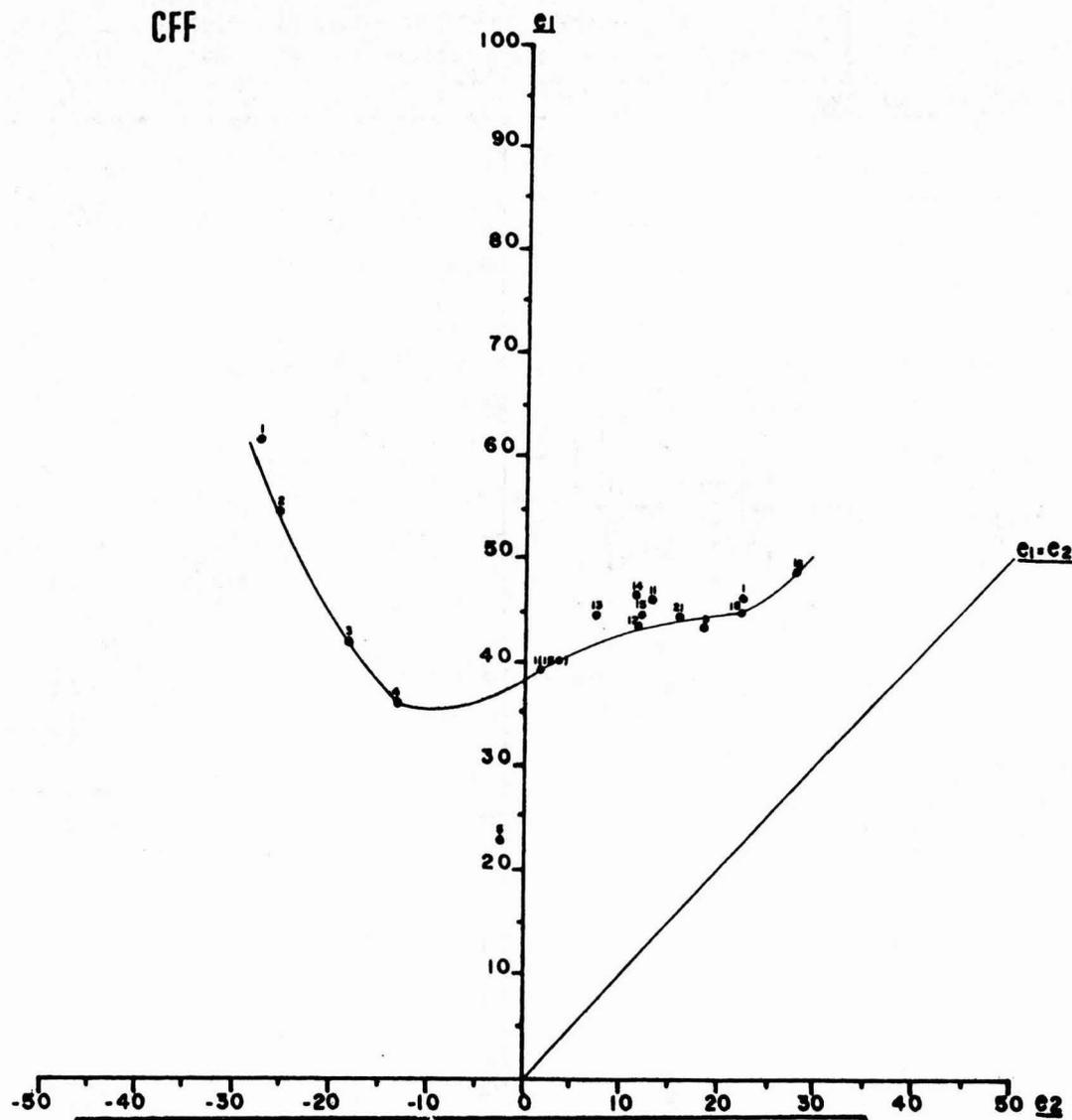


FIG. 6 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO À ESTRICÇÃO POR DEFORMAÇÕES CONVENCIONAIS DE CHAPA FINA A FRIO.

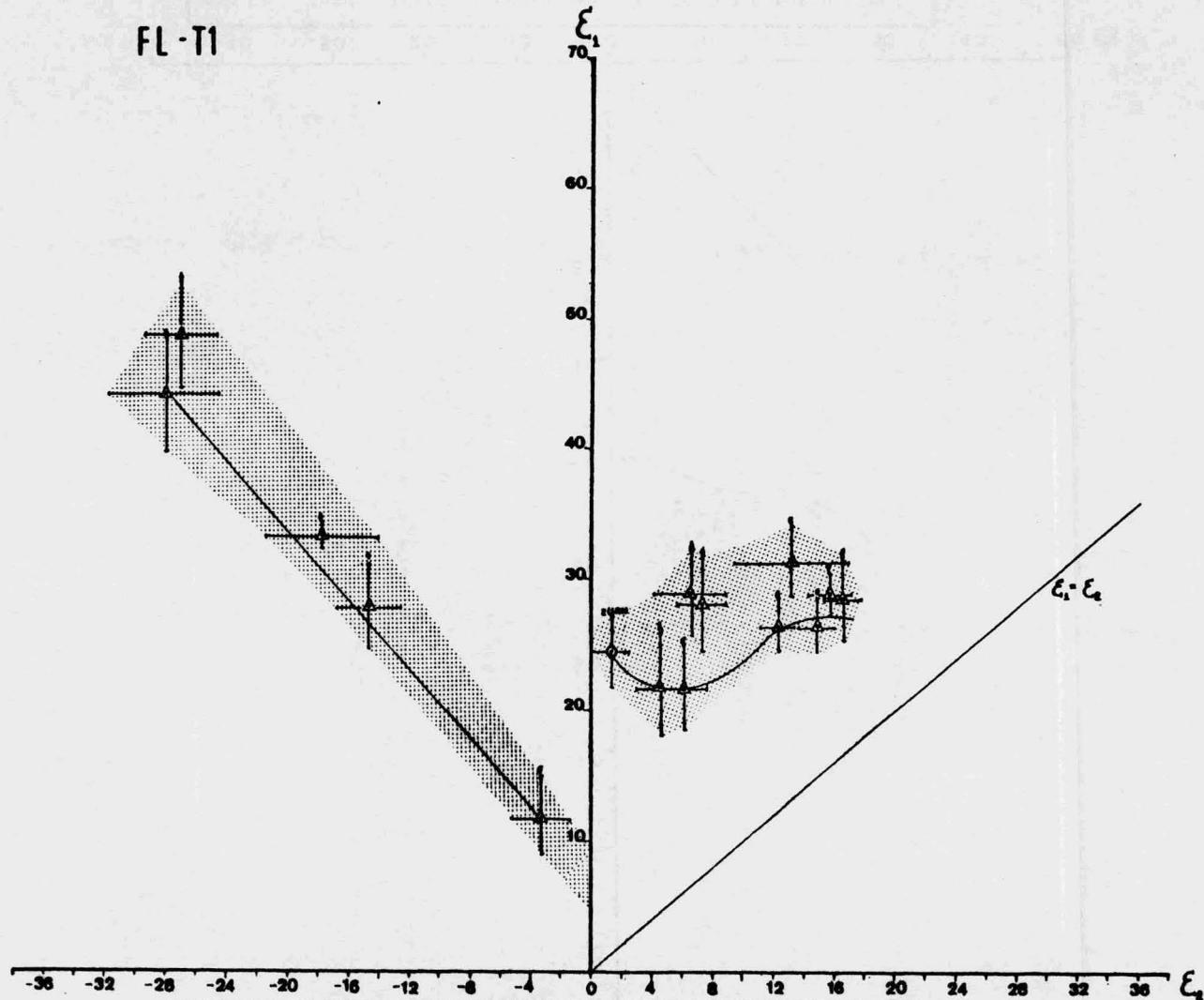


FIG. 7 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO À ESTRICÇÃO POR DEFORMAÇÕES VERDADEIRAS DE FOLHA DE FLANDRES.

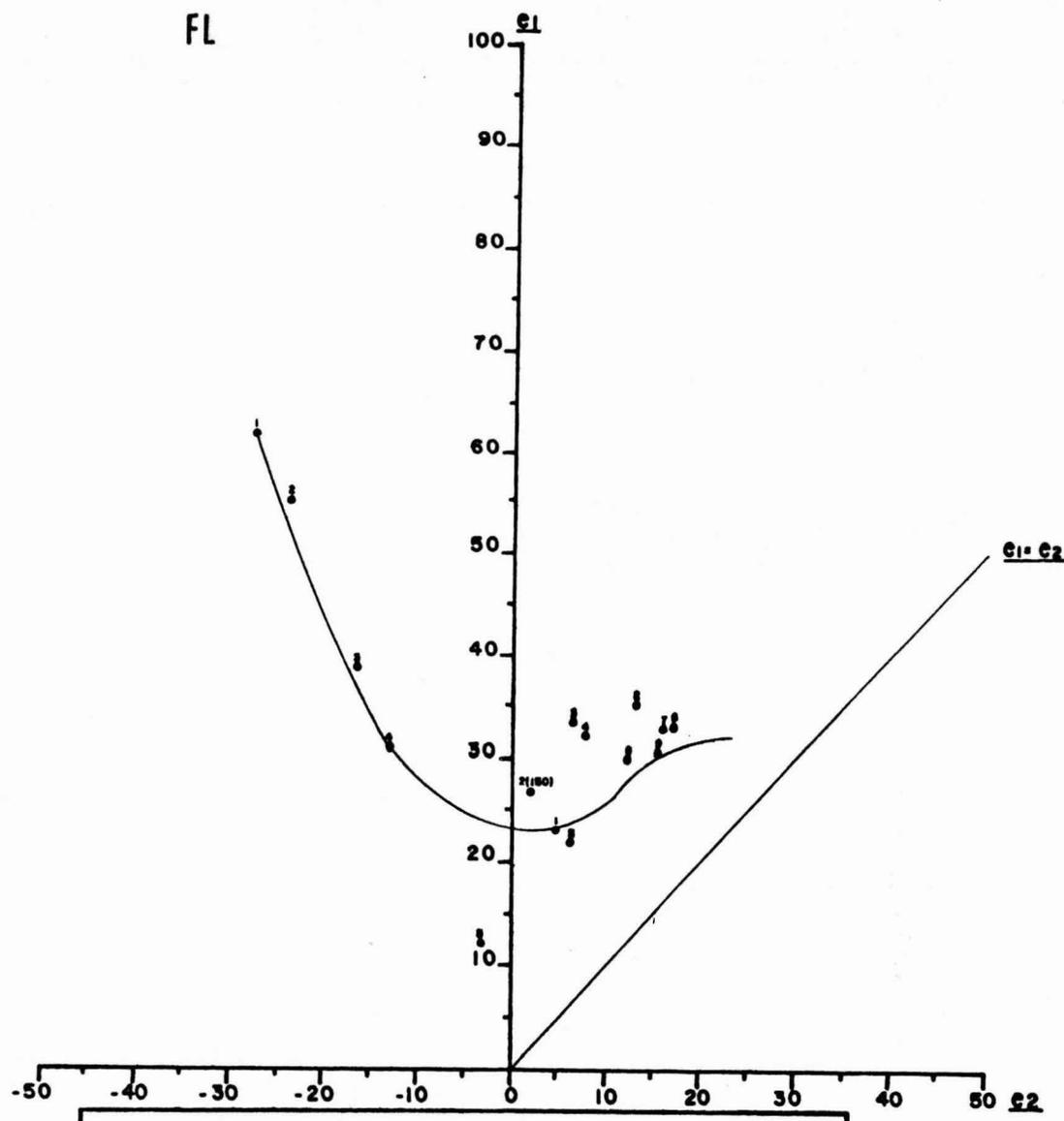


FIG. 8 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO À ESTRICÇÃO POR DEFORMAÇÕES CONVENCIONAIS DE FOLHA DE FLANDRES.

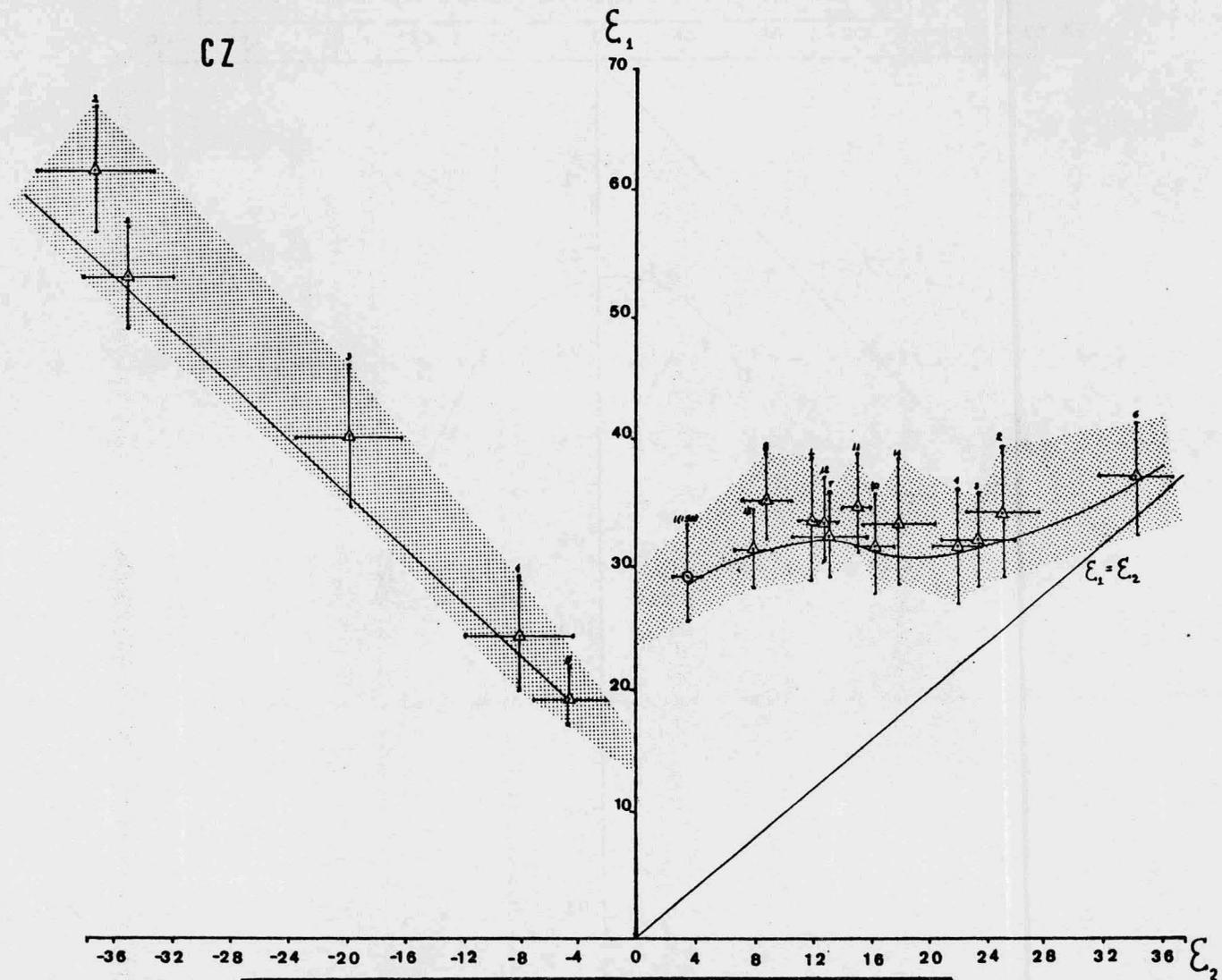


FIG. 9 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO À ESTRICÇÃO POR DEFORMAÇÕES VERDADEIRAS DE CHAPA ZINCADA.

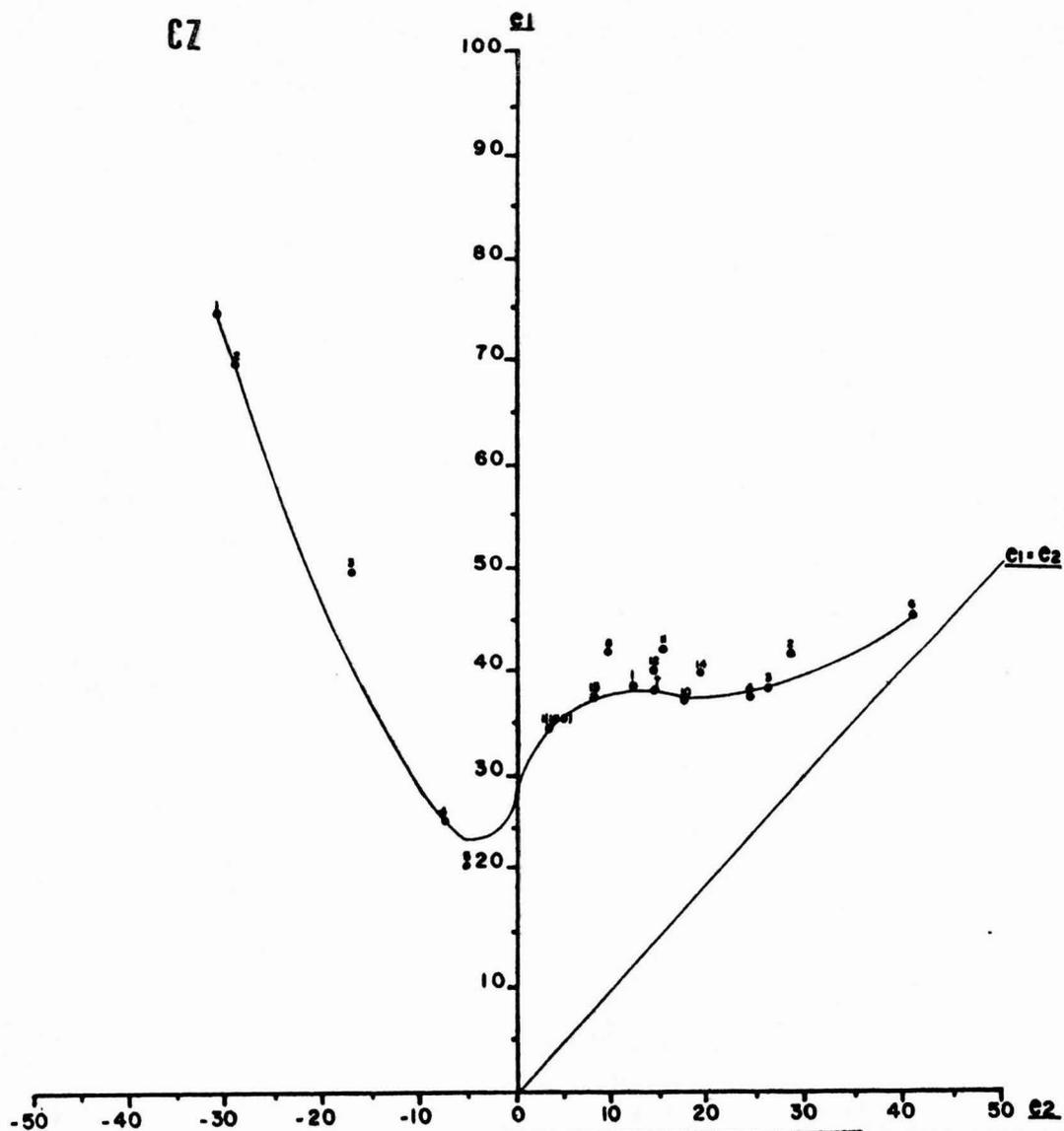


FIG. 10 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO À ESTRICÇÃO POR DEFORMAÇÕES CONVENCIONAIS DE CHAPA ZINCADA.

