

**"ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA
DE TRINCAS EM AÇO 1010 E PLASTICINA OBTIDAS
ATRAVÉS DE ENSAIO DO CONE TRUNCADO"**

Sandro Aloísio Matilde

M-402
MAT
1998
T

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

METALÚRGICA E DE MINAS

U.F.M.G. - BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA

212005



5770006

NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

U.F.M.G.

OK/2001

MFN-18

Dissertação de Mestrado

“ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA

DE TRINCAS EM AÇO 1010

E PLASTICINA OBTIDAS

ATRAVÉS DE ENSAIO DO CONE TRUNCADO”

Autor: Sandro Aloisio Matilde

Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin

Junho/98

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

34 / 02 / 2000

57700-06

Sandro Aloísio Matilde

**ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA DE TRINCAS EM AÇO 1010
E PLASTICINA OBTIDAS ATRAVÉS DE ENSAIO DO CONE TRUNCADO.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia de Transformação

Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

1998

ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA DE TRINCAS EM AÇO 1010 E PLASTICINA OBTIDAS ATRAVÉS DE ENSAIO DO CONE TRUNCADO

Sandro Aloísio Matilde

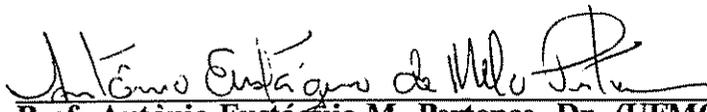
Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

Aprovada em 02 de junho de 1998.

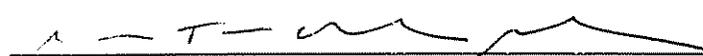
Por:



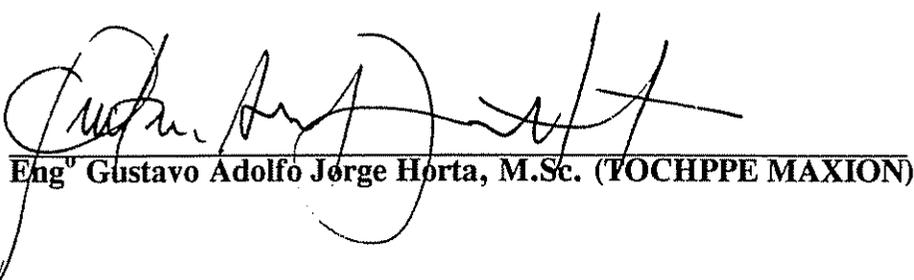
Prof. Paulo Roberto Cetlin, Dr. (UFMG)
Orientador



Prof. Antônio Eustáquio M. Pertence, Dr. (UFMG)



Prof.^a Maria Teresa Paulino Aguiar, Dr. (UFMG)



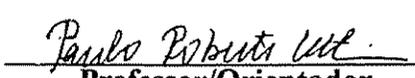
Eng.^o Gustavo Adolfo Jorge Horta, M.Sc. (TOCHPPE MAXION)

Aprovada pelo Colegiado do CPGEM

Versão final aprovada por



Prof. Dagoberto Brandão Santos
Coordenador do CPGEM/UFMG



Paulo Roberto Cetlin
Professor/Orientador

RESUMO

Dentre os processos de fabricação de peças metálicas, o forjamento a frio vem de encontro à necessidade de diminuição ou mesmo a eliminação do processo de usinagem, que envolve obrigatoriamente retirada e perda de material. Entretanto as operações de forjamento a frio podem propiciar o aparecimento de trincas no material, em função da forma das matrizes e do nível de deformação imposta. Assim, para que um dado material seja utilizado no processo de forjamento a frio, é crucial que este tenha uma boa capacidade de deformar-se sem trincar (boa ductilidade).

Existe uma certa dificuldade em se fazer uma transposição de resultados tradicionais de ductilidade obtidos em laboratório, em testes de tração, compressão e torção, para os casos reais de forjamento a frio. Desta forma há necessidade do estudo de situações de deformação mais próximas da prática industrial. Entretanto, a realização de testes com materiais reais, em escala real, com o uso equipamentos de conformação de metais seria oneroso e de difícil execução.

Um teste proposto para analisar esta situação é o ensaio de cone truncado, que consiste basicamente na indentação de um corpo de prova cilíndrico por uma matriz cônica. Estes ensaios podem ser realizados com a ajuda do método de modelamento físico, que consiste em utilizar materiais modelo (por exemplo a plasticina), que devem apresentar comportamento semelhantes aos materiais reais, deformando-se com baixos esforços.

São objetivos do presente trabalho avaliar o comportamento do material modelo já desenvolvido na UFMG, face à ocorrência de trincas no forjamento com cone truncado e comparar os resultados com aqueles relatados na literatura para a avaliação da ductilidade de materiais no forjamento a frio.

ABSTRACT

Cold forging is a manufacturing process leading to a substantial decrease or even to the elimination of machining, and thus of the associated loss of material. However, cold forging may be limited by cracking of the material, which should then exhibit substantial ductility.

Conventional mechanical tests (tension, compression, torsion) allow a measurement of ductility. However, the direct use of these results in cold forging is difficult or impossible, and there is a great need of studies of situations closer to industrial practice. These studies, if performed with real materials and industrial equipment, are costly and time consuming. The truncated cone test has been used for the industrial evaluation of ductility.

The use of model materials for the simulation of metal forming can be very attractive from the point of view of cost and time. The present dissertation presents an analysis of the ductility evaluation of a model material in the truncated cone test.

KEY-WORDS : metal forming, model material, ductility

Agradecimentos

Agradeço inicialmente a Deus suprema inspiração que a todo instante nos move a prosseguir a caminhada a procura do saber.

Meus sinceros agradecimentos ao professor Paulo Roberto Cetlin pela amizade, companheirismo, orientação e principalmente pela valorização profissional e pessoal a mim dedicada.

Às professoras Maria Teresa e Ivete Peixoto pelas correções e sugestões gentilmente apresentadas.

Agradeço a minha esposa Simone aos meus filhos Larissa e Júnior que tantas vezes abriram mão de minha presença como pai para dar lugar a minha presença como estudante.

E finalmente a meus familiares, amigos e companheiros de Laboratório que direta ou indiretamente confiaram em mim e me impulsionaram seja com palavras, gestos ou atitudes a prosseguir a caminhada.

Lista de Notações

A_0 = Área inicial do cilindro

d_{ct}/d_{cp} = Relação entre o diâmetro do cone truncado pelo diâmetro do corpo de prova

d = Diâmetro menor do cone truncado

e = Alongamento percentual

f = Diâmetro maior do cone truncado

h = Altura da matriz

h_0 = Altura inicial do cilindro

h_f = Altura final do cilindro

h_{ct}/h_{cp} = Relação entre a altura do cone truncado pela altura do corpo de prova

K = Distância radial

L_f = Comprimento final do corpo de prova

L_0 = Comprimento inicial do corpo de prova

L_w = Comprimento do cilindro de torção

MT = Momento torsor

P = Carga axial de compressão

Q = Carga instântanea de tração

R = Raio do cilindro de torção

S_0 = Área inicial da seção transversal do corpo de prova de tração

α = Trincas externas e longitudinais

β = Trincas internas e longitudinais

ϵ = Trincas internas e transversais

η = Trincas internas e radiais

θ = Ângulo de torção expresso em radianos

γ = Deformação do material no ensaio de torção

ϕ = Ângulo de torção expresso em graus

ϕ = Fator angular

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 TESTES DE DUTILIDADE.....	13
3.1.1 Ensaio de tração.....	13
3.1.2 Ensaio de compressão.....	18
3.1.3 Ensaio de torção.....	22
3.2 FORJAMENTO.....	24
3.3 TESTES DE FORJABILIDADE.....	26
3.3.1 Testes de Forjamento de Cunha.....	26
3.3.2 Testes por pressão lateral.....	28
3.3.3 Ensaio de cone truncado.....	29
3.4 SIMULAÇÃO FÍSICA.....	32
4. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	38
4.1 MATERIAIS.....	38
4.1.1 Material modelo acrílex.....	38
4.1.2 Material modelo plasticina.....	41
4.1.3 Material real aço 1010.....	45
4.2 ENSAIO DE CONE TRUNCADO.....	48
4.2.1 Equipamentos.....	48
5. RESULTADOS	55
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	62
6.1 PLASTICINA.....	62
6.2 MATERIAL REAL (AÇO 1010).....	65
6.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A PLASTICINA E O AÇO.....	66
6.4 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE A PLASTICINA E DADOS DA LITERATURA.....	68
6.5 ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS ENTRE MATERIAL REAL E DADOS DA LITERATURA.....	69
7. CONCLUSÕES	71
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES:	72
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 Aspecto do corpo de prova para o ensaio de tração.....	14
Figura 3-2 Curva típica tensão-deformação convencional, obtida no ensaio de tração..	15
Figura 3-3 Determinação do limite convencional de escoamento a 0,2%.....	17
Figura 3-4 Forma das regiões de fluxo restringido.....	21
Figura 3-5 Efeito da relação D/h na geometria da deformação.....	22
Figura 3-6 Torção em um corpo de prova de seção circular.....	24
Figura 3-7 Processos unitários no forjamento a frio.....	25
Figura 3-8 Trincas unitárias no forjamento a frio.....	27
Figura 3-9 Corpo de prova em forma de cunha antes e após o recalque.....	28
Figura 3-10 Corpo de prova submetido a ensaio de pressão lateral.....	28
Figura 3-11 Resultados esquemáticos obtidos com a aplicação do ensaio de cone truncado.....	29
Figura 3-12 Etapas na fabricação da cabeça de um parafuso por forjamento a frio.....	30
Figura 3-13 Condições geométricas para formação de trincas em aço SAE 1045 recozido.....	31
Figura 3-14 Influência do material sobre as condições geométricas para formação de trincas.....	32
Figura 3-15 Exemplos de aplicação de plasticina em simulação física.....	37
Figura 4-1 Representação esquemática do procedimento experimental.....	39
Figura 4-2 Plasticina acrílex utilizada para confecção dos corpos de prova a serem ensaiados.....	40
Figura 4-3 Corpo de prova de plasticina acrílex a ser usado em ensaio de cone truncado.....	40
Figura 4-4 Gancho adaptado para misturar a plasticina.....	43
Figura 4-5 Plasticina utilizada para confecção dos corpos de prova a serem ensaiados.....	43
Figura 4-6 Processo esquemático de obtenção das amostras do material modelo.....	44
Figura 4-7 Dimensões dos Corpos-de-prova cilíndricos.....	44
Figura 4-8 Corpo de prova de plasticina a ser utilizado nos ensaios.....	45
Figura 4-9 Micrografia do aço 1010.....	46
Figura 4-10 Corpo de prova de aço a ser utilizado nos ensaios.....	47
Figura 4-11 Matrizes de alumínio utilizadas nos ensaios com plasticina.....	48
Figura 4-12 Matrizes de aço utilizadas nos ensaios com material real.....	49
Figura 4-13 Ensaio de cone truncado sendo realizado em material modelo.....	50
Figura 4-14 Dispositivo de centragem dos corpos de prova.....	50
Figura 5-1 Corpo de prova de plasticina apresentando trinca superficial do tipo α	55
Figura 5-2 Corpo de prova de plasticina apresentando trinca do tipo η	60
Figura 5-3 Corpo de prova de plasticina apresentando trinca do tipo ϵ	60
Figura 5-4 Corpo de prova de aço apresentando trinca do tipo β	61
Figura 5-5 Corpo de prova de aço apresentando trinca do tipo ϵ	61
Figura 6-1 Resultado do ensaio de cone truncado para a plasticina ensaiada com fator $\phi = 0,36$	63
Figura 6-2 Resultado do ensaio de cone truncado para a plasticina ensaiada com fator $\phi = 1,8$	64

Figura 6-3 Resultado do ensaio de cone truncado para a plasticina ensaiada com com fator $\phi = 4,3$	64
Figura 6-4 Resultado do ensaio de cone truncado para o material real ensaiado com fator $\phi = 0,36$	65
Figura 6-5 Resultado do ensaio de cone truncado para o material real ensaiado com fator $\phi = 1,8$	65
Figura 6-6 Resultado do ensaio de cone truncado para o material real ensaiado com fator $\phi = 4,3$	66
Figura 6-7 Gráfico material real x plasticina para $\phi = 0,36$	67
Figura 6-8 Gráfico material real x plasticina para $\phi = 0,36$	67
Figura 6-9 Gráfico material real x plasticina para $\phi = 4,3$	68
Figura 6-10 Gráfico plasticina x Okamoto.....	68
Figura 6-11 Gráfico material real x Okamoto.....	69
Figura 6-12 Gráfico material real x Okamoto.....	70
Figura 6-13 Gráfico material real x Okamoto.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1- Composição química do aço 1010.....	46
Tabela IV.2- Dimensões das matrizes em alumínio	53
Tabela IV.3- Dimensões das matrizes em aço.....	54
Tabela V.1- Tipos de trincas unitárias obtidas no ensaio de cone truncado com o material modelo amostra 1	56
Tabela V.2- Tipos de trincas unitárias obtidas no ensaio de cone truncado com o material modelo amostra 2.....	57
Tabela V.3- Tipos de trincas unitárias obtidas no ensaio de cone truncado com o material real amostra 1	58
Tabela V.4- Tipos de trincas unitárias obtidas no ensaio de cone truncado com o material modelo amostra 2.....	59

1-INTRODUÇÃO

Nas atuais condições de elevada competitividade na elaboração de componentes industriais, os processos de forjamento a frio vêm encontrando cada vez mais importância. Muitos produtos industriais, tradicionalmente usinados a partir de barras ou forjados a quente, são hoje produzidos por forjamento a frio, o que faz com que haja maior aproveitamento da matéria prima, redução nos custos de produção e melhoria na qualidade do produto⁽¹⁾. Atualmente o forjamento a frio é o mais importante processo de fabricação de fixadores mecânicos, utilizados nas linhas de montagens da indústria automobilística, máquinas operatrizes, eletrodomésticos e outros. Dados do Centro Brasileiro de Forjarias⁽²⁾ mostram que a produção de forjados em matriz fechada a quente e a frio no Brasil cresceu significativamente nos últimos 25 anos, aumentando de 139.000 toneladas para 306.000 toneladas/ano. Uma das razões para a maior produção de forjados a frio se deve ao fato de que a fabricação de peças forjadas deixou de ser uma atividade empírica para tornar-se uma atividade com bases tecnológicas. Para que se tenha uma peça forjada com propriedades adequadas é crucial que se controle a capacidade do metal deformar-se sem trincar. As formas usuais de avaliação desta capacidade de deformação são trabalhosas e caras, pois frequentemente envolvem tentativas e erro a nível industrial. Assim seria de grande interesse tecnológico a utilização de técnicas laboratoriais simples, para se atingir esse objetivo. Uma forma de atingir esta meta envolve o estudo do material real através de um material modelo⁽³⁾. Para que isto seja possível é necessário caracterizar o comportamento do material modelo quanto à ocorrência de trincas e estabelecer a similaridade entre ele e o material real.

2-OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é a simulação física do forjamento a frio através da:

1. avaliação do comportamento do material modelo, já desenvolvido na UFMG, no tocante à ocorrência de trincas no forjamento com cone truncado;
2. estabelecimento de critérios preliminares de similaridade para o comportamento do material modelo e materiais reais, submetidos a operações de forjamento com cone truncado.

3-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Testes de Dutilidade

A dutilidade de um material é a sua capacidade de deformar-se plasticamente sem trincar⁽⁴⁾. Os testes para a avaliação de dutilidade são aqueles em que o estado de tensões atuantes sobre o corpo de prova são bem conhecidos e controlados. São eles os ensaios de tração, de torção e o de compressão.

3.1.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é largamente empregado para determinar as propriedades mecânicas de materiais, pois é de fácil execução e apresenta boa reprodutividade de resultados. O ensaio consiste em submeter o material a um esforço definido por cargas uniaxiais de mesma direção, porém de sentidos opostos, que tendem a alongar o corpo de prova até que ocorra a ruptura. A aplicação da carga é feita a baixa velocidade o que faz com que seja classificado como um ensaio estático.

Para os ensaios geralmente são feitas amostras do material com dimensões padrões, normalizadas pelas várias associações de normas técnicas (ASTM, ISO, ABNT, DIN, dentre outras), chamadas de corpos de prova (figura 3.1).

Os corpos de prova são normalmente usinados, com a região central de sua seção transversal apresentando uma menor área, e com as extremidades apresentando maiores seções. Isto garante que a deformação ocorra somente na região central, prevenindo contra a ruptura na região das garras.

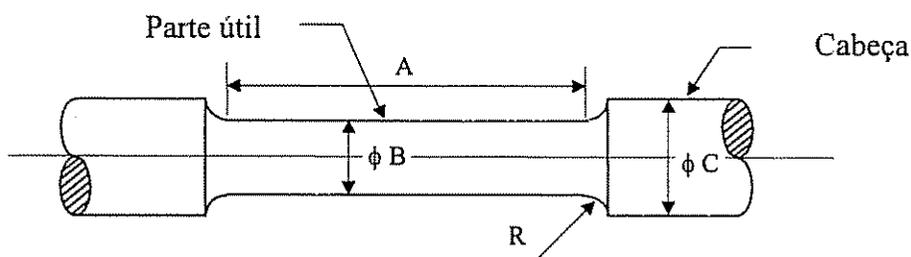


Figura 3.1- Aspecto do corpo de prova para o ensaio de tração.

Com a aplicação da carga o corpo fica submetido a um alongamento. A tensão longitudinal média atuando no corpo de prova, num dado momento, é obtida dividindo-se a carga instantânea (Q) pela área inicial da seção transversal (S_0), conforme relação abaixo:

$$\sigma = \frac{Q}{S_0} \quad (3.1)$$

A tensão (σ), produz um aumento no comprimento inicial (L_0) de um valor (ΔL), que é avaliada através de uma deformação chamada convencional (e).

$$e (\%) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.2)$$

sendo:

L_f = comprimento final do corpo de prova

L_0 = comprimento inicial do corpo de prova

A curva representativa do ensaio (tensão versus deformação) chamada curva convencional, obtida através do registrador gráfico, apresenta o aspecto típico mostrado na figura 3.2.

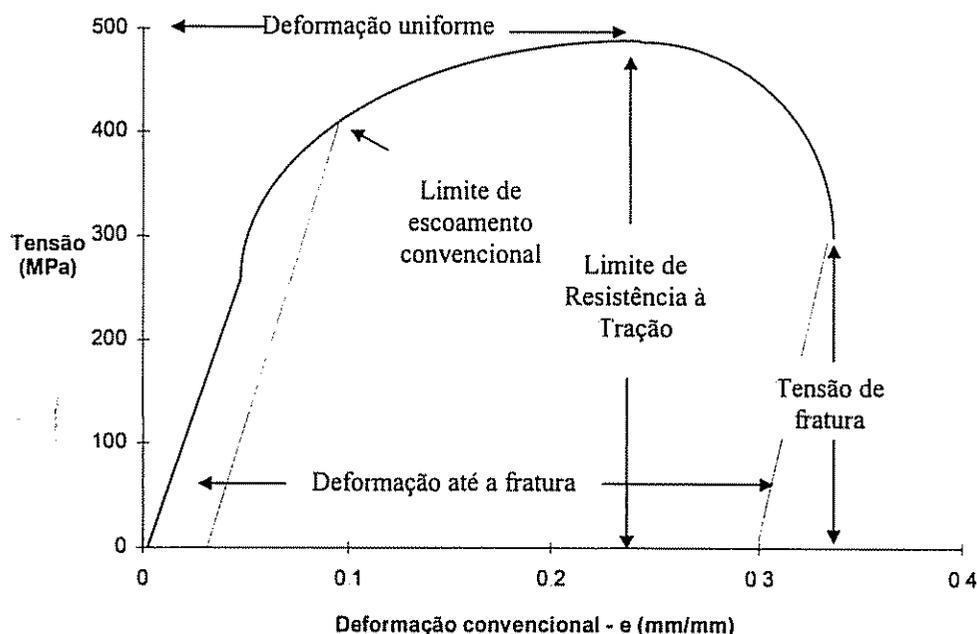


Figura 3.2- Curva típica tensão-deformação convencional, obtida no ensaio de tração⁽⁴⁾

A forma geral da curva tensão-deformação de engenharia (figura 3.2) requer maiores explicações. Observam-se três regiões distintas na curva. Na primeira delas, chamada de região elástica, ocorrem deformações transitórias^(5,6). É caracterizada pela variação linear entre σ e ϵ . Quando a carga ultrapassa o valor correspondente à tensão chamada de limite de escoamento, o corpo de prova passa a sofrer deformação plástica generalizada. A partir desse ponto ele está permanentemente deformado se a carga é reduzida a zero. A tensão para produzir cada vez mais deformação plástica cresce com o aumento desta última, isto é, o material encrua. A partir de uma tensão máxima

chamada de σ_R , observa-se uma queda da carga para promover deformação plástica. O volume do corpo de prova permanece constante durante a deformação plástica. Dessa forma, com o aumento do comprimento a área da seção reta transversal decresce uniformemente ao longo do corpo de prova. Inicialmente o encruamento compensa a diminuição da área da seção reta transversal e a tensão convencional (proporcional à carga Q) continua a aumentar com o aumento da deformação. Eventualmente, atinge-se um ponto onde o efeito da diminuição da área da seção reta do corpo de prova sobrepuja o efeito do encruamento. Essa condição será atingida primeiramente em algum ponto do corpo de prova que é ligeiramente mais fraco que o resto. Toda deformação plástica posterior será concentrada nessa região, onde o corpo de prova começará a formar um pescoço e afinar localizadamente. Devido ao fato da área da seção reta diminuir após σ_R mais rapidamente do que o aumento da carga de deformação pelo encruamento, a carga necessária para deformar o corpo de prova diminuirá e a tensão convencional cairá até se atingir a fratura.

Em função da ocorrência dessa deformação não uniforme muitas tentativas foram feitas para racionalizar a distribuição de deformações num teste de tração. A conclusão mais geral que pode ser obtida é que corpos de prova geometricamente semelhantes desenvolvem regiões de pescoço geometricamente similares.

A forma e magnitude de uma curva tensão x deformação de um metal dependerá de sua composição, tratamento térmico, história anterior da deformação plástica e da taxa de deformação, temperatura e estado de tensões impostas durante o teste^(5,6).

Usualmente, o ensaio de tração permite a determinação das características de resistência e de ductilidade do material. O nível de deformação uniforme da amostra, a deformação total e especialmente a redução de área até a fratura podem ser utilizadas como indicadores da ductilidade do material. A resistência do material pode ser avaliada segundo:

Limite de escoamento: É a tensão que delimita a transição do regime de deformação elástica para deformação plástica. É definido como a relação entre uma carga necessária para promover um aumento de n % na deformação após o regime elástico, e a área inicial do corpo de prova. Geralmente, o valor de n é especificado para 0,2 % (para os metais e ligas metálicas em geral), o que significa uma deformação plástica de 0,002 por unidade de comprimento depois que se ultrapassa o limite de proporcionalidade (figura 3.3).

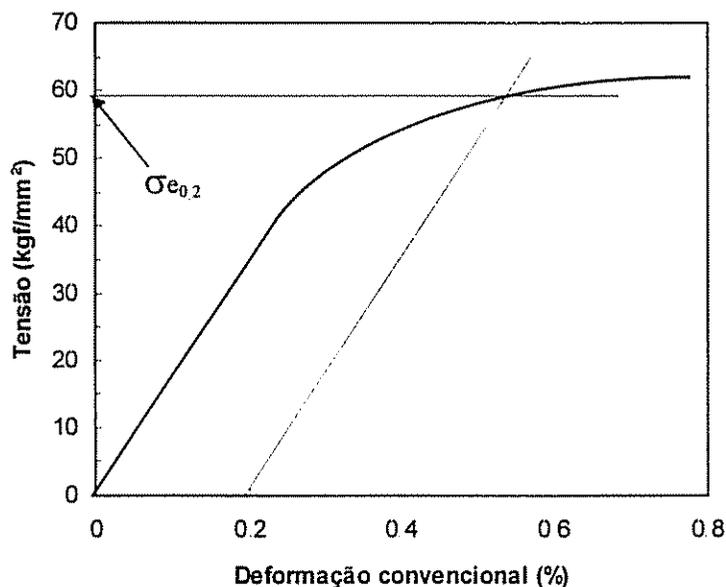


Figura 3.3- Determinação do limite convencional de escoamento a 0,2%.

Limite de resistência: É a carga máxima obtida no ensaio, dividida pela área da seção transversal inicial do corpo de prova.

Alongamento percentual (e): É definido como a relação percentual entre a variação no comprimento após ruptura (ΔL) e o comprimento inicial (L_0).

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Redução percentual de área: É a relação percentual entre a variação de área (ΔS) e a área inicial (S_0).

A curva tensão x deformação convencional não fornece uma indicação verdadeira das características de deformação de um metal, porque ela é baseada nas dimensões originais do corpo de prova. Essas dimensões mudam continuamente durante o ensaio; define-se a tensão verdadeira baseada na área real da seção reta transversal da amostra.

3.1.2 Ensaio de Compressão

O ensaio de compressão consiste em comprimir o corpo de prova entre duas matrizes. Uma vantagem deste ensaio é que uma ampla faixa de deformação pode ser efetuada sem a ocorrência de fratura. As condições de atrito e lubrificação entre as matrizes e o corpo de prova são bastantes significativas na execução desse teste. Pode-se notar que, como o ensaio de compressão é o precursor dos testes de ductilidade, grandes esforços são dedicados ao seu estudo, tendo assim se tornado o ensaio padrão para o estudo de ductilidade de materiais no forjamento.

são dedicados ao seu estudo, tendo assim se tornado o ensaio padrão para o estudo de utilidade de materiais no forjamento.

Grande parte das aplicações dos metais, atualmente, envolvem deformação plástica através de um processo de conformação mecânica, como trefilação, laminação, forjamento, entre outros. Torna-se útil então, a avaliação das deformações durante o processo, o que pode ser feito através de simulação deste por ensaios de compressão em pequenos cilindros retirados de blocos ou tiras. Uma dificuldade encontrada quando da utilização deste ensaio na simulação é a existência de atrito entre o metal e as matrizes de aplicação de carga da máquina, que causa barrilamento e dificulta as medições ou as torna muito imprecisas.

As condições de ensaio variam de acordo com as características de ductilidade do material. No caso de materiais dúcteis, é impossível medir os limites de resistência e/ou ruptura. Um corpo de prova cilíndrico de um material dúctil sujeito a um esforço axial de compressão tende, na zona plástica, a aumentar a sua seção transversal com um acréscimo da carga. Por esta razão, um material dúctil não se rompe ficando cada vez mais achatado até se transformar em um disco. Por outro lado, um material frágil não se deforma lateralmente de forma apreciável, e a ruptura ocorre por cisalhamento e escorregamento ao longo de um plano à 45° com a direção axial. O ensaio de compressão é realizado, supondo-se que haja uma certa homogeneidade na deformação. Tem-se, assim, um modelo simples relacionando as diversas variáveis básicas deste processo.

A equação que representa este processo de deformação de corpos entre placas planas e paralelas, sem a presença de atrito, é definida por:

$$\sigma = \frac{P \times h}{A_0 \times h_0} \quad (3.4)$$

sendo:

P: Carga axial de compressão;

h: Altura instantânea do cilindro;

A₀: Área inicial do cilindro sendo comprimido;

h₀: Altura inicial do cilindro a ser comprimido.

Uma outra grandeza que pode ser definida leva em consideração os parâmetros instantâneos do corpo de prova sendo carregado, e é denominada deformação logarítmica instantânea:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h_f} \quad (3.5)$$

A partir da suposição de homogeneidade de deformação no processo, pode-se elaborar um modelo simples para relacionar as variáveis básicas do processo de compressão. Entretanto, na prática esta hipótese não ocorre: devido ao atrito, o material em regiões mais afastadas da interface de contato escoar mais facilmente que em regiões mais próximas desta. Isto faz com que um corpo de prova cilíndrico adquira, após deformado, a forma de um barril, sendo que o grau de barrilamento depende do nível de atrito existente na interface de contato metal-matriz. Durante a deformação todas as seções transversais do cilindro experimentam uma expansão. Como resultado disto, os

tensões restringe a possibilidade do fluxo do material pertencente a estes planos e seu efeito se propaga até o interior do cilindro⁽⁴⁾. Ocorre neste então, uma região na qual o fluxo encontrará grande resistência à propagação, devido ao estado de tensões gerado pelo atrito. Tais regiões (uma em cada interface de contato) são denominadas “regiões ou volumes de fluxo restringido” e apresentam uma geometria como representada na figura 3.4.

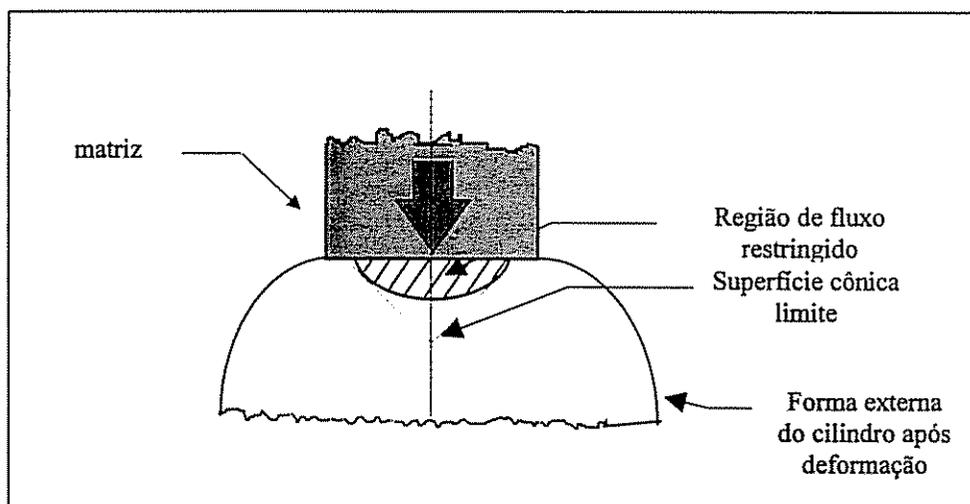


Figura 3.4 –Forma das regiões de fluxo restringido.⁽⁵⁾

Estes volumes de fluxo restringido estão limitados por superfícies aproximadamente cônicas, coaxiais com o cilindro, passando pelas bordas das bases, e experimentando uma escassa deformação. Face a isto, pouco ou nenhum endurecimento por deformação é verificado nestas regiões, as quais podem ser, eventualmente, consideradas como essencialmente elásticas, atuando como extensões das matrizes de deformação ou “falsas matrizes”. Sua geometria depende da altura do cilindro⁽⁶⁾ em relação ao seu diâmetro, como indicado na figura 3.5.

“falsas matrizes”. Sua geometria depende da altura do cilindro⁽⁶⁾ em relação ao seu diâmetro, como indicado na figura 3.5.

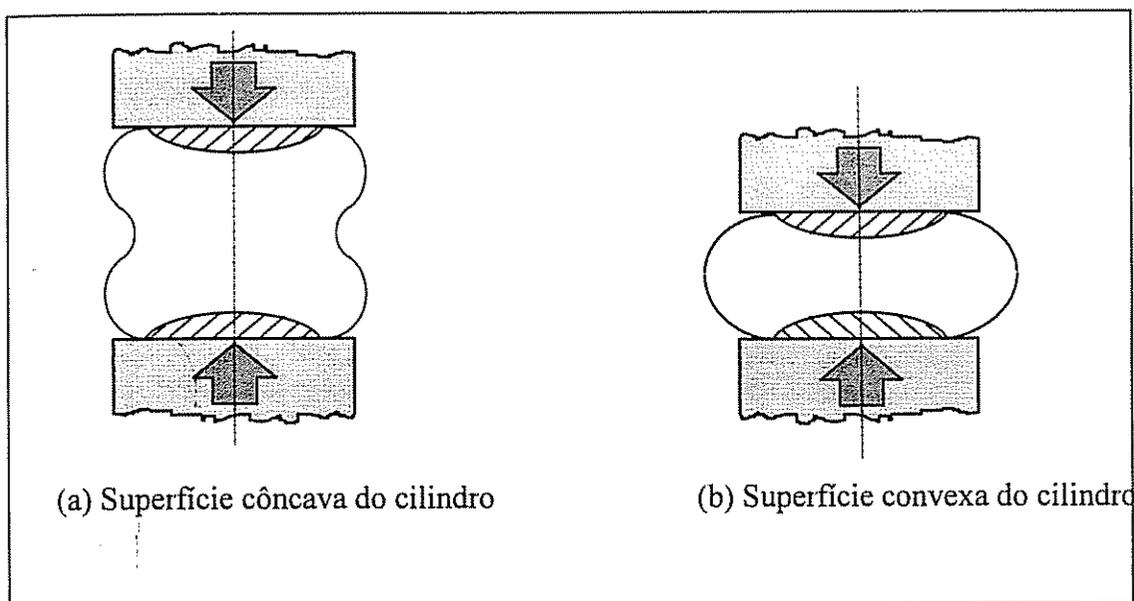


Figura 3.5 Efeito da relação D/h na geometria da deformação.⁽⁵⁾

3.1.3 Ensaio de torção

O ensaio de torção é um teste útil em muitas aplicações de engenharia e também em estudos teóricos do escoamento plástico. O ensaio pode fornecer informações importantes para especificação de materiais, mas, devido à complexidade dos cálculos e à maior dificuldade de preparação dos corpos de prova, esse é comumente substituído, nos ensaios de rotina, pelo ensaio de tração. Os testes de torção são realizados em corpos de prova para determinar propriedades tais como o módulo de elasticidade em cisalhamento, a tensão de escoamento em torção e o módulo de ruptura. Também podem ser realizados em peças em tamanho natural, como eixos, eixos de roda e brocas helicoidais que estão submetidos a carregamento em torção durante o serviço. Este teste

normalmente é utilizado para materiais frágeis tais como aços-ferramentas, e tem sido empregado na forma de teste de torção a altas temperaturas para avaliar a forjabilidade de materiais⁽⁶⁾. O teste de torção não foi padronizado tanto quanto o teste de tração, sendo raramente requerido nas especificações dos materiais.

O ensaio consiste em submeter o material (corpo de prova ou peça) a esforços de torção⁽⁶⁾. O equipamento utilizado consiste em um cabeçote de torção com um mandril para prender o corpo de prova e aplicar o momento de torção, e uma célula de carga com garras no outro extremo do corpo de prova, para medir o momento de torção ou o torque. São feitas determinações do deslocamento angular de um ponto próximo a um dos extremos da seção de teste do corpo de prova com relação a um ponto no mesmo elemento longitudinal no extremo oposto. Durante o ensaio são registrados o momento torsor (MT) e o ângulo de torção θ . Com o ângulo θ é possível calcular a deformação do material durante o ensaio. A deformação no ensaio, calculada pelo ângulo de torção, φ , expresso em graus, ou θ expresso em radianos (figura 3.6), é provocada pelo cisalhamento e é designada pelo símbolo γ . Se L_w for o comprimento útil do corpo de prova (ou base de medida), γ será dado por

$$\gamma = \text{tg}\varphi = \frac{K\theta}{L_w} \quad (3.6)$$

onde K é uma distância radial medida a partir do centro do corpo de prova, que tem uma seção radial de raio R ⁽⁶⁾.

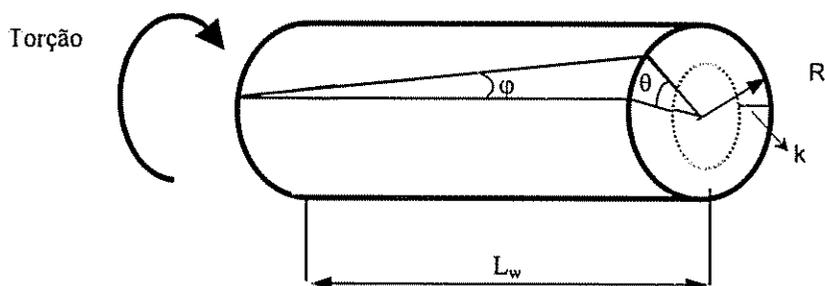


Figura 3.6-Torção em um corpo de prova de seção circular.⁽⁶⁾

Na análise das tensões no ensaio de torção é necessário que se faça algumas considerações: num corpo de prova sem tensões residuais, o esforço de torção pura causa um aumento linear da tensão de cisalhamento, desde o centro onde esta é zero até um máximo na superfície. Essa distribuição de tensões é verdadeira na região de deformações elástica. Ao fim da região elástica, devido ao gradiente de tensões, as camadas superficiais do corpo de prova podem atingir o regime plástico, enquanto as camadas mais internas ainda estão sob o regime elástico. Este fato pode levar a erros durante o cálculo das tensões de corpos de prova de seção sólida⁽⁶⁾.

3.2-Forjamento

O forjamento é a transformação dos metais em uma forma útil por prensagem ou martelagem. Esta é a mais antiga arte de transformação dos metais, sendo a sua origem ligada aos antigos ferreiros dos tempos bíblicos. Este processo pode ser realizado a quente ou a frio.

De uma forma geral, os processos de conformação a frio de peças metálicas pode ser analisado como uma combinação de "processos unitários". De acordo com a literatura,

os principais tipos de processos unitários que podem ser encontrados estão descritos na figura 3.7

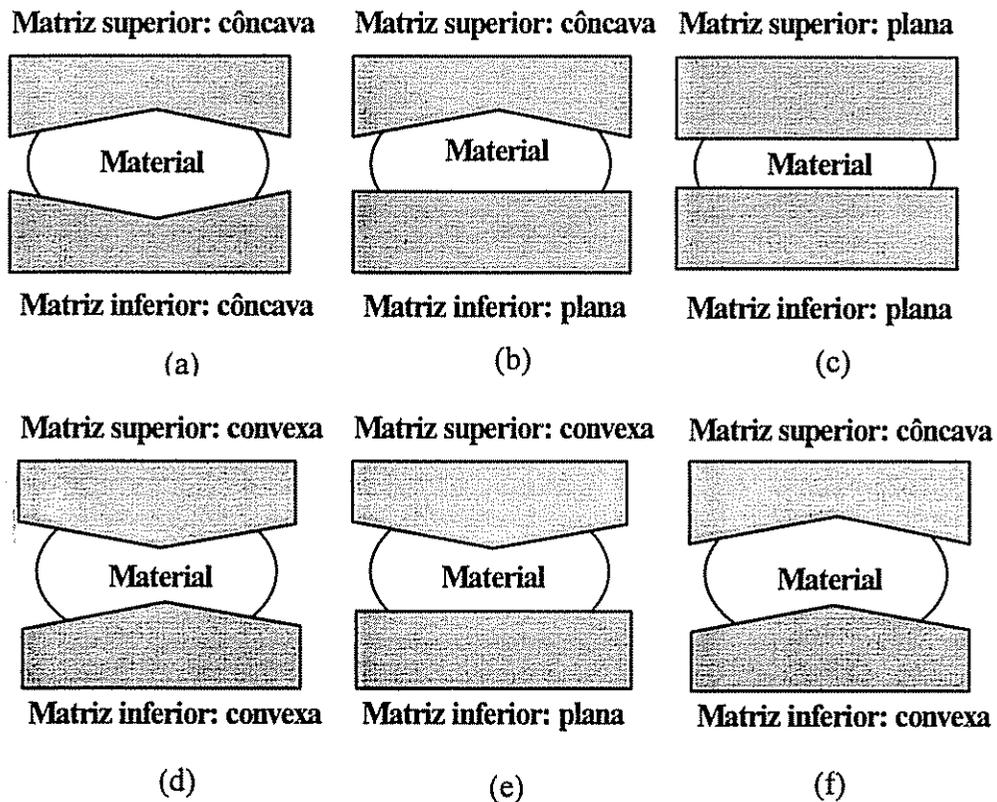


Figura 3.7-Processos unitários no forjamento a frio⁽¹⁾

Uma vez que o forjamento a frio pode ser realizado em uma série de etapas, do ponto de vista técnico este processo pode envolver grandes alterações de forma e dimensões no material. No entanto, dois aspectos limitativos devem ser considerados: o desgaste das matrizes sendo empregadas e a ocorrência de trincas no material.

Do ponto de vista do material sendo processado, o desgaste está basicamente associado à resistência mecânica⁽⁷⁾ deste material e à sua preparação superficial prévia. Por outro lado, as trincas estão ligadas à presença de defeitos anteriores no material e à ductilidade intrínseca do material. Os defeitos acima mencionados são oriundos de

Do ponto de vista do material sendo processado, o desgaste está basicamente associado à resistência mecânica⁽⁷⁾ deste material e à sua preparação superficial prévia. Por outro lado, as trincas estão ligadas à presença de defeitos anteriores no material e à ductilidade intrínseca do material. Os defeitos acima mencionados são oriundos de etapas anteriores de fabricação (por exemplo, pequenas dobras e trincas na laminação de fio-máquina que sofrerá posterior recalçamento a frio), e são de análise difícil ou impossível a nível de um laboratório universitário.

Por outro lado, a ductilidade intrínseca de um material é um aspecto que pode ser abordado em escala de laboratório. Comumente mede-se esta grandeza através de ensaios padrões tais como os de tração, recalque, torção, etc., e que possibilitam uma comparação entre os comportamentos dos diversos materiais. A dificuldade aqui encontrada é a transposição dos resultados obtidos para casos reais de forjamento/recalçamento a frio. Dentro desta situação, o mais interessante seria um estudo voltado para situações o mais próximas possíveis de casos reais. Muito poucos trabalhos deste tipo são encontrados na literatura, existindo somente uma abordagem para o caso de tipos de "trincas unitárias", à semelhança das operações unitárias já descritas, conforme figura 3.8.

3.3-Testes de Forjabilidade

São testes que visam avaliar a forjabilidade dos materiais submetendo-os a deformação entre um par de matrizes. Os testes de forjabilidade mais comuns são: teste de forjamento de cunha, teste de forjamento por pressão lateral e o teste do cone truncado.

3.3.1- Testes de Forjamento de Cunha

No teste de forjamento de cunha, um corpo de prova em formato de cunha é forjado entre matrizes paralelas. As dimensões da cunha precisam ser selecionadas de maneira que representem o material que está sendo testado.

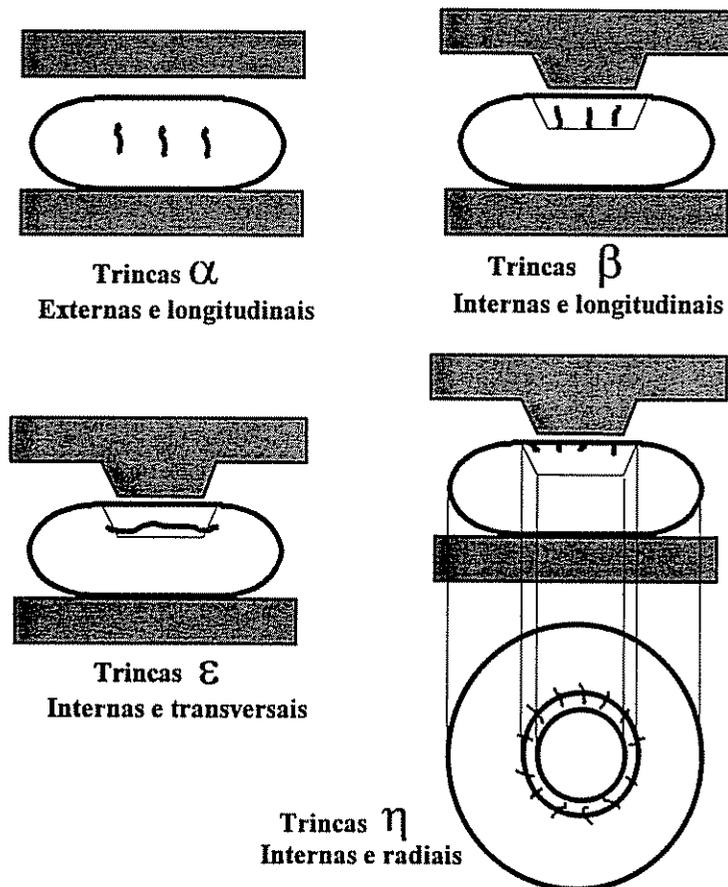


Figura 3.8-Trincas unitárias no forjamento a frio⁽¹⁾

Esse teste pode ser feito a várias temperaturas, de maneira que após cada teste, pode-se estabelecer a qual grau de deformação e temperatura começa a ocorrer a formação de trincas. Para o estudo do grau de deformação utiliza-se um sistema de grade que é

impresso na cunha, o qual nos permite avaliar as deformações superficiais. A figura 3.9 ilustra um corpo de prova em forma de cunha antes e após ser submetido ao ensaio, bem como apresenta a grade impressa para avaliação da deformação.

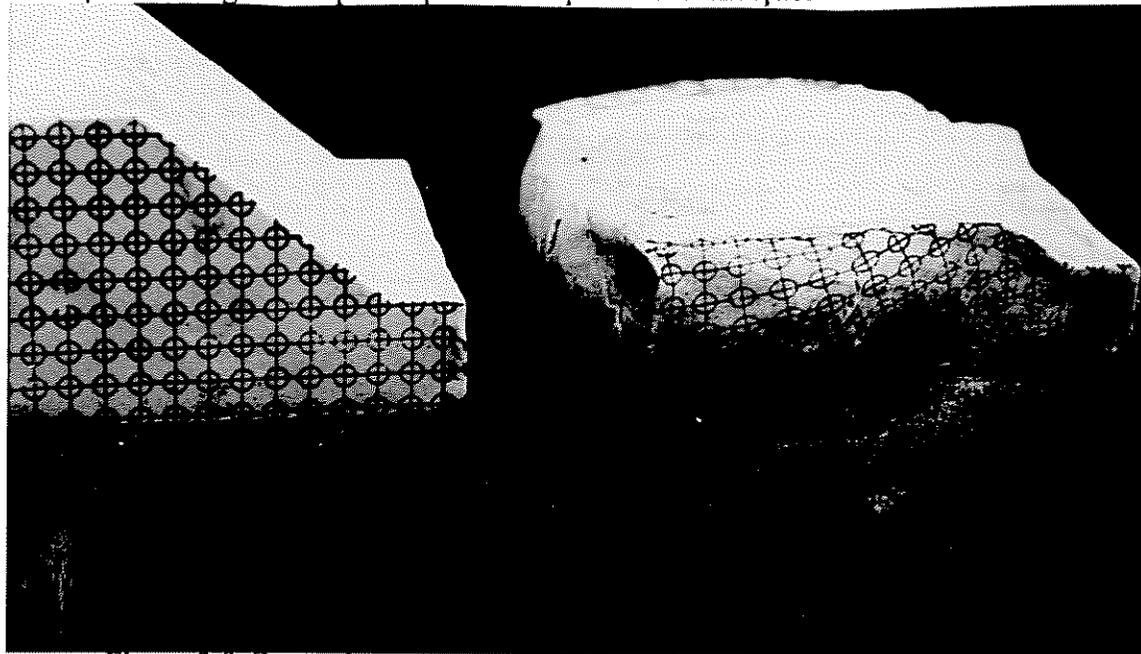
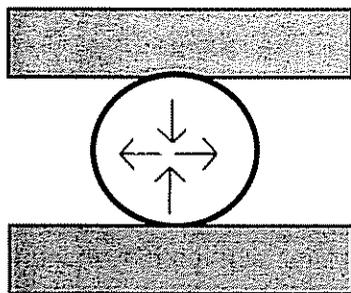


Figura 3.9-Corpo de prova em forma de cunha antes e apos o recalque.

3.3.2-Testes por pressão lateral

O teste de forjamento por pressão lateral⁽⁶⁾ consiste em comprimir um corpo de prova cilíndrico entre duas matrizes paralelas de maneira que o eixo do cilindro seja paralelo á superfície das matrizes. Neste teste, o eixo do corpo de prova está sujeito a elevadas tensões conforme pode ser observado na figura 3.10.



Tensões de tração e compressão
no corpo de prova

Figura 3.10-Corpo de prova submetido a ensaio de pressão lateral.

3.3.3-Ensaio de cone truncado

O ensaio consiste na indentação de um corpo de prova cilíndrico por uma matriz cônica cujas características geométricas são a altura (h) do cone, o diâmetro do cone (d), e um fator angular (ϕ) que é dado pela diferença entre os diâmetros menores e maiores do cone dividido por sua altura. O ensaio de cone truncado⁽¹⁾ apresenta a possibilidade de geração de alguns tipos de trincas. A figura 3.11 mostra a ocorrência de algumas dessas trincas em um corpo de prova à medida que variamos as dimensões das alturas e diâmetros das matrizes usadas na indentação do respectivo corpo de prova. A aplicação do ensaio de cone truncado no estudo da ocorrência de trincas em cabeças de parafusos fornece uma idéia da importância desse estudo na fabricação de peças forjadas.

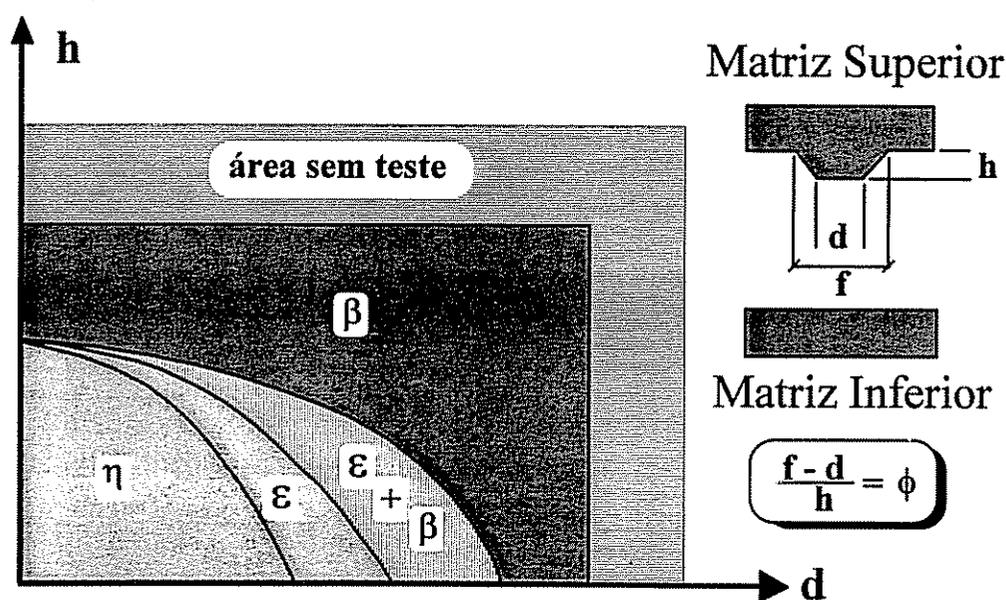


Figura 3.11-Resultados esquemáticos obtidos com a aplicação do ensaio de cone truncado⁽¹⁾

As trincas oriundas de etapas anteriores de fabricação são de difícil análise em laboratório. Tal estudo pode ser mais adequadamente realizado em conjunto com o acompanhamento dos defeitos típicos gerados em linhas de produção. A análise de um

semelhante à figura 3.7 c, a etapa II à figura 3.7 b, e finalmente, a etapa III é uma composição das figuras 3.7 b e 3.7 e. Na etapa I da figura 3.12, por exemplo, poderiam ser observadas trincas do tipo α mostradas na figura 3.8. Na etapa III da figura 3.12, poderiam ser encontradas trincas dos tipos β , ϵ , e η , ou uma mistura das mesmas.

Experiências tem sido realizadas visando determinar as condições em que ocorreriam estes diferentes tipos de trincas. A figura 3.13 ilustra, por exemplo, as condições geométricas para a ocorrência das trincas no forjamento de aço SAE 1045 inicialmente recozido (1 hora a 830°C), submetido a recalçamento com matriz em forma de cone truncado.

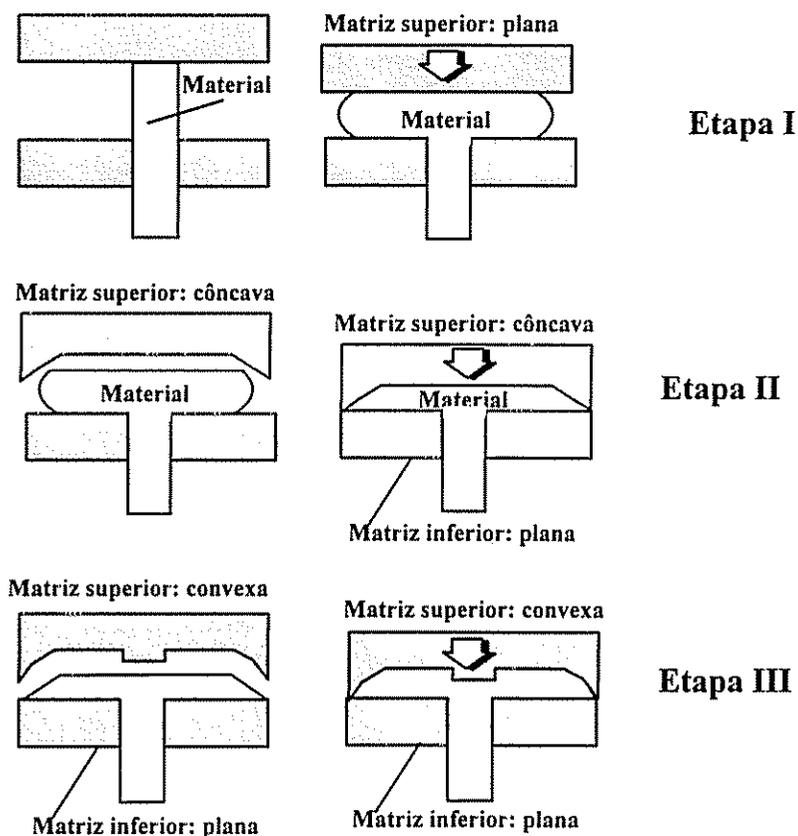


Figura 3.12-Etapas na fabricação da cabeça de um parafuso por forjamento a frio⁽⁵⁾

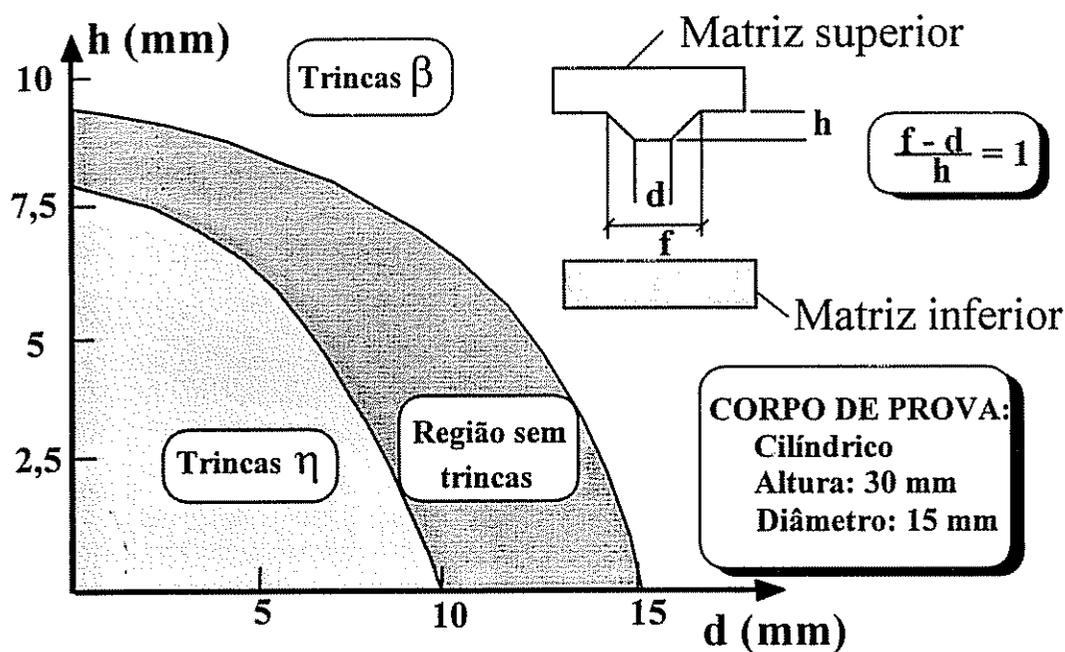


Figura 3.13-Condições geométricas para formação de trincas em aço SAE 1045 recozido⁽⁶⁾.

De acordo com a abordagem sugerida na literatura⁽⁷⁾ a fabricação de uma peça seria inicialmente decomposta em "operações unitárias" e a seguir examinam-se os tipos de "trincas unitárias" que poderiam ocorrer. Para cada tipo de trinca, são necessários resultados semelhantes aos mostrados na figura 3.13, a partir do qual seria possível prever se ocorrerão ou não trincas na operação real de forjamento proposta.

Como ilustrado na figura 3.14, as regiões onde ocorrem ou não as diferentes trincas dependem também do material sendo analisado.

A consideração da situação acima exposta indica que a tarefa de avaliar se um dado material trincar ou não numa operação de forjamento a frio é complexa e dispendiosa, face à enorme variedade de formas das diferentes peças que são fabricadas. É necessário um conjunto de gráficos semelhantes aos mostrados nas figuras 3.13 e 3.14 para cada material de interesse. Isto significa que hoje tais avaliações são comumente realizadas

industrialmente através de tentativa e erro, envolvendo a construção de dispendiosos conjuntos de matrizes.

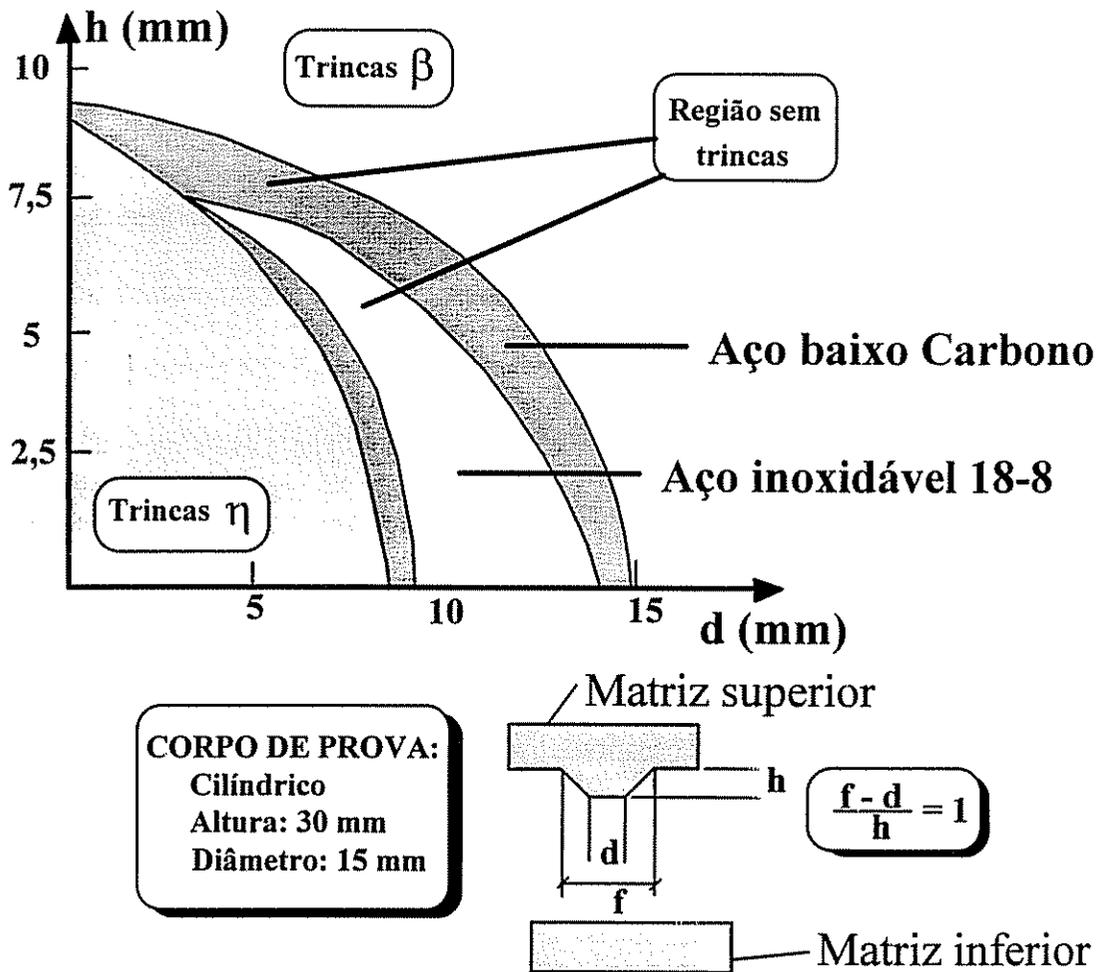


Figura 3.14-Influência do material sobre as condições geométricas para formação de trincas ⁽¹⁾

3.4-Simulação Física

Em escala real, experiências em equipamentos de conformação mecânica são onerosas, lentas e normalmente de difícil execução. Por isto, para o estudo do que ocorre com materiais ao serem conformados mecanicamente é necessário a utilização de artifícios para simplificar o estudo ^(8,9,10).

Para resolver tal problema, são usados por exemplo modelos matemáticos (método da deformação homogênea, método dos blocos, análise por elementos finitos etc.). O método da deformação homogênea supõe que o processo utilizado para se deformar um material é semelhante à tração pura. Neste caso o material está livre para deformar-se sem que nenhuma restrição lhe seja imposta externamente. Assim, até o instante em que se inicia a estricção, o material sofre deformação uniforme e homogênea. Uma vez que a deformação por tração pura requer menos energia que outros tipos de deformação, também as cargas necessárias aos processos serão menores do que as cargas requeridas para qualquer outro tipo de deformação. Esta energia pode ser calculada através do conhecimento da curva tensão x deformação sob tração pura (área abaixo do gráfico). A partir da hipótese de se ter um material não encruável ou no caso de se operar com um valor médio de tensão de escoamento, a energia de deformação pode ser obtida a partir do produto da tensão de escoamento pela deformação resultante.

Este método pode ser aplicado em vários processos tais como trefilação, forjamento, extrusão e laminação. Entretanto, é necessário destacar que, em processos reais, normalmente não ocorre a deformação homogênea e os valores calculados pelo método constituem mera aproximação inicial. A discrepância dos dados teóricos com relação aos valores medidos aumenta com a incidência de fatores que afastam o processo das condições ideais de deformação homogênea.

O método dos blocos (slab method) é outro método teórico para análise de processos de deformação mecânica. Fundamenta-se na obtenção de um estado de tensões que satisfaça as condições de equilíbrio. Ele pode considerar o trabalho de deformação uniforme e o trabalho de atrito, porém não leva em conta o trabalho de deformação

redundante, ou seja o trabalho responsável pelas deformações internas cisalhantes. Normalmente o material é dividido em blocos de acordo com a forma e simetria da matriz de deformação (paralelepípedo, disco, anel, etc.) O bloco tem dimensões infinitesimais segundo uma determinada direção normalmente coincidente com o eixo de simetria do corpo. As direções principais, para todo volume do corpo deformado, são as direções do eixo de simetria e dos eixos perpendiculares ao sistema de simetria. As tensões principais são constantes dentro de um determinado bloco. Com a aplicação do método dos blocos normalmente obtém-se uma equação de equilíbrio, que é uma equação diferencial em função da variável que localiza o bloco em relação à uma origem indicada no eixo de simetria.

A análise por elementos finitos é um dos mais recentes e mais poderosos procedimentos matemáticos no equacionamento de problemas de deformação plástica. Originalmente desenvolvido para solução de problemas de deformação elástica, é hoje utilizado em vários outros campos de aplicação tais como escoamento de fluídos e problemas de natureza térmica. O método pode ser aplicado a geometrias complexas e levar em conta condições mais realistas de atrito, contato superficial e propriedades do material, incluindo até mesmo a simulação de elementos de borracha. A grande diversidade de aplicações através da análise por elementos finitos tem se baseado no rápido desenvolvimento da área computacional. De um modo geral, o uso dos programas computacionais de elementos finitos passa inicialmente pela introdução da geometria da peça e da matriz de deformação, sendo que a possibilidade de utilizar-se simetrias é muito importante. Numa segunda etapa são programadas as características do material, condições de atrito, contato superficial e escolhidos os tipos de elementos finitos mais

adequados ao caso em questão. Estes elementos podem ser bi ou tridimensionais e apresentam características particulares indicadas pelo programa. Em seguida é feita a geração da malha de elementos finitos de acordo com o tamanho do elemento escolhido.

Quando um método analítico é usado para projetar um sistema físico, é essencial que sua validade seja testada fisicamente^(11,12,13,14,15). Desta maneira, não somente se obtém uma solução, que ajuda no desenvolvimento ou melhoria do modelo analítico, mas também demonstra-se a precisão das suas respostas. Por isso, o modelamento físico dá a segurança às aplicações técnicas analíticas usadas para resolver os problemas. Duas aproximações são geralmente usadas no projeto de sistemas físicos. A primeira consiste em fazer uma unidade de produção em laboratório, o mais semelhante possível com a escala de produção industrial, e monitorar e controlar os parâmetros importantes no processo. A segunda aproximação consiste em imaginar um ensaio em laboratório que seja mais fácil, rápido e mais barato que na escala semi industrial. Técnicas de simulação física e visioplasticidade são utilizadas para se obter uma análise da conduta do fluxo do material⁽¹⁶⁾. Neste método alteram-se algumas propriedades do material em questão (como dimensões, resistência mecânica, etc), com o objetivo de se avaliar outras propriedades. Os principais materiais modelo hoje em dia utilizados são:

- Cera
- Sódio
- Chumbo
- Alumínio
- Aço

- Plasticina (massa de modelar).

Todos esses materiais têm suas vantagens e desvantagens e conseqüentemente aplicações diversas, mas o principal deles é a plasticina⁽⁸⁾. Esta é amplamente usada em comparações qualitativas de diferentes condições no forjamento a quente de aços, especialmente em estudos do fluxo do material na extrusão, laminação, forjamento e em estudos da forma da seção vertical em laminação e recalçamento.

Existem dois métodos de estudo do fluxo de material com plasticina: um método consiste em fazer uma grade na superfície do corpo de prova com ferramenta ou mesmo silk-screen. Neste caso, o estudo é reduzido a um problema bi-dimensional. A grade é visível durante o experimento e pode ser fotografada ou filmada. O segundo método consiste em fazer uma pré-forma com plasticinas de várias cores. Neste caso, o fluxo do material não pode ser observado continuamente. Experimentos clássicos de modelamento utilizando plasticina começaram há mais de quarenta anos atrás na Inglaterra⁽¹⁵⁾. Os japoneses tem usado a plasticina por mais de 20 anos. Na verdade todas as principais indústrias de aço no Japão têm laboratórios de simulação física⁽³⁾ associados a seus laminadores. As extensas pesquisas no Japão tornaram o estudo da plasticina uma ciência. São muitas as vantagens da plasticina⁽¹⁶⁻¹⁹⁾ como material modelo :

1. É de fácil aquisição, barata, atóxica e reciclável.
2. Deforma-se sob baixas tensões mesmo à temperatura ambiente, o que em muito simplifica o aparato laboratorial necessário.

3. O fluxo interno de material em uma peça deformada é facilmente estudado com o uso de materiais de colorações diferentes.
4. Possui comportamento bastante semelhante aos metais (em especial o aço) trabalhados a altas temperaturas.
5. As propriedades da plasticina podem ser alteradas com facilidade, de forma que com este mesmo material modelo é possível simular processos executados com materiais diferentes. Uma das desvantagens apresentada pela plasticina é o fato da mesma apresentar heterogeneidade. A figura 3.15 ilustra exemplos de aplicação de plasticina.



Figura 3-15 Exemplo de aplicação de plasticina em simulação física

4- MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os materiais e os métodos experimentais empregados. Foram utilizados dois materiais modelo e um material real. Foram confeccionados corpos de prova para ensaios de cone truncado cujos resultados permitiram avaliar a utilidade dos mesmos. A figura 4.1 mostra a representação esquemática do procedimento experimental realizado.

4.1-Materiais

4.1.1 Material modelo acrílex

A plasticina acrílex é um material modelo comercialmente conhecido como massa de modelar acrílex. Apresenta como características principais o fato de não ser tóxica, de não endurecer com o tempo, e ser reciclável. É constituída quimicamente, segundo o fabricante, por parafina, cêras e pigmentos orgânicos. O principal problema encontrado no trabalho com esse tipo de plasticina foi que seu comportamento é variável por lote adquirido, o que compromete os resultados no sentido de não se ter um material homogêneo para a realização dos ensaios. A figura 4.2 nos mostra a plasticina acrílex utilizada para a confecção de corpos de prova para serem usados em ensaios de cone truncado e a figura 4.3 nos mostra corpos de prova confeccionados em plasticina acrílex. Devido a esta variabilidade de resultados os testes a serem feitos com a plasticina acrílex foram abandonados.

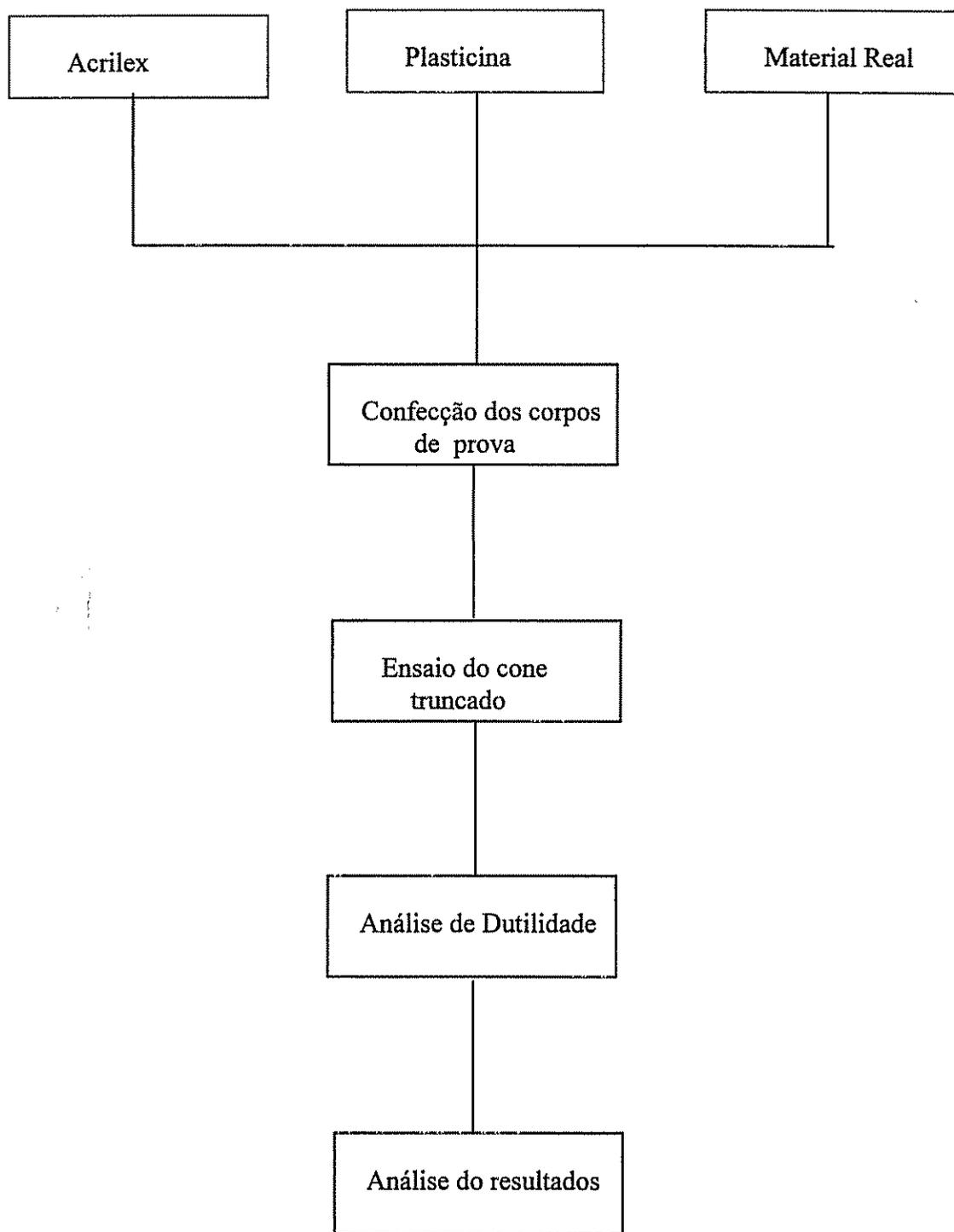


Figura 4.1-Representação esquemática do procedimento experimental.

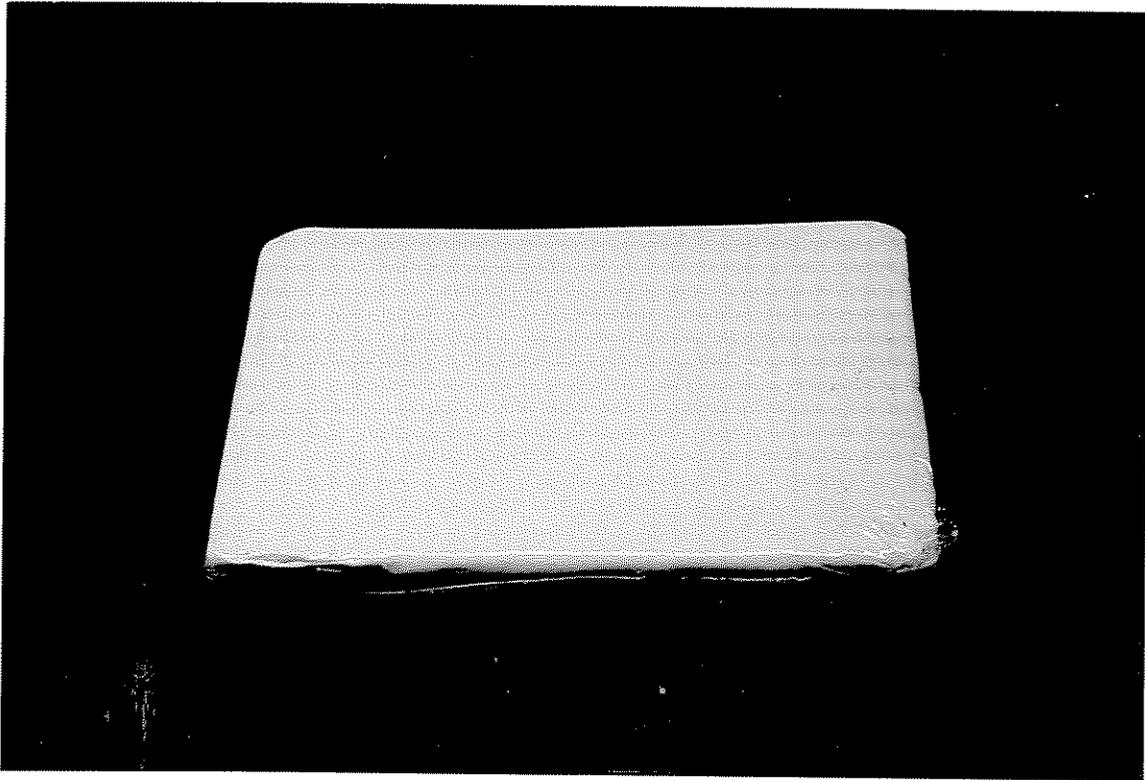


Figura 4.2-Plasticina acrílex utilizada para confecção dos corpos de prova a serem ensaiados.

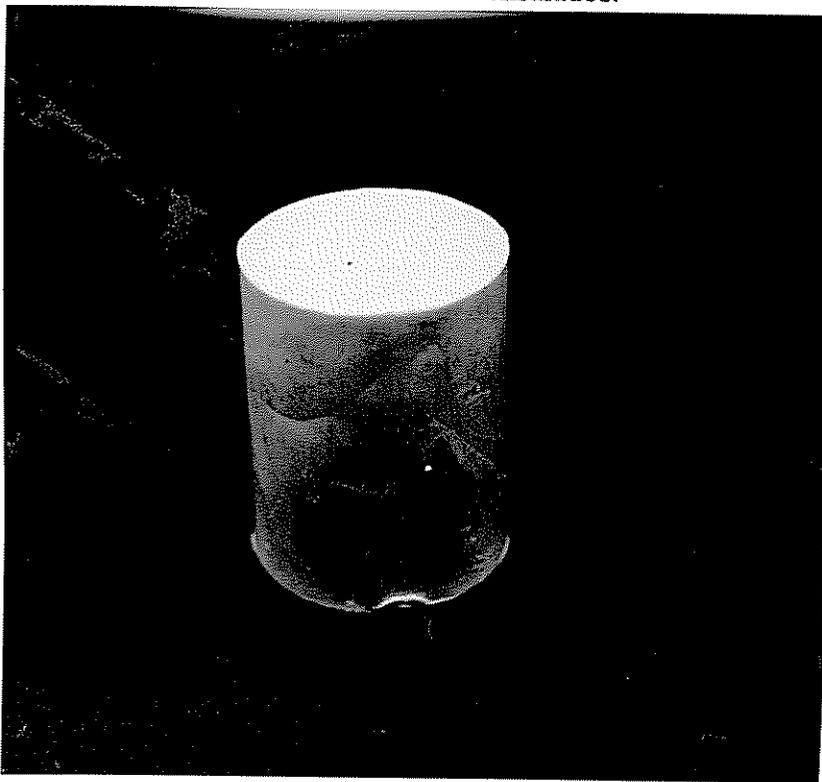


Figura 4.3-Corpo de prova de plasticina acrílex a ser usado em ensaio de cone truncado.

4.1.2-Material modelo plasticina

4.1.2.1-Fabricação da plasticina

Com o objetivo de se evitar um alto grau de variabilidade da plasticina industrial (Acrilex) foi desenvolvida uma técnica para a preparação da plasticina a ser usada em nossos experimentos. Misturou-se pó de CaCO_3 com vaselina sólida em diferentes proporções em peso dos constituintes; esses limites foram fixados baseados na facilidade de se produzir tais massas e no grau de sua consistência. As proporções de CaCO_3 e vaselina variam de 2:1 (2 kg de CaCO_3 para 1 kg de vaselina) a 4:1 (4 kg de CaCO_3 para 1 kg de vaselina).

As primeiras porções obtidas foram produzidas manualmente; no entanto dessa forma só foram possíveis a confecção de plasticina até a proporção de 3:1 devido à dificuldade de homogeneização. Massas com proporções maiores que 3:1 apresentaram heterogeneidades: grãos de plasticina envolvidas com gesso.

Novas maneiras para a produção de plasticina tiveram que ser procuradas pois com a confecção manual a produção é pequena e a agitação insuficiente. A primeira alternativa foi utilizar uma argamassadeira do Laboratório de Concreto (Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil- EEUFMG). No entanto, a argamassadeira não possuía motor com potência necessária para manter a rotação suficiente quando a massa começava a obter consistência. Tentou-se então utilizar equipamentos empregados em padarias (batedeiras, misturadores), de modo a suprir a falha da argamassadeira, entretanto o mercado só oferece máquinas destinadas a grandes produções. A seguir procurou-se usar uma máquina de moer carne, mas novos e maiores problemas foram constatados: como carregar o material na máquina e a necessidade de

se passar a massa várias vezes a fim de se obter consistência e homogeneização da plasticina. Como tentativa final, adaptou-se um gancho no lugar de uma broca em uma furadeira que operasse em baixa rotação conforme pode ser visto através da figura 4.4. Essa tentativa foi bem sucedida pois não apresentava os inconvenientes da argamassadeira (baixa potência) ou da máquina de moer carne (processo trabalhoso e lento). A figura 4.5 ilustra o material empregado.

A partir da padronização da preparação da plasticina pôde-se diferenciar a ductilidade das mesmas em termos da variação das proporções em peso de seus constituintes através do ensaio de qualificação. Este se baseia na compressão de corpos de prova até que seja observada a primeira trinca a olho nu. Os corpos de prova de plasticina para o ensaio de qualificação possuíam a mesma forma, dimensões, e foram confeccionados de modo similar que os de plasticina acrílica conforme descritos no tópico anterior. A partir desse teste concluiu-se então que plasticinas com maior proporção de CaCO_3 possuíam uma menor ductilidade, após um envelhecimento de 45 dias os corpos de prova foram confeccionados

4.1.2.2-Preparação dos corpos de prova

Os corpos-de prova de plasticina usados no ensaio de qualificação possuíam a forma cilíndrica e eram fabricados com plasticinas de proporções 3,5:1 (3,5 kg de CaCO_3 para 1 kg de vaselina). Na fabricação dos corpos de prova foi utilizado um molde na forma de um tubo cilíndrico. Esse molde era preenchido com plasticina e então com a ajuda de um pistão, o material era comprimido no seu interior para garantir o preenchimento completo do molde cilíndrico. Depois, ainda utilizando o pistão, o corpo-de-prova era retirado do molde, como num processo de extrusão (figura 4.6).

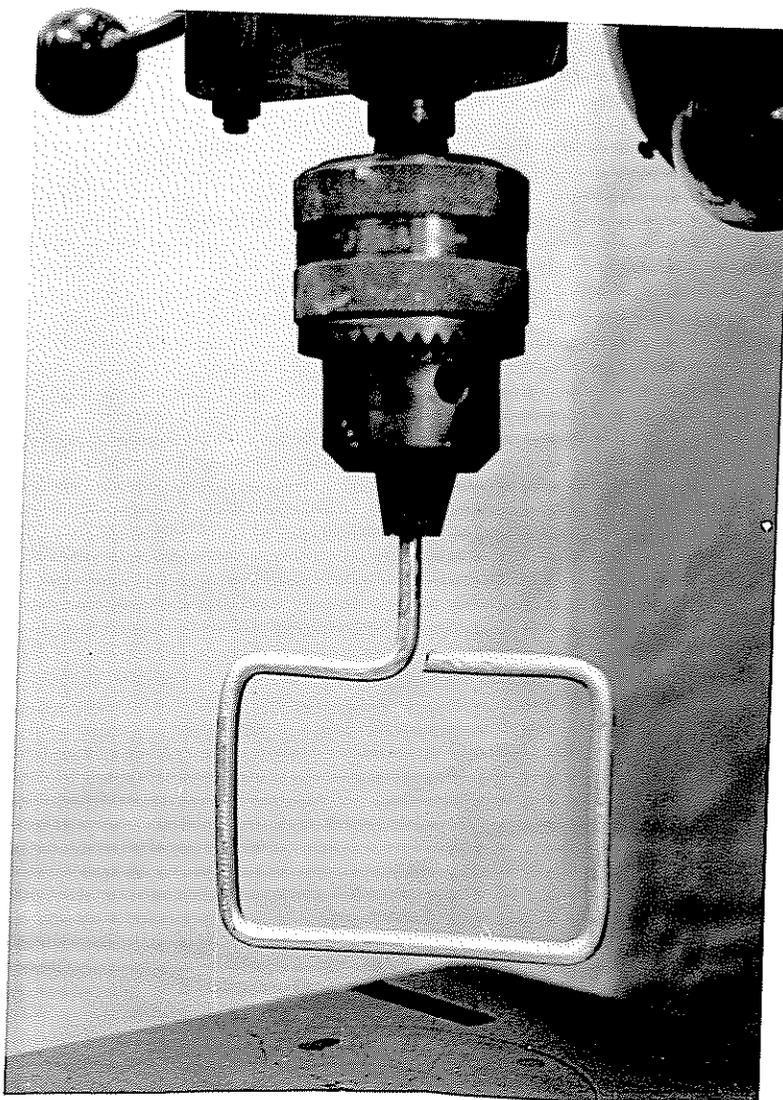


Figura 4.4-Gancho adaptado para misturar a plasticina

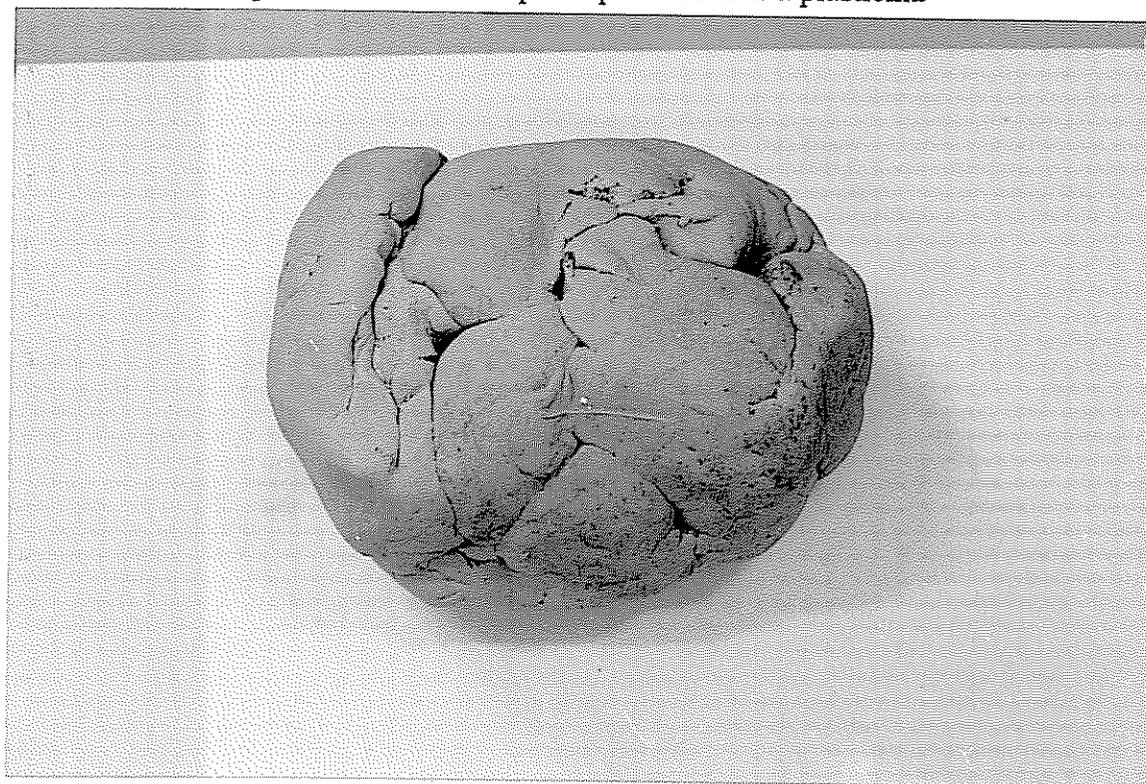


Figura 4.5-Plasticina utilizada para confecção dos corpos de prova a serem ensaiados.

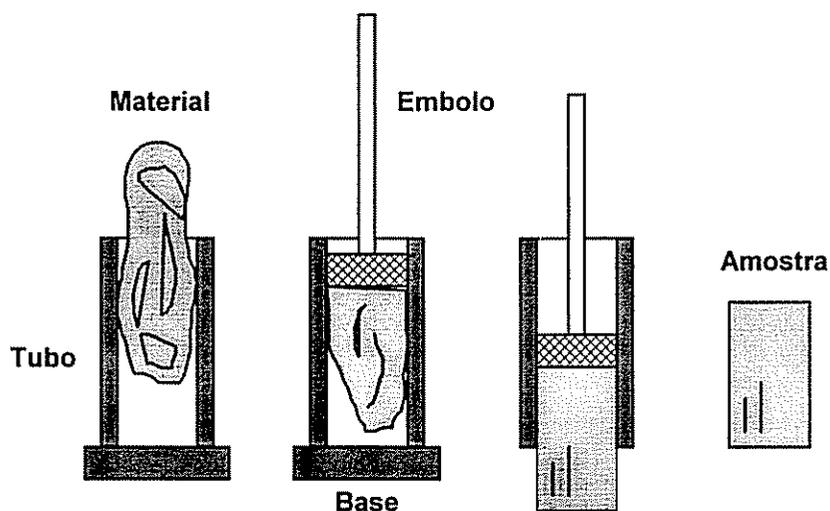


Figura 4.6-Processo esquemático de obtenção das amostras do material modelo.

Inicialmente era utilizada grafite como lubrificante no processo de fabricação dos corpos de prova cilíndricos, mas atualmente usa-se talco. Esta troca permitiu que toda a superfície lateral do corpo-de-prova fosse melhor visualizada. As dimensões dos corpos-de-prova estão ilustradas na figura 4.7 e na figura 4.8 é mostrado um corpo de prova a ser utilizado nos ensaios.

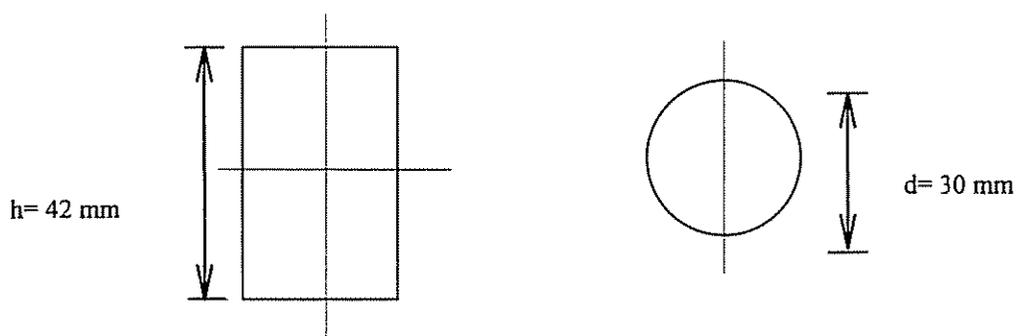


Figura 4.7-Dimensões dos Corpos-de-prova cilíndricos



Figura 4.8-Corpo de prova de plasticina a ser usado em ensaio de cone truncado.

4.1.3-Material real aço 1010

4.1.3.1-Descrição do material

O material real utilizado nos trabalhos foi o aço 1010, esferoidizado, fornecido pela Companhia Siderúrgica Belgo Mineira na forma de espiras de 5m de comprimento e diâmetro de 11 mm.

4.1.3.2-Composição química do material

O material, conforme recebido, foi submetido a uma análise química quantitativa para certificar-se de que se estava realmente trabalhando com o tipo de material que se propunha a estudar. O resultado da análise é mostrado na tabela IV.1

Tabela IV.1 - Composição química do aço utilizado no trabalho.

Elementos	Composição em peso (%)
Al	0,03
Si	0,08
S	0,01
Cr	0,02
Mn	0,39
C	0,08
P	0,015

4.1.3.3-Análise metalográfica

Após análise química o material real foi submetido a um ensaio metalográfico a fim de que se comprovasse através de análise microestrutural os resultados da análise química.

A figura 4.9 mostra a microestrutura do material real utilizado nos ensaios.

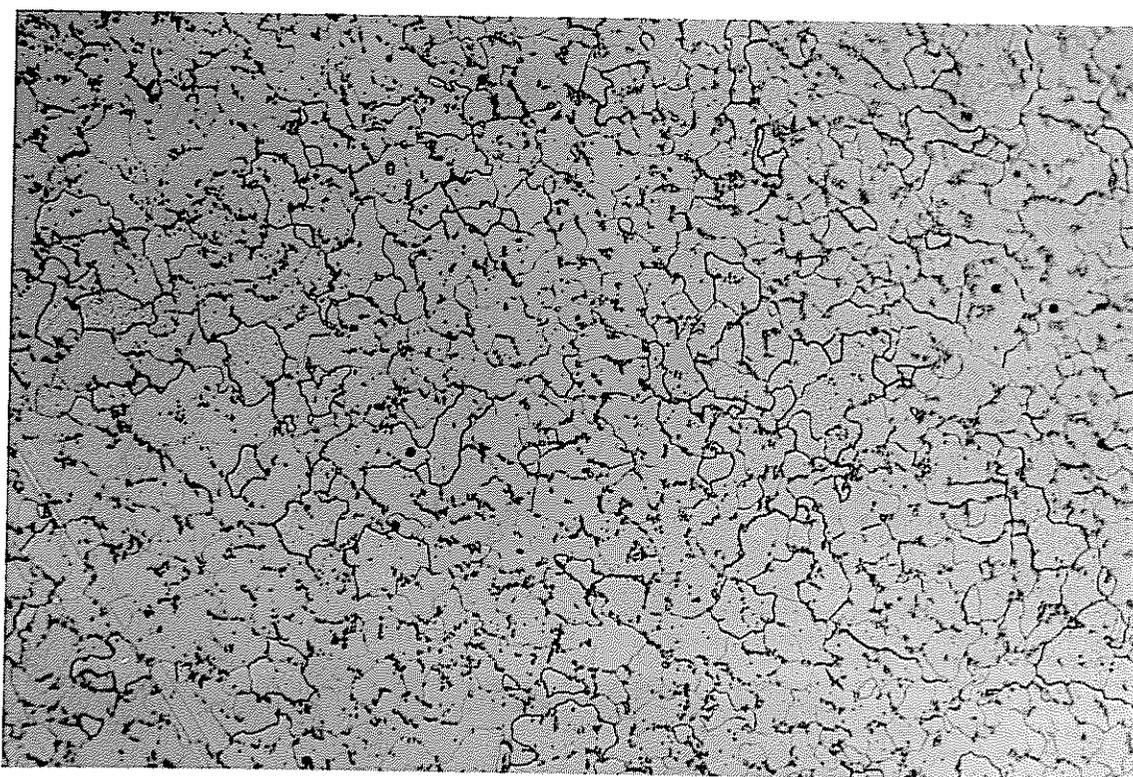


Figura 4.9-Micrografia do aço 1010 (ampliação 200 X , ataque Nital 2%.)

4.1.3.4-Confecção dos corpos de prova

Uma vez confirmada a composição química do material real deu-se início à etapa de confecção de 78 corpos de prova tendo como dimensões 14 mm de altura por 10 mm de diâmetro, conforme ilustrado na figura 4.10. Os corpos de prova de aço tinham dimensões de 1/3 daquelas dos de plasticina. Isto foi necessário para viabilizar sua compressão na máquina de ensaios disponível, cuja máxima capacidade era de 50t.



Figura 4.10-Corpo de prova de aço 1010 a ser usado em ensaio de cone truncado.

4.2-Ensaio de Cone Truncado

4.2.1-Equipamentos

Os ensaios de cone truncado foram realizados utilizando-se 39 matrizes de alumínio conforme ilustrado na figura 4.11 para os ensaios em plasticina. Para o material real foram feitas 39 matrizes de aço 1045 temperado e revenido até 48 HRC conforme visto na figura 4.12. Avaliou-se a redução de altura das amostras ensaiadas com as diferentes matrizes de cone truncado utilizando-se a máquina de ensaio Kratos do Laboratório de Engenharia do Produto e Seleção de Materiais da EEUFMG, equipada com sistema de aquisição de dados capaz de registrar a variação de altura das amostras (figura 4.13)

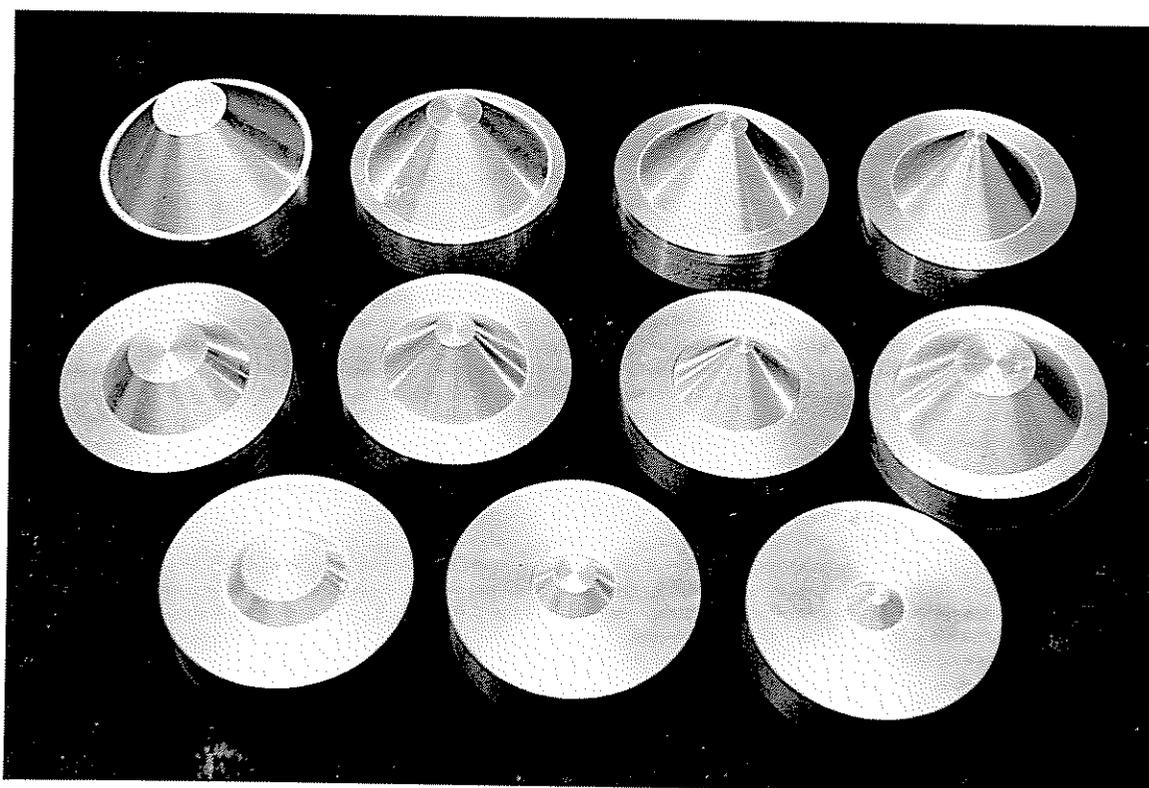


Figura 4.11-Matrizes de alumínio utilizadas no ensaio de cone truncado em materiais modelo.

A deformação em percentagem foi calculada dividindo-se a variação da altura pela altura inicial da amostra. Os ensaios foram realizados até o aparecimento das primeiras trincas, que foram classificadas de acordo com o conceito das trincas unitárias. No caso do material real, para os ensaios de cone truncado, foram necessárias algumas adaptações para que se centrasse o corpo de prova e as matrizes, uma vez que foram constatados que alguns corpos de prova não estavam sendo indentados em seu centro, o que poderia influenciar nas ocorrências de trincas. A figura 4.14 ilustra esse dispositivo de centragem, que consiste basicamente em uma guia de direcionamento acoplada na matriz e direcionada para a região central do corpo de prova a ser recalcado.

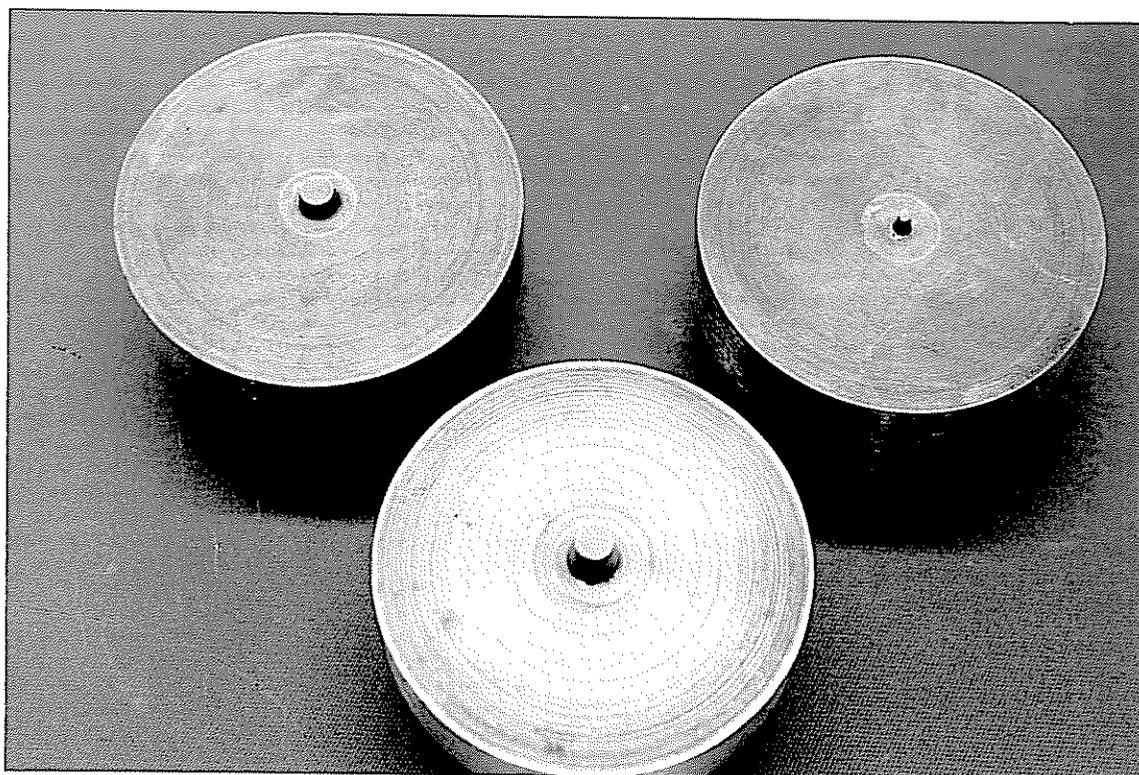


Figura 4.12-Matrizes de aço utilizadas no ensaio de cone truncado em material real.

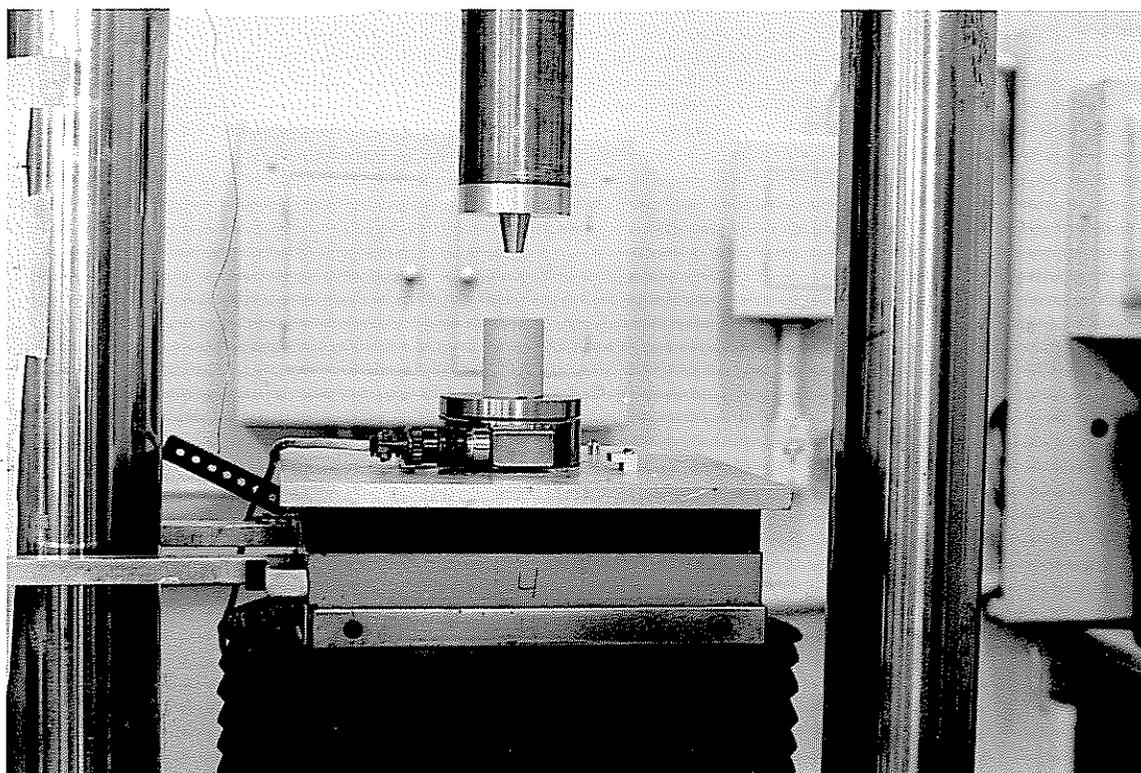


Figura 4.13-Ensaio de cone truncado sendo realizado em material modelo.

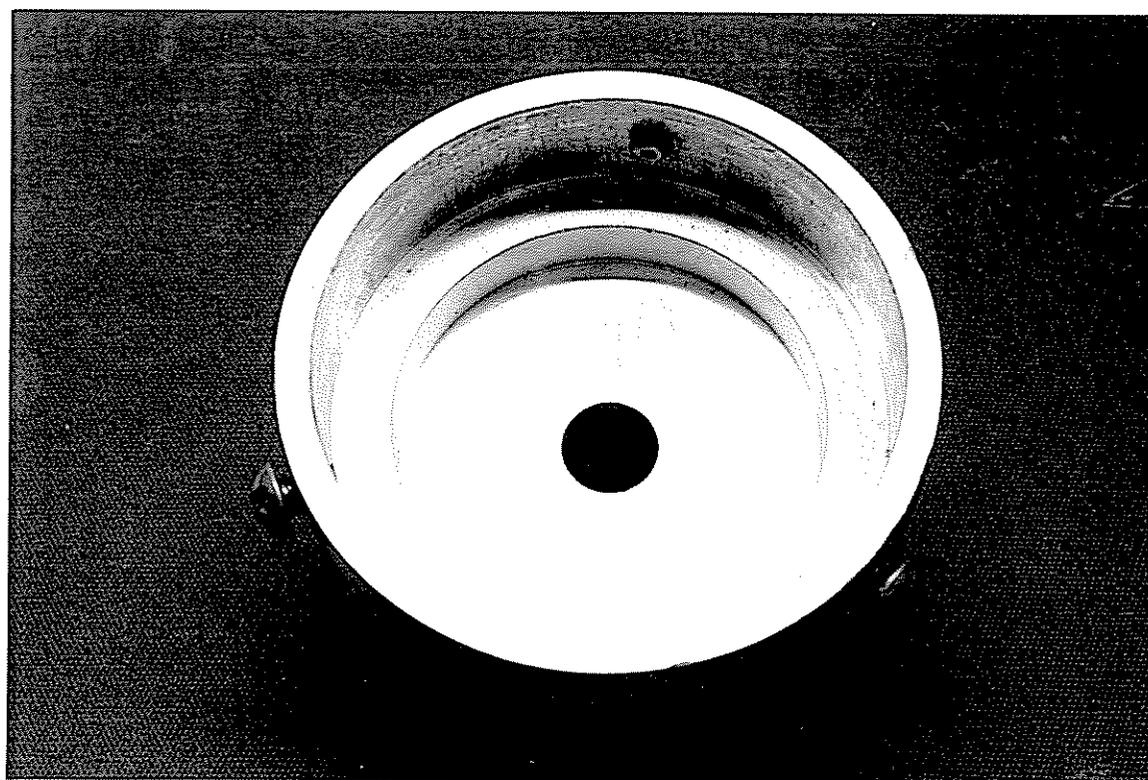


Figura 4.14-Dispositivo de centragem dos corpos de prova de aço

Foi estabelecida uma condição padrão de ensaio: velocidade de deslocamento igual a 1 mm/min, temperatura da amostra de 20°C. O coeficiente de atrito entre a matriz e a amostra também foi padronizado de acordo com a montagem, base de alumínio em contato com o material modelo com lubrificação por talco.⁽¹⁵⁾ A configuração geométrica das matrizes do ensaio de cone truncado (altura, diâmetro e parâmetro ϕ) utilizados para o material modelo e o aço são indicados na figura 4.15.

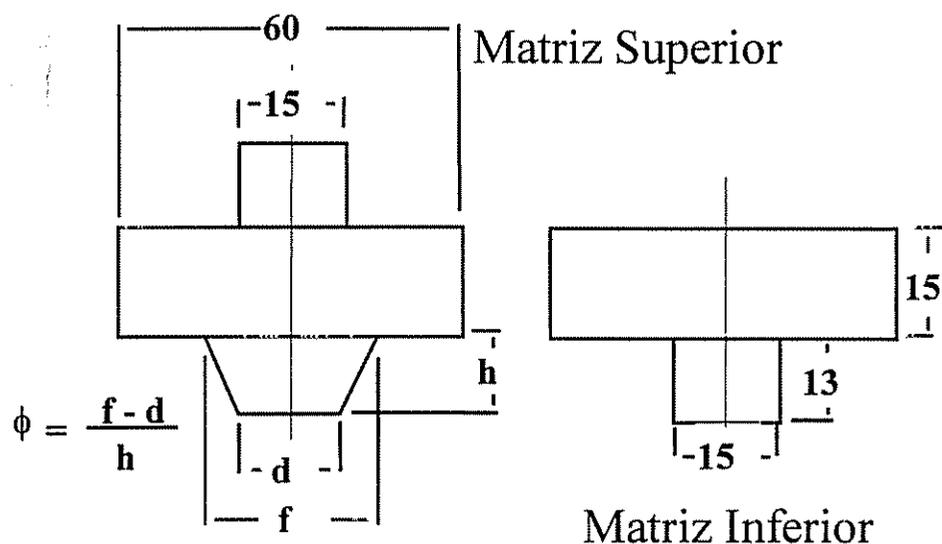
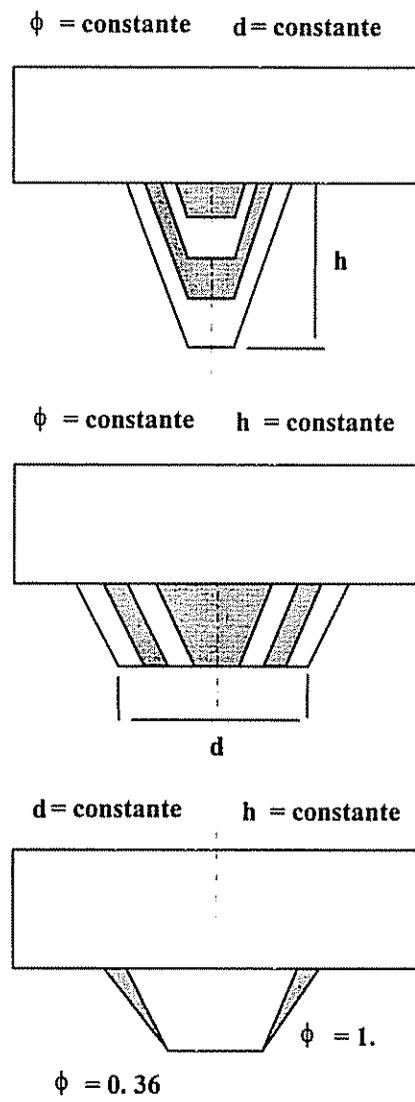


Figura 4.15-Configuração geométrica das matrizes do ensaio de cone truncado.

As matrizes superiores utilizadas no ensaio de cone truncado foram caracterizadas pelo parâmetro ϕ . Foram considerados três valores para ϕ : 0,36, 1,80, 4,3 (figura 4.16). As tabelas IV.2 IV.3 apresentam as dimensões usadas na confecção das matrizes em alumínio e em aço, respectivamente, d, h, e f são parâmetros mostrados na figura 4.15.



Matriz Superior

Figura 4.16-Esquema de variações geométricas das matrizes do ensaio de cone truncado

Tabela IV.2 Dimensões das matrizes em alumínio

Ângulo(Graus)	ϕ .	d (mm)	h (mm)	f (mm)
10	0,36	5	5	6,8
10	0,36	5	10	8,6
10	0,36	5	15	10,4
10	0,36	5	20	12,2
10	0,36	10	5	11,8
10	0,36	10	10	13,6
10	0,36	10	15	15,4
10	0,36	10	20	17,2
10	0,36	15	5	16,8
10	0,36	15	10	18,6
10	0,36	15	15	20,4
10	0,36	15	20	22,2
10	0,36	20	5	21,8
10	0,36	20	10	23,6
10	0,36	20	15	25,4
10	0,36	20	20	27,2
42	1,8	5	5	14
42	1,8	7	10	25
42	1,8	5	15	32
42	1,8	5	20	41
42	1,8	10	5	19
42	1,8	12	10	30
42	1,8	10	15	37
42	1,8	10	20	46
42	1,8	15	5,6	25,08
42	1,8	15	10	33
42	1,8	15	16	43,8
42	1,8	15	20	51
42	1,8	20	5	29
42	1,8	20	10	38
42	1,8	20	15	47
42	1,8	20	20	56
65	4,3	5	5	26,5
65	4,3	5	10	48
65	4,3	10	5	31,5
65	4,3	7	10	50
65	4,3	15	5	36,5
65	4,3	12	10	55
65	4,3	20	5	41,5

Tabela IV.3 Dimensões das matrizes em aço

Ângulo(Graus)	ϕ .	d (mm)	h(mm)	f(mm)
10	0,36	1,7	1,7	6,8
10	0,36	1,7	3,3	8,6
10	0,36	1,7	5,0	10,4
10	0,36	1,7	6,7	12,2
10	0,36	3,3	1,7	11,8
10	0,36	3,3	3,3	13,6
10	0,36	3,3	5,0	15,4
10	0,36	3,3	6,7	17,2
10	0,36	5,0	1,7	16,8
10	0,36	5,0	3,3	18,6
10	0,36	5,0	5,0	20,4
10	0,36	5,0	6,7	22,2
10	0,36	6,7	1,7	21,8
10	0,36	6,7	3,3	23,6
10	0,36	6,7	5,0	25,4
10	0,36	6,7	6,7	27,2
42	1,8	1,7	1,7	14
42	1,8	2,3	3,3	25
42	1,8	1,7	5,0	32
42	1,8	1,7	6,7	41
42	1,8	3,3	1,7	19
42	1,8	4,0	3,3	30
42	1,8	3,3	5,0	37
42	1,8	3,3	6,7	46
42	1,8	5,0	1,9	25,08
42	1,8	5,0	3,3	33
42	1,8	5,0	5,3	43,8
42	1,8	5,0	6,7	51
42	1,8	6,7	1,7	29
42	1,8	6,7	3,3	38
42	1,8	6,7	5,0	47
42	1,8	6,7	6,7	56
65	4,3	1,7	1,7	26,5
65	4,3	1,7	3,3	48
65	4,3	3,3	1,7	31,5
65	4,3	2,3	3,3	50
65	4,3	5,0	1,7	36,5
65	4,3	4,0	3,3	55
65	4,3	6,7	1,7	41,5

5-RESULTADOS

As tabelas V.1 , V. 2 , V.3 e V.4 ilustram, respectivamente, os resultados obtidos nos ensaios de cone truncado realizados com o material modelo (plasticina) e o material real (aço). As figuras de 5.1 a 5.5 ilustram os tipos de trincas que foram observadas nos ensaios.

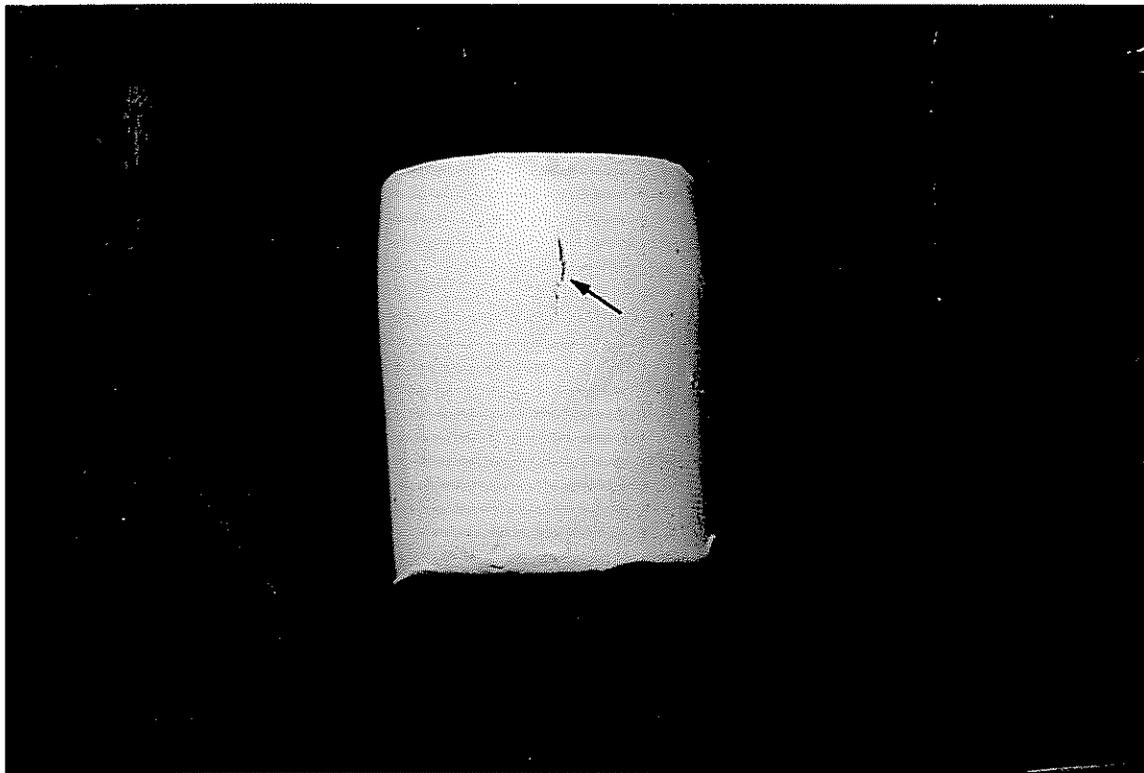


Figura 5.1-Corpo de prova de plasticina apresentando trinca superficial do tipo α .

Tabela V.1- Tipos de trincas unitárias obtidas nos ensaios de cone truncado com o material modelo (amostra 1).

Matriz	ϕ .	d (mm)	h (mm)	Amostra 1	
				Trinca	Deformação %
1	0.36	5	5	α	71.9
2	0.36	5	10	η	31.6
3	0.36	5	15	η	28.8
4	0.36	5	20	η	62.8
5	0.36	10	5	α	42.6
6	0.36	10	10	ε	31.2
7	0.36	10	15	α	34.0
8	0.36	10	20	η	19.3
9	0.36	15	5	α	19.8
10	0.36	15	10	ε	19.5
11	0.36	15	15	α	9.8
12	0.36	15	20	α	10.7
13	0.36	20	5	α	23.3
14	0.36	20	10	ε	23.1
15	0.36	20	15	α	29.3
16	0.36	20	20	α	15.2
17	1.80	5	5	α	76.7
18	1.80	5	10	η	55.5
19	1.80	5	15	η	37.4
20	1.80	5	20	η	12.1
21	1.80	10	5	α	24.5
22	1.80	10	10	α	10.0
23	1.80	10	15	ε	10.2
24	1.80	10	20	η	16.9
25	1.80	15	5	α	30.7
26	1.80	15	10	α	11.7
27	1.80	15	15	ε	14.5
28	1.80	15	20	ε	17.1
29	1.80	20	5	α	18.5
30	1.80	20	10	α	16.4
31	1.80	20	15	ε	6.9
32	1.80	20	20	ε	10.2
33	4.3	5	5	α	25
34	4.3	5	10	α	40
35	4.3	10	5	α	24
36	4.3	7	10	α	30
37	4.3	15	5	α	40
38	4.3	12	10	α	26
39	4.3	20	5	α	35

Tabela V.2-Tipos de trincas unitárias obtidas nos ensaios de cone truncado com o material modelo (amostra 2).

Matriz	ϕ .	d (mm)	h (mm)	Amostra 2	
				Trinca	Deformação %
1	0.36	5	5	α	74.0
2	0.36	5	10	η	31.6
3	0.36	5	15	η	33.3
4	0.36	5	20	η	51.9
5	0.36	10	5	α	47.8
6	0.36	10	10	ε	31.4
7	0.36	10	15	α	32.4
8	0.36	10	20	η	19.5
9	0.36	15	5	α	19.5
10	0.36	15	10	ε	18.8
11	0.36	15	15	α	10.2
12	0.36	15	20	α	9.3
13	0.36	20	5	α	24.0
14	0.36	20	10	ε	24.3
15	0.36	20	15	α	31.2
16	0.36	20	20	α	20.2
17	1.80	5	5	α	73.3
18	1.80	5	10	η	59.8
19	1.80	5	15	η	36.4
20	1.80	5	20	η	14.8
21	1.80	10	5	α	28.8
22	1.80	10	10	α	12.4
23	1.80	10	15	ε	15.0
24	1.80	10	20	η	15.2
25	1.80	15	5	α	28.8
26	1.80	15	10	α	16.2
27	1.80	15	15	ε	19.3
28	1.80	15	20	ε	10.2
29	1.80	20	5	α	17.1
30	1.80	20	10	α	17.4
31	1.80	20	15	ε	9.8
32	1.80	20	20	ε	7.6
33	4.3	5	5	α	25
34	4.3	5	10	α	43
35	4.3	10	5	α	20
36	4.3	7	10	α	30
37	4.3	15	5	α	38
38	4.3	12	10	α	28
39	4.3	20	5	α	38

Tabela V.3- Tipos de trincas unitárias obtidas nos ensaios de cone truncado com o material real (amostra 1)

Matriz	ϕ	d (mm)	h (mm)	Amostra 2	
				Trinca	Deformação %
1	0.36	1,7	1,7	β	22
2	0.36	1,7	3,3	β	31
3	0.36	1,7	5,0	β	20
4	0.36	1,7	6,7	β	28
5	0.36	3,3	1,7	β	32
6	0.36	3,3	3,3	β	31.2
7	0.36	3,3	5,0	β	21
8	0.36	3,3	6,7	β	19.3
9	0.36	5,0	1,7	-	19.8
10	0.36	5,0	3,3	β	31
11	0.36	5,0	3,3	β	21
12	0.36	5,0	6,7	β	32
13	0.36	6,7	1,7	-	23.3
14	0.36	6,7	3,3	-	23.1
15	0.36	6,7	5,0	β	29.3.2
16	0.36	6,7	6,7	-	15.2
17	1.80	1,7	1,7	ϵ	41
18	1.80	2,3	3,3	-	25
19	1.80	1,7	5,0	-	37.4
20	1.80	1,7	6,7	-	28
21	1.80	3,3	1,7	-	24.5
22	1.80	4,0	3,3	ϵ	50
23	1.80	3,3	5,0	ϵ	32
24	1.80	3,3	6,7	ϵ	49
25	1.80	5,0	1,9	ϵ	30.7
26	1.80	5,0	3,3	ϵ	44
27	1.80	5,0	5,3	ϵ	45
28	1.80	5,0	6,7	ϵ	24.3
29	1.80	6,7	1,7	ϵ	25.4
30	1.80	6,7	3,3	ϵ	51
31	1.80	6,7	5,0	-	46.4
32	1.80	6,7	6,7	-	57
33	4,3	1,7	1,7	-	57
34	4,3	1,7	3,3	-	57
35	4,3	3,3	1,7	-	57.8
36	4,3	2,3	3,3	ϵ	38.6
37	4,3	5,0	1,7	-	45.4
38	4,3	4,0	3,3	-	45.7
39	4,3	6,7	1,7	ϵ	58.5

-: Representa região com ausência de trincas



Figura 5.2-Corpo de prova de plasticina apresentando trinca do tipo η .

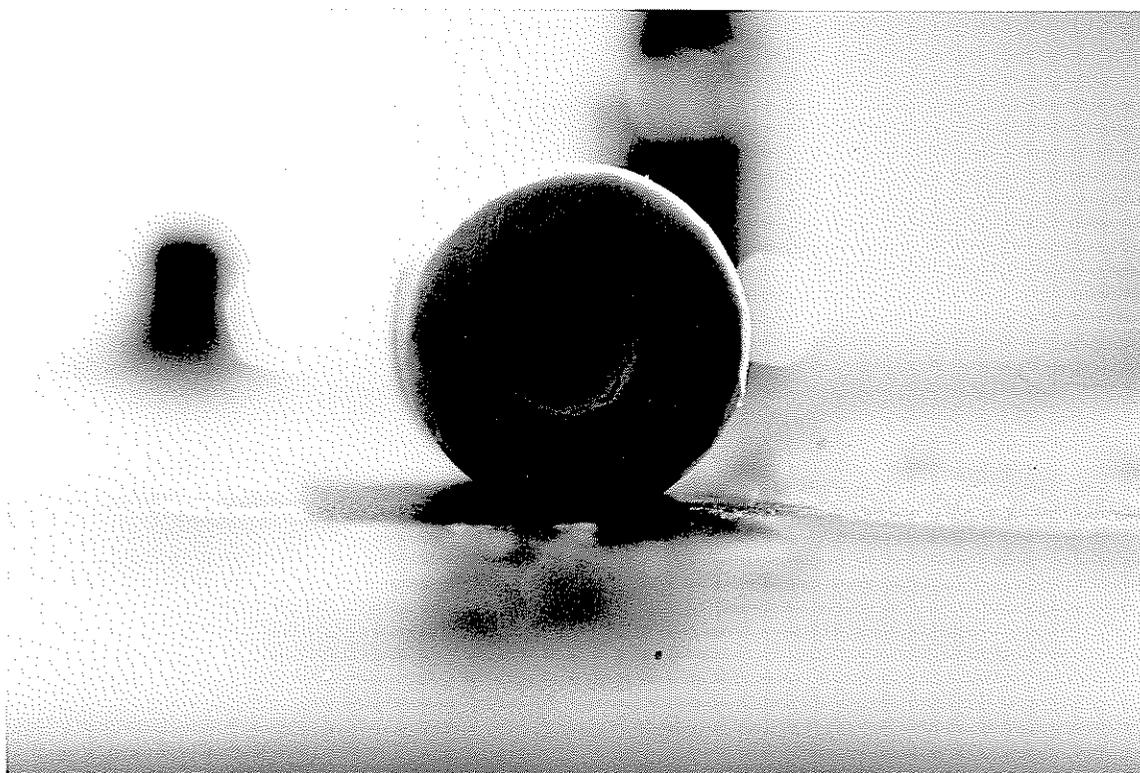


Figura 5.3-Corpo de prova de plasticina apresentando trinca do tipo ϵ .

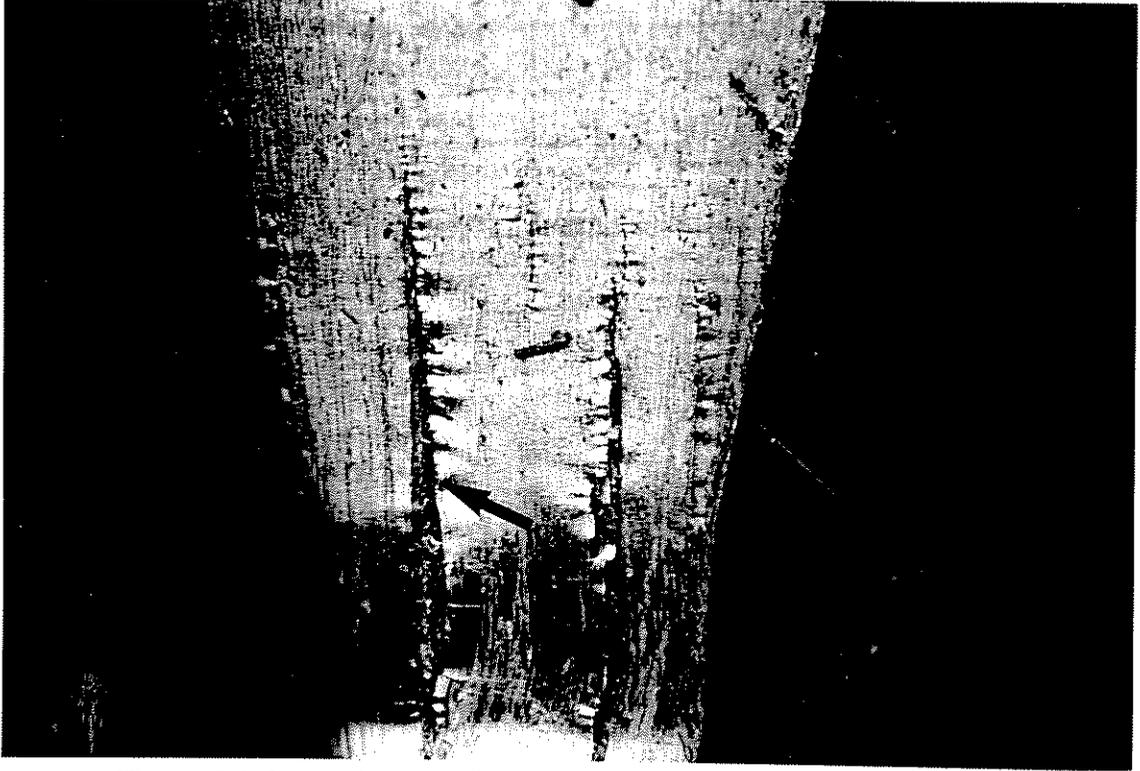


Figura 5.4-Corpo de prova de aço apresentando trinca do tipo β . (25x)

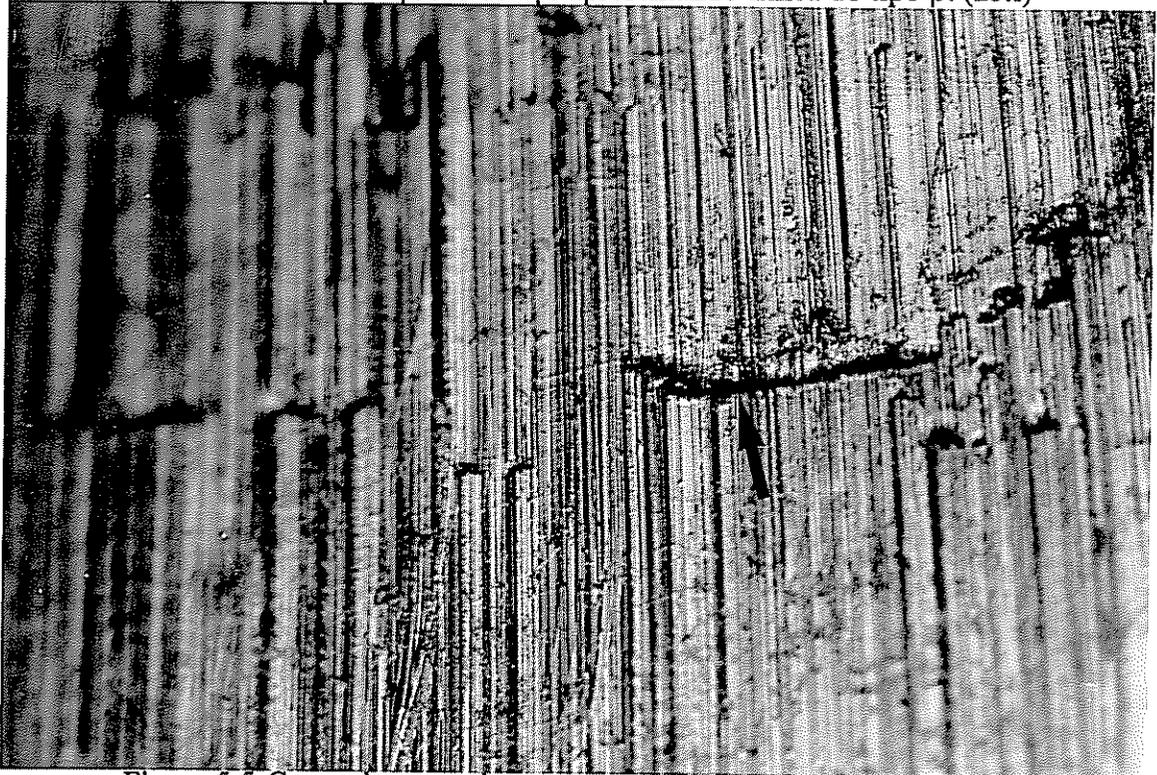


Figura 5.5-Corpo de prova de aço apresentando trinca do tipo ϵ . (100x)

6-DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através dos resultados obtidos nos ensaios de cone truncado foi possível o mapeamento do tipo de trinca predominante em cada material utilizado, bem como para cada fator ϕ . O mapeamento consiste em locar em um gráfico altura (dada pela razão entre as alturas do cone truncado e o corpo de prova = h_{ct}/h_{cp}) versus diâmetro (dado pela razão entre os diâmetros do cone truncado e do corpo de prova = d_{ct}/d_{cp}) as regiões de ocorrência de cada tipo de trinca.

6.1-Plasticina

Para a plasticina verifica-se que para ângulos pequenos (fator $\phi = 0,36$) ocorre um predomínio de trincas do tipo α , em duas situações: quando se trabalha com matrizes que apresentam pequenas alturas (h), independente do valor do diâmetro, e quando utilizam-se grandes alturas e grandes diâmetros. As trincas do tipo ϵ surgem quando utilizam-se matrizes de grandes diâmetros e alturas medianas. Trincas do tipo η surgem ao se utilizar matrizes de grandes alturas e pequenos diâmetros. Essas observações podem ser visualizadas através da figura 6.1. Com o aumento do ângulo (fator $\phi = 1,8$) observa-se uma pequena variação na distribuição de trincas: a região que anteriormente era ocupada pelas trincas do tipo ϵ originárias de matrizes de alturas médias e grandes diâmetros, é substituída pelas trincas do tipo α , ao passo que a região que anteriormente era ocupada pelas trincas α , originárias de matrizes de grandes alturas e grandes diâmetros, passa a ser ocupada pelas trincas do tipo ϵ . Com relação as trincas do tipo η não ocorreu nenhuma variação, mantendo o campo de grandes alturas e pequenos diâmetros. Pode-se constatar essas observações através da análise da figura 6.2.

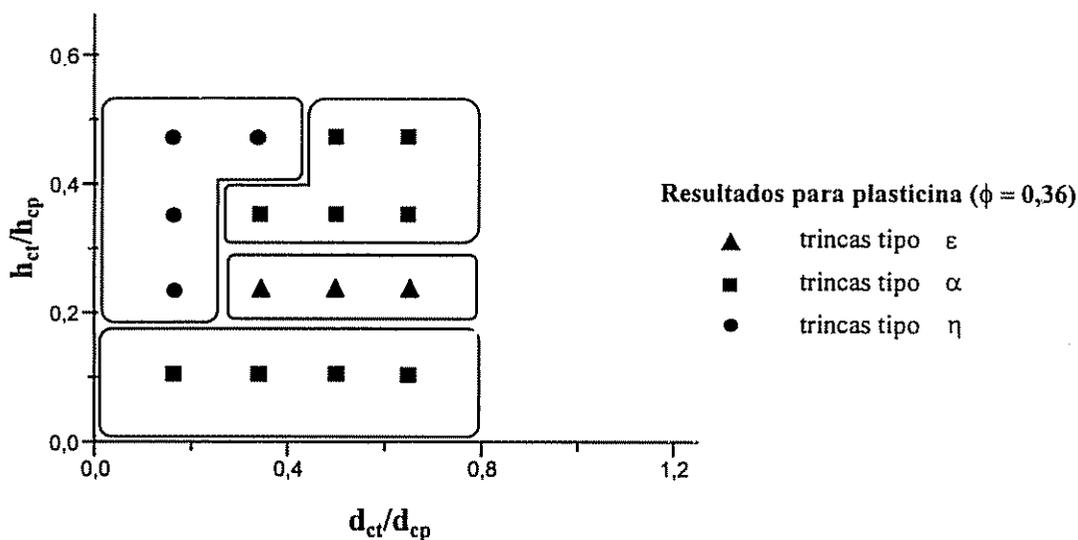


Figura 6.1-Resultado do ensaio de cone truncado para a plasticina ensaiada com fator $\phi = 0,36$.

Com o aumento do ângulo (fator $\phi = 1,8$) observa-se uma pequena variação na distribuição de trincas: a região que anteriormente era ocupada pelas trincas do tipo ϵ originárias de matrizes de alturas médias e grandes diâmetros, é substituída pelas trincas do tipo α , ao passo que a região que anteriormente era ocupada pelas trincas α , originárias de matrizes de grandes alturas e grandes diâmetros, passa a ser ocupada pelas trincas do tipo ϵ . Com relação as trincas do tipo η não ocorreu nenhuma variação, mantendo o campo de grandes alturas e pequenos diâmetros. Pode-se constatar essas observações através da análise da figura 6.2. Para ângulos maiores ($\phi = 4,3$) verifica-se a ocorrência exclusiva das trincas do tipo α conforme pode ser visto na figura 6.3.

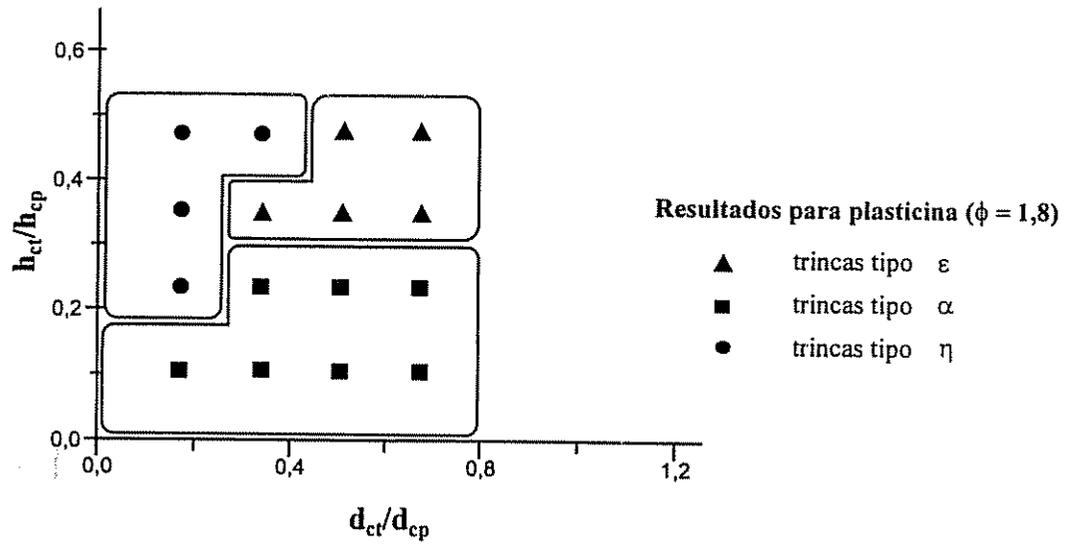


Figura 6.2-Resultado do ensaio de cone truncado para a plasticina ensaiada com fator $\phi = 1,8$.

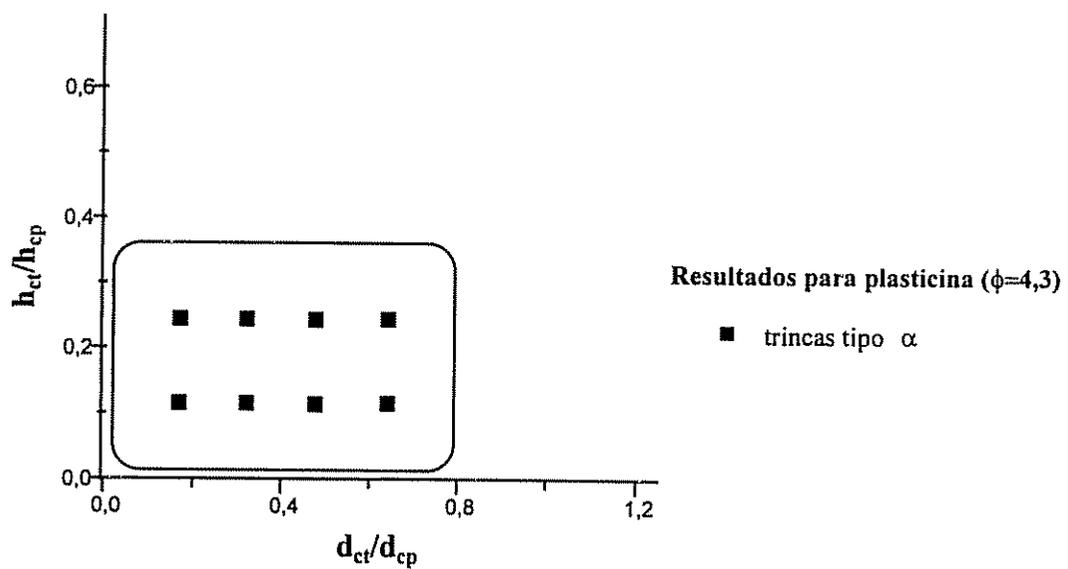


Figura 6.3 Resultado do ensaio de cone truncado para a plasticina ensaiada com fator $\phi = 4,3$.

6.2-Material Real (aço 1010)

Para o material real percebe-se que para ângulos pequenos (fator $\phi = 0,36$) ocorre predomínio de trincas do tipo β . Este fato pode ser constatado através da figura 6.4.

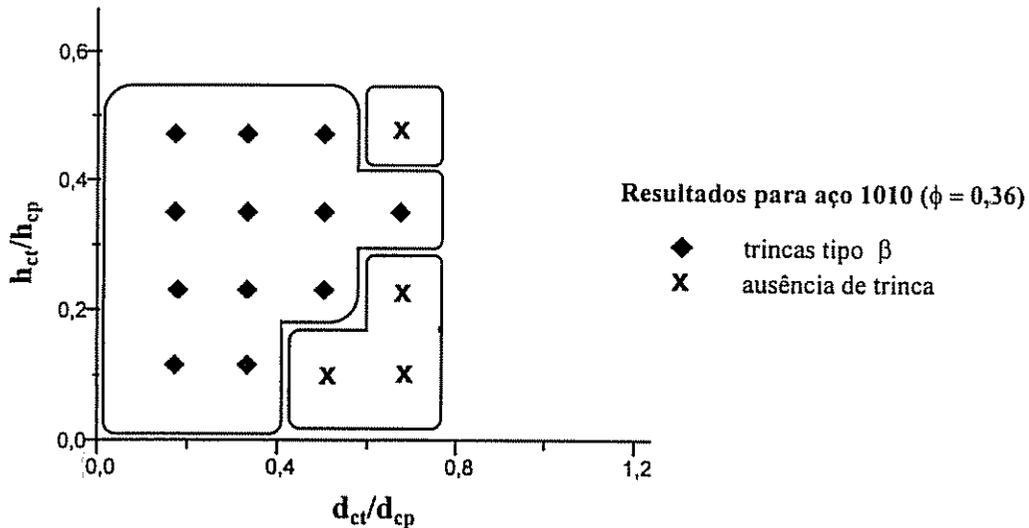


Figura 6.4-Resultado do ensaio de cone truncado para o material real ensaiado com fator $\phi = 0,36$.

Com o aumento do ângulo (fator $\phi = 1,80$) verifica-se o surgimento de regiões de predominância de trincas do tipo ϵ , e regiões caracterizadas pela ausência de trincas conforme pode ser visto através da figura 6.5.

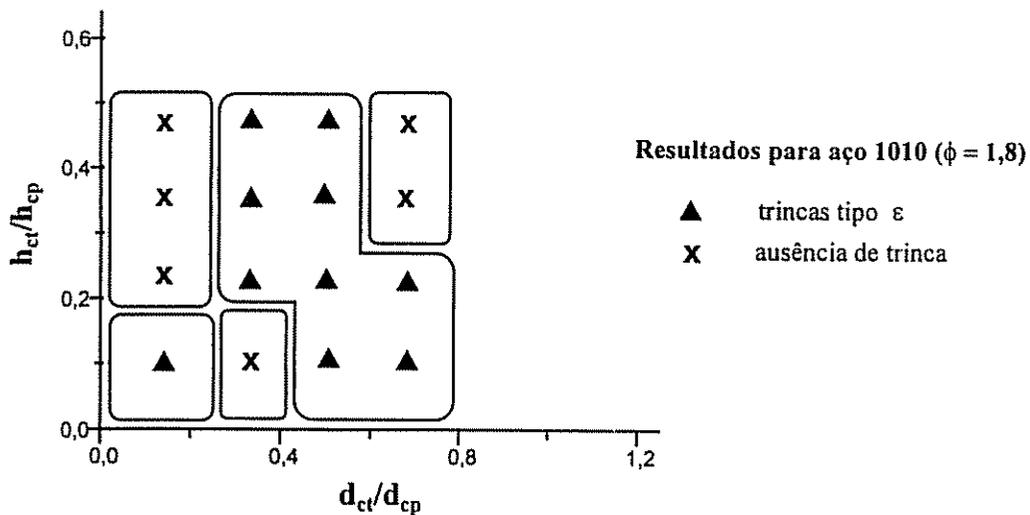


Figura 6-5 Resultado do ensaio de cone truncado para o material real ensaiado com fator $\phi = 1,8$

Para ângulos maiores ($\phi = 4,3$) ocorre uma alteração quanto à ocorrência de trincas: um aumento da região com predominância de regiões sem trincas, conforme pode ser visto na figura 6.6.

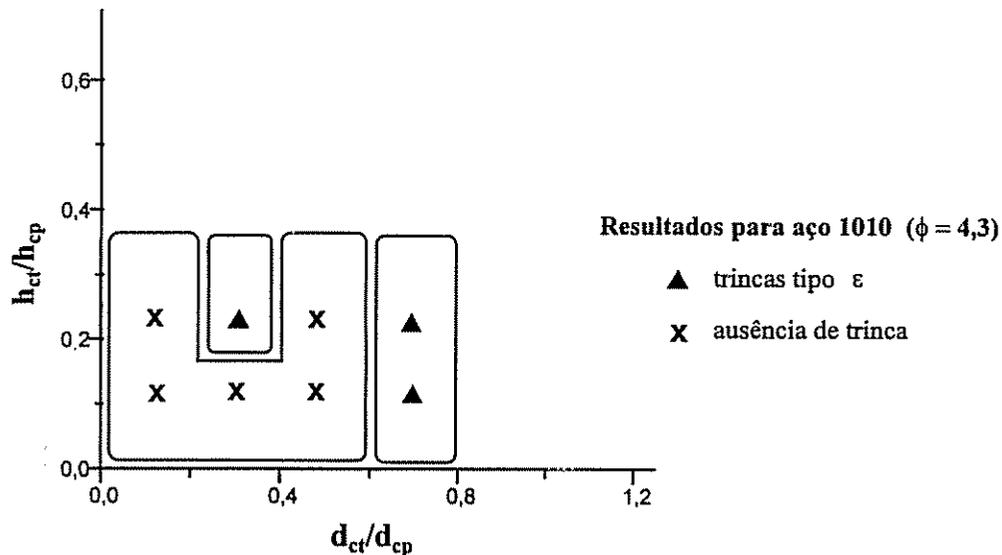


Figura 6.6-Resultado do ensaio de cone truncado para o material real ensaiado com fator $\phi = 4,3$.

6.3-Análise Comparativa dos Resultados Obtidos para a Plasticina e o Aço.

A análise comparativa dos resultados pode ser feita superpondo-se os mapeamentos obtidos para os diferentes materiais mantendo-se constante o fator ϕ .

Para ângulos menores (fator $\phi = 0,36$) observa-se que não há nenhuma região de concordância quanto à ocorrência de trincas, entre o material modelo e o aço 1010. Isto pode ser visualizado, na figura 6.7, onde estão superpostos os resultados obtidos neste trabalho. A medida que se aumenta o ângulo (fator $\phi = 1,8$) observa-se uma pequena concordância de trincas do tipo ϵ entre o material real e a plasticina, quando trabalha-se com matrizes de grandes alturas e diâmetros médios conforme ilustrado na figura 6.8.

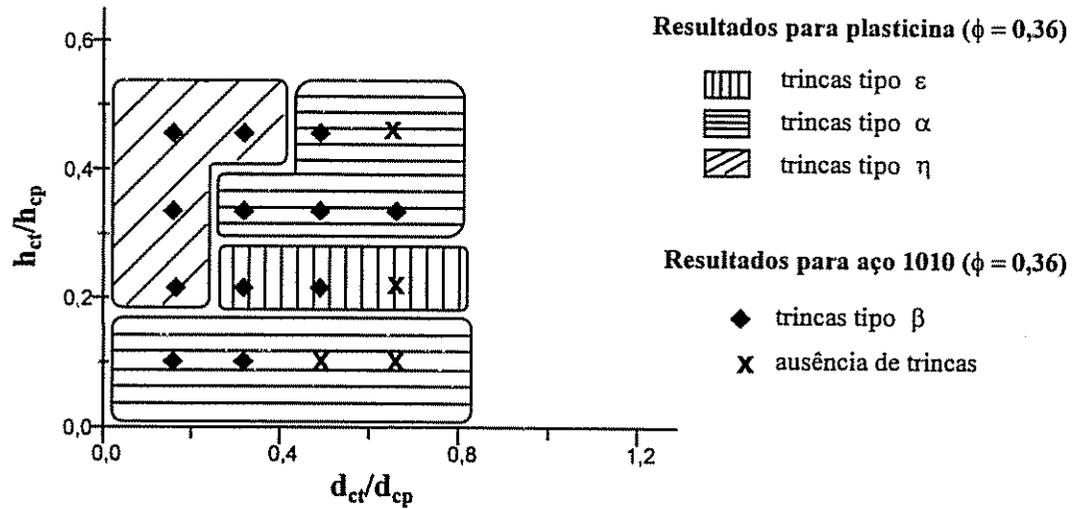


Figura 6.7-Gráfico material real x Plasticina para $\phi = 0,36$.

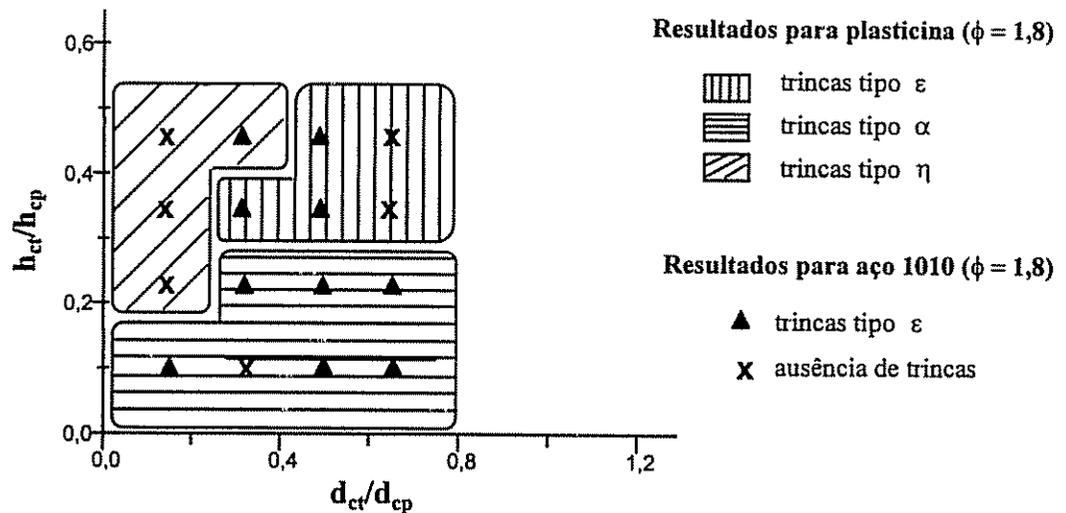


Figura 6.8-Gráfico material real x plasticina para $\phi = 1,8$.

Quando trabalha-se com ângulos maiores ($\phi = 4,3$) percebe-se novamente a ausência de regiões de concordância entre o material real e a plasticina quanto à ocorrência de trincas, conforme pode ser constatado na da figura 6.9

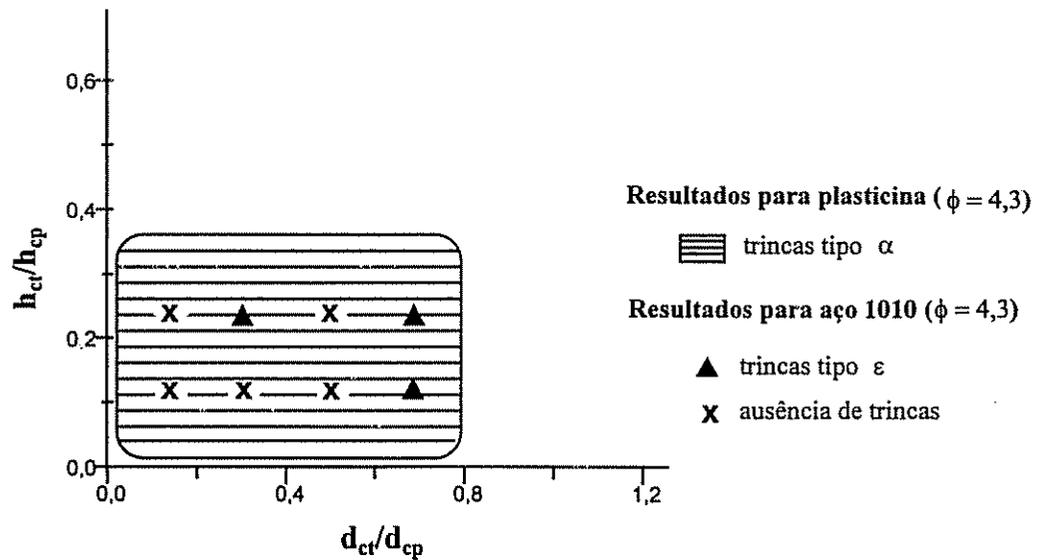


Figura 6.9-Gráfico material real x plasticina para $\phi = 4,3$.

6.4-Análise Comparativa dos Resultados Obtidos para a Plasticina e Dados da Literatura

Foram feitos estudos comparativos entre os resultados obtidos por Okamoto⁽¹⁾ que utilizou em seus ensaios aço 1045 e fatores $\phi = 0$ e $\phi = 2$, com os resultados obtidos no presente trabalho, com fatores $\phi = 0,36$ e $\phi = 1,8$. Nesse estudo verifica-se que para ângulos menores ocorre uma pequena concordância de região de ocorrência de trincas do tipo ϵ e do tipo η , conforme mostrado na figura 6.10.

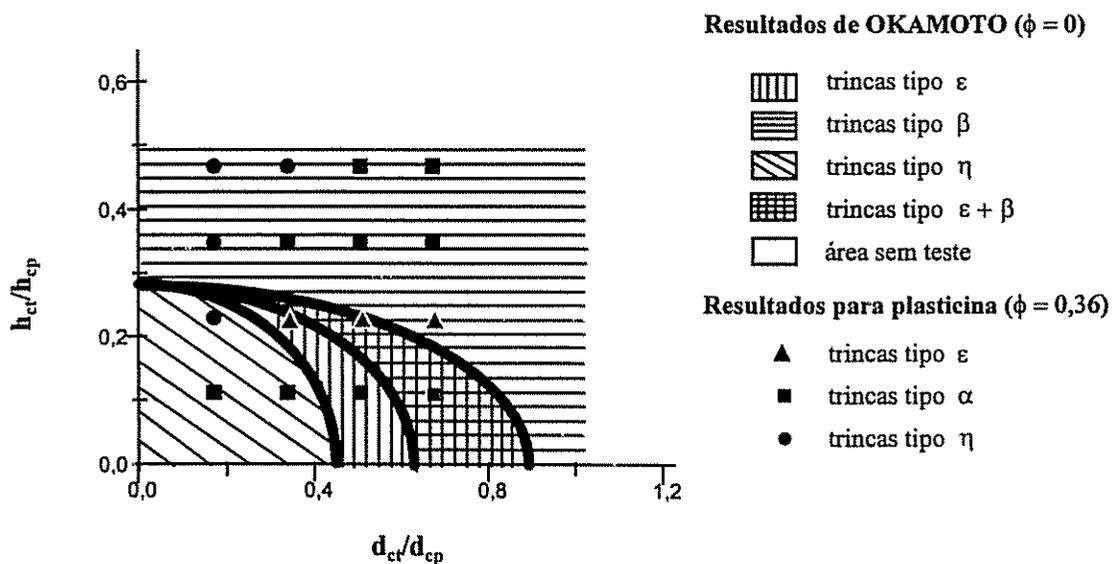


Figura 6.10-Gráfico plasticina x Okamoto⁽¹⁾

À medida que o ângulo de trabalho cresce (fatores $\phi = 1,8$ e $\phi = 2$) percebe-se um decréscimo da região de concordância entre a plasticina e dados da literatura; as regiões de similaridade ficam restritas apenas a uma parte das trincas do tipo η , conforme pode ser visualizado através da figura 6.11.

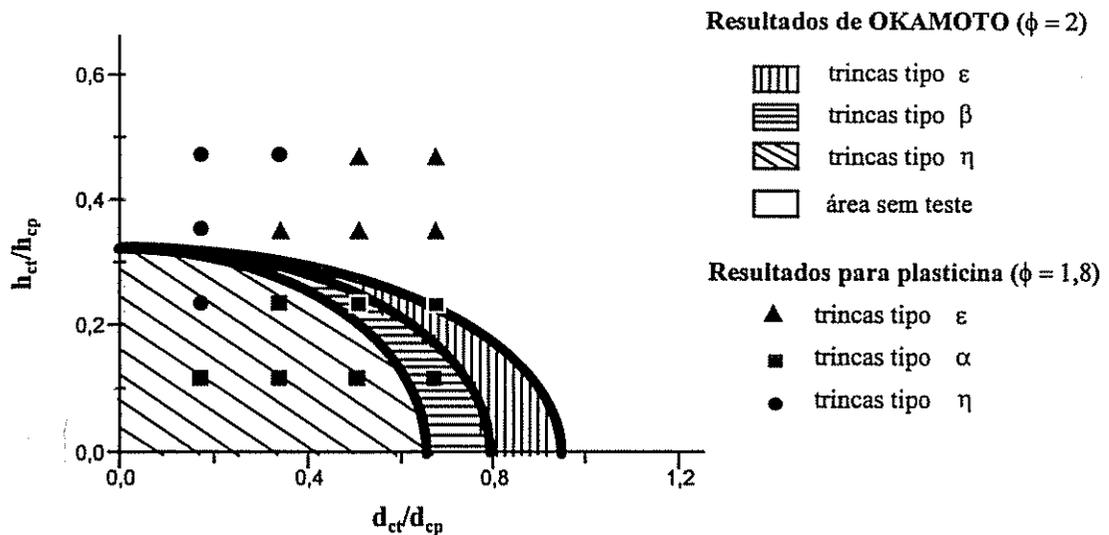


Figura 6.11-Gráfico plasticina x Okamoto.⁽¹⁾

6.5-Análise Comparativa dos Resultados entre o Material Real e Dados da Literatura.

Ao comparar os resultados obtidos por Okamoto⁽¹⁾ que utilizou como material o aço 1045 com fator $\phi = 0$ e $\phi = 2$, com os resultados obtidos no presente trabalho para o aço 1010 com fator $\phi = 0,36$ e $\phi = 1,8$ verifica-se que para ângulos menores ocorre uma concordância de região de ocorrência de trincas do tipo β entre os aços 1045 e 1010 conforme pode ser observado na figura 6.12 . Com um aumento do ângulo de trabalho verifica-se que ocorre um decréscimo de concordância entre os aços quanto a região de ocorrência de trincas, ficando a mesma restrita a apenas uma pequena faixa de trincas do tipo ϵ , conforme mostrado na figura 6.13

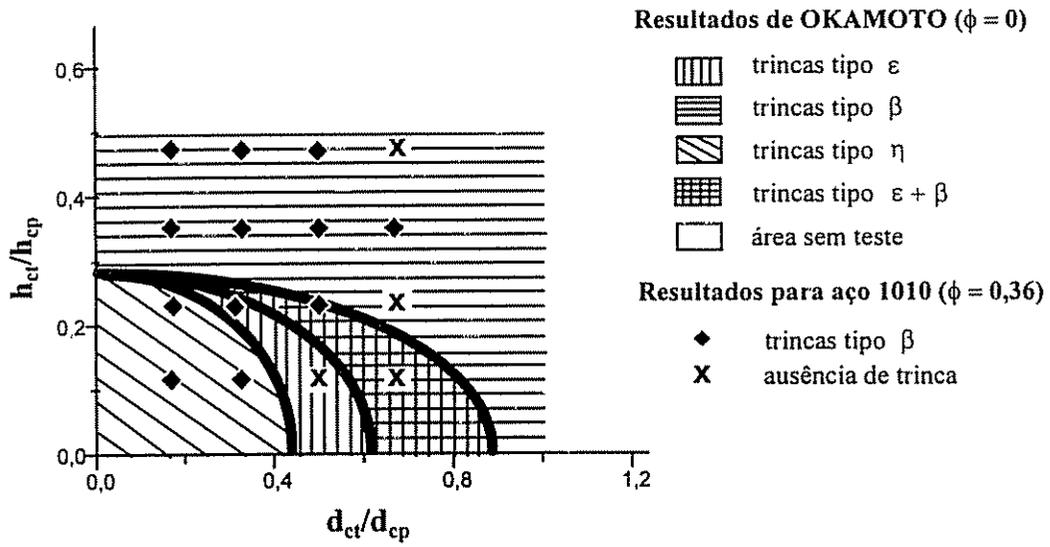


Figura 6.12-Gráfico material real x Okamoto.⁽¹⁾

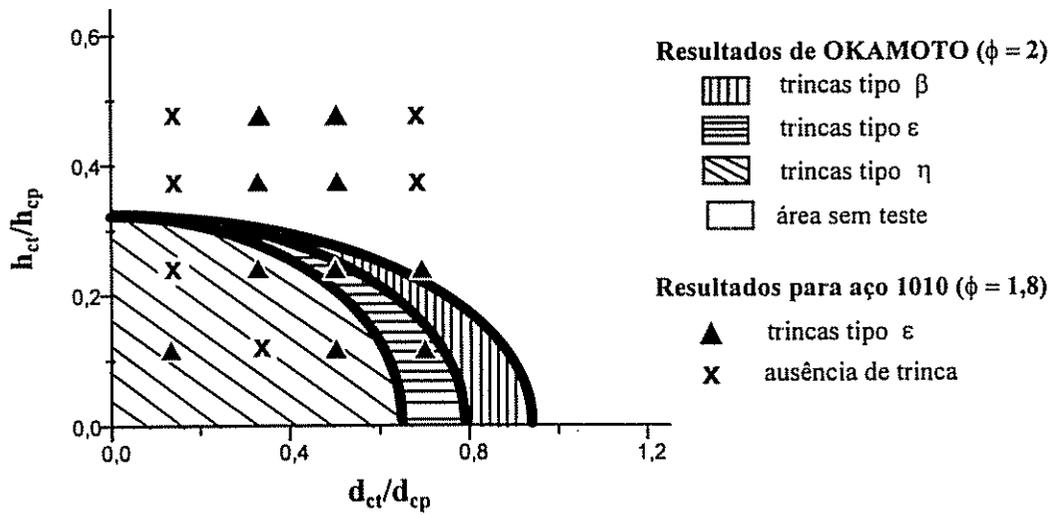


Figura 6.13-Gráfico material real x Okamoto.⁽¹⁾

7-CONCLUSÕES

1. **Efeito de ϕ sobre trincas no material modelo (plasticina):** De forma geral, o aumento de ϕ propiciou o aparecimento de trincas α no material modelo.
2. **Efeito de ϕ sobre trincas no aço 1010:** O aumento de ϕ provocou uma mudança de tipo de trinca no aço 1010, de β para ϵ , e aumentou a frequência de ausência de trincas.
3. **Comparação do material modelo (plasticina) com o aço 1010:** Houve pouca similaridade entre esses materiais ocorrendo apenas para trinca tipo ϵ quando os valores de altura relativa eram maiores e de diâmetros relativos, médios.
4. **Comparação do material modelo (plasticina) com Okamoto (aço 1045):** A similaridade ocorreu em um ponto para trincas tipo ϵ e η , quando ϕ era menor e valores médios de diâmetro relativo e altura relativa. Quando ϕ aumenta a similaridade só é observada em um ponto para trinca tipo η .
5. **Comparação do aço 1010 com Okamoto (aço 1045):** Houve uma boa similaridade para trinca tipo β quando ϕ era menor e a altura relativa variava de valores médios a altos. Quando ϕ aumenta a similaridade diminui e só ocorre para trinca tipo ϵ , em dois pontos.

8-SUGESTÕES

Para trabalhos posteriores uma das sugestões seria a de estudar-se plasticinas que apresentem uma maior ductilidade, pois, sendo assim teríamos materiais modelos com ductilidade mais próximas do aço. Uma segunda sugestão seria o estudo do efeito do atrito entre as matrizes e os corpos de prova durante o ensaio na geração de trincas.

9-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.OKAMOTO, T., FUKUDA, T. & HAGITA, H., **Material Fracture in Cold Forging Systematic Classification of Working Methods and Types of Cracking in Cold Forging**, The Sumitomo Search, no. 9, p. 216-226, Maio 1973.
- 2.HARNAES, J., WANHEIM, T., Simulation of cold forging folding problems using model materials, *Journal of Mechanical Working Technology*, v 12, p. 165-171, 1985.
- 3.SEGAWA, A., KAWANAMI, T. Rolling deformation characteristics of clad materials determined by model experiment and numerical simulation: experimental rolling tests using plasticine. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 47, p. 375-384, 1995.
- 4.BJERREGAARD, H., ANDERSEN, C. B., JENSEN, D., WANHEIM, T., **Flange thickness in a radial extruded tubular component - strain state, texture and strain models**, *Proceedings of the 15th Risø International Symposium on Materials Science*, Roskilde, Dinamarca, 1994.
- 5.DIETER, G.E., **Evaluation of workability**, *Metals Handbook*, 9a. edição, p.363,
- 6.DIETER, G. E., **Workability Tests**, in *Metals Handbook*, v 14, 9a. Edição, ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.
- 7.KUHN, H. A., LEE, P. W. e ERTURK, T. A., **Frature Criterion for Cold Forming**, ASME, *J. Eng. Mat. Tech.*, 1973, p. 213-218.
- 8.BODNAR, R. L., RONEMUS, D. C., BRAMFITT, B. L. e SHAH, D. C., **Physical Modeling of Hot-Deformation**, Iron, and Steel Society of AIME, 1986 p. 35-46, (Bethlehem Steel Corporation Research Department, Bethlehem, PA).
- 9.WANHEIN, T., **Simulation with Model Materials in the Nordic Countries - Fundamentals of Metals Forming Techniques States and Trends**, Stuttgart, 1983.
- 10.BODSWORTH, C., HALLING, J. e BARTON, J. W., **The Use of Paraffin Wax as a Model Material to Simulate the Plastic Deformation of Metals - Part I**, JISI, 1957, p. 375.
- 11.McCRUM, A. W., **The Use of Plasticine as a Model Material in Section Rolling**, BISRA Report MW/A/73/54, 1954.
- 12.WANHEIN, T., **Simulation with Model Materials in the Nordic Countries - Fundamentals of Metals Forming Techniques States and Trends**, Stuttgart, 1983.

13. MOON, Y., CHUN, M. S., YI, J. J., KIM, K. K., **Physical modeling of edge rolling in plate mill with plasticine**, Steel Research, v. 64, no. 11, p. 557-563, 1993.
14. AKU, S. Y., SLATER, R. A. C. e JOHNSON, W., **The Use of Plasticine to Simulate the Dynamic Compression of Prismatic Block of Hot Metal**, Int. J. Mech. Sci., v 9, 1967, p. 495 - 525.
15. SEKI, T. & TAZOE, N., **Experiments with Characteristics of Simulative Material in Metal Forming**, Ishikawajima Harina Eng. Rev. I, v. 19, n. 2, 1979, p.81.
16. ARENTOFT, M., HENNINGSEN, P., BAY, N., & WANHEIM, T., **Simulation of defects in Metal Forming - an example**, Journal of Materials Processing Technology, v.45, p.527-532, 1994.
17. AWANO, T. & DANNO, A., **Law of Similarity in Forming Model Tests Using Plasticine**, Plasticity and Forming, v. 13, n. 141, 1972.
18. SUZUKI, H., **The Law of Similarity in Deformation Processes**, Society of Mech. Eng., v. XVIII, n. 59, 1951, p. 132.
19. MOLINER, E. C., IBARRONDO, I. G., & PEREZ, J. S. J., **Simulation of the forming process of metals by using the engineer similarity laws**. Deform. Met., v.19, no. 204, p. 19-24, 1993.

Esta obra pertence a Biblioteca
da Escola de Engenharia da UFMG

Doação de: Pos-Grad. Dept. Eng^a
Metálgica e Minas

R\$ 33,00

Recebida em: 21/02/2000