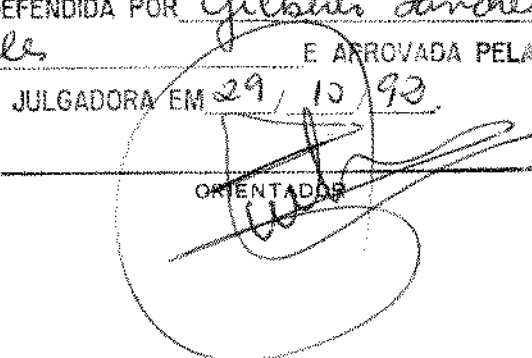


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA POR Gilberto Sanchez  
Gonzalez E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 29/10/92

  
ORIENTADOR

ASPECTOS METALURGICOS DA USINABILIDADE DO AÇO  
SAE 12L14 SUBMETIDO A CRESCENTES NIVEIS DE  
DEFORMAÇÃO A FRIO POR TREFILAÇÃO

40/92

OUTUBRO/1992

UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECANICA

TESE DE: MESTRADO

TITULO DA TESE: ASPECTOS METALURGICOS DA USINABILIDADE  
DO AÇO SAE 12L14 SUBMETIDO A CRESCENTES NIVEIS DE  
DEFORMAÇÃO A FRIO POR TREFILAÇÃO

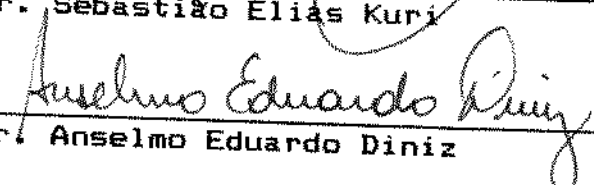
AUTOR: GILBERTO SANCHES GONZALES

ORIENTADOR: PROF. DR. NIVALDO LEMOS CUPINI

APROVADO POR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Nivaldo Lemos Cupini, Presidente

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sebastião Elias Kuri

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Campinas, 29 de outubro de 1992



A minha querida esposa  
Marisete dedicada companheira de  
todos os momentos,

A meus queridos filhos Giselle  
Fabrício e Giovanna, pelos  
momentos em que não pude lhes  
dedicar minha atenção e carinho,

A meus queridos pais João e  
Olivia que tanto acreditaram em  
mim e me ensinaram a  
persistir nos caminhos difíceis  
da vida,

Eu dedico este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Nivaldo Lemos Cupini, pela orientação e incansável estímulo transmitidos durante todo o tempo em que este trabalho foi planejado, desenvolvido e concluído. Vale lembrar também que a amizade entre nós fez crescer a responsabilidade pela sua conclusão, como gratidão à sua dedicação.

A Aços Ipanema (Villares) SA, na pessoa do seu Diretor Industrial Engg Clovis Ribeiro Filho e dos Gerentes de Produto Marcos Chiorboli e Eduardo J. B. V. Barcelos, que permitiram-me comparecer à Unicamp, sempre que necessário, para efetuar as atividades acadêmicas e práticas de laboratório pertinentes ao estudo realizado.

Meu reconhecimento aos técnicos do Departamento de Processos de Fabricação da Unicamp, Srs. Aristides e Valdomiro e ao Engg e Prof. Felipe pelo apoio na realização dos ensaios de usinabilidade. Igualmente agradeço aos técnicos dos laboratórios da Aços Ipanema, Sr. Bernardo Crespo, Sra. Sonia e Srs. Genival e Carlos Eduardo, pelo auxílio nas análises metalográficas e nos ensaios mecânicos.

Finalmente agradeço a todos os demais colegas da Fec/Unicamp e da Aços Ipanema Villares pelo apoio e pela amizade e a Deus por ter me dado forças e a graça de concluir este trabalho.

## INDICE

RESUMO.....	5
LISTA DE SIMBOLOS UTILIZADOS.....	7
CAPITULO 1	
INTRODUÇÃO.....	9
CAPITULO 2	
A USINABILIDADE DOS MATERIAIS.....	11
2.1. Conceito.....	11
2.2. Influência de fatores metalúrgicos.....	12
2.2.1.Efeito da microestrutura na usinabilidade.....	12
2.2.2.Efeito da dureza e ductilidade do material.....	14
2.2.3.Efeito das microinclusões na usinabilidade.....	16
2.2.4.Morfologia e distribuição das microin- sões de sulfeto.....	18
2.2.5.Efeito das microinclusões de sulfeto na formação do cavaco.....	22
2.2.6.Efeito das microinclusões de nas proprieda- des mecânicas dos aços.....	24
2.2.7.Efeito da adição de chumbo na usinabilidade dos aços.....	26
2.2.8.Efeito de outros elementos na usinabilidade dos aços.....	29
2.2.9.Influência do processo de deformação a frio.....	29
CAPITULO 3	
CUIDADOS OPERACIONAIS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS AÇOS RESSULFURADOS E AO CHUMBO.....	32
3.1. Fundição.....	32
3.2. Transformação a Quente.....	33
3.3. Acabamento a frio.....	34

## CAPITULO 4

ENSAIOS DE USINABILIDADE.....	34
4.1. Critérios de usinabilidade.....	34
4.2. Ensaios de usinabilidade baseados na vida da ferramenta.....	35
4.2.1. Ensaios de curta duração.....	36
4.2.2. Ensaios de faceamento Mathon.....	37
4.3. Ensaios de torneamento cilíndrico acelerado baseado no ensaio de faceamento.....	40
4.4. Modelo matemático do ensaio de torneamento cilíndrico acelerado.....	42
4.4.1. Cálculo da aceleração.....	42
4.4.2. Cálculo do incremento de rotação.....	42
4.4.3. Desenvolvimento do diagrama de blocos para incremento da velocidade no sistema CNC.....	44

## CAPITULO 5

MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOS UTILIZADOS.....	47
5.1. Amostragem.....	47
5.1.1. Barras trefiladas de aço SAE 12L14.....	47
5.1.2. Amostra-padrão de aço SAE 1212.....	47
5.2. Ferramentas de usinagem.....	49
5.3. Preparação dos corpos-de-prova e ferramentas.....	49
5.4. Aplicação do ensaio.....	49
5.4.1. Realização dos ensaios.....	49
5.4.2. Cálculo do índice de usinabilidade.....	51

## CAPITULO 6

RESULTADOS.....	52
6.1. Caracterização metalográfica.....	52
6.1.1. Microestrutura.....	52
6.1.2. Microinclusões.....	56
6.2. Propriedades mecânicas.....	59
6.2.1. Dureza.....	59
6.2.2. Ensaios de tração.....	61

6.3. Ensaaios de usinabilidade.....	62
-------------------------------------	----

## CAPITULO 7

DISCUSSAO DOS RESULTADOS.....	65
7.1. Aspectos da microestrutura e microinclusões.....	65
7.2. Alterações das propriedades mecânicas.....	66
7.3. Resultados dos ensaios de torneamento cilíndrico....	66
7.4. Influência do grau de encruamento na usinabilidade..	68
7.5 O processo industrial.....	69

## CAPITULO 8

CONCLUSÕES.....	70
SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
APÊNDICE: CURVAS E EQUAÇÕES DE REGRESSÃO LINEAR.....	79

## RESUMO

Os aços da família de usinabilidade melhorada, são produzidos com adição de elementos formadores de inclusões que interferem no mecanismo de formação do cavaco, agem na interface com a ferramenta diminuindo o desgaste, aumentando a vida e permitindo o uso de maiores velocidades de corte em operação e como consequência, promove o aumento da produtividade industrial.

Do ponto-de-vista metalúrgico, os fatores mais importantes para que os ganhos de processo se consolidem são o controle da morfologia das microinclusões e o controle da microestrutura e da dureza do aço.

O presente trabalho, procura avaliar o efeito do incremento de dureza, como consequência da aplicação de crescentes níveis de encruamento por trefilação em barras de aço SAE 12L14, com morfologia e distribuição de microinclusões em conformidade com os padrões propostos pela literatura.

O SAE 12L14 é um aço com baixo teor de carbono (0,15% máximo) e adições de enxofre (0,25%), fósforo (0,050%) e chumbo (0,20%), todos com influência benéfica na usinabilidade. Foi o aço escolhido para o estudo, em função da difundida aplicação que o mesmo tem na indústria que trabalha com a produção seriada em máquinas automáticas, nas quais



a matéria-prima básica, são barras trefiladas que garantem melhor precisão dimensional, menor sobremetal e isenção de carepa abrasiva na superfície. Não obedecer um limite para o nível de encruamento aplicado no entanto, pode levar o material à uma condição inadequada à usinabilidade. O estabelecimento de um limite de deformação a frio sem detrimento da usinabilidade do aço SAE 12L14, foi o objetivo maior deste trabalho.

Para estudo da usinabilidade, desenvolveu-se o ensaio de torneamento cilíndrico com velocidade de corte continuamente acelerada, adequado para ensaios de curta duração nas bitolas mais finas, onde o ensaio por faceamento não é realizável.

Os resultados mostraram que qualquer grau de encruamento a partir de 10,6%, aplicado nas barras brutas de laminação, provocam a queda na vida da ferramenta. Este resultado foi atribuído ao aumento da dureza da microestrutura pela deformação a frio, bem como às alterações de morfologia e dureza verificadas nas microinclusões de sulfeto de manganês, que são também fatores de influência no mecanismo de formação do cavaco.

Conclui-se portanto que por razões de ordem mecânica de ajuste do processo, as barras de aço SAE 12L14 devem ser trefiladas, no entanto, por razões metalúrgicas o melhor desempenho é obtido com o menor grau de encruamento no material.

## LISTA DE SIMBOLOS UTILIZADOS

### **Símbolos relativos à propriedades mecânicas**

HB = Dureza Brinell (N/mm<sup>2</sup>)

RC = Dureza Rockwell C

$\sigma_R$  = Limite de Resistência à Tração (N/mm<sup>2</sup>)

RA = Redução de área por trefilação (%)

$\sigma_A$  = Tensão aplicada em ensaio de fadiga

RS = Redução de área no ensaio de tração (%)

$\sigma_E$  = Resistência ao escoamento no Ensaio de Tração (N/mm<sup>2</sup>)

### **Símbolos relativos à Ensaio de Usinabilidade**

C.P. no = Corpo-de-prova número

I.U. = Índice de usinabilidade (%)

T.C. = Ensaio de Torneamento Cilíndrico

f = Avanço da ferramenta

v = Velocidade de corte (m/min)

t<sub>c</sub> = Tempo de corte

l<sub>f</sub> = Percurso de avanço

l<sub>c</sub> = Percurso de corte

x = Expoente da equação de vida de Taylor

T = Vida da ferramenta (minutos)

n = Rotação (rpm)

D 0,20 = Diâmetro de "queima da ferramenta" (recuo de 0,20 mm na ponta cortante) nos ensaios de Mathom e Torneamento cilíndrico.

$m$  = Inclinação da reta  $\log D 0,20 \times \log n$   
 $V_{20}$  = Velocidade de corte para uma vida de ferramenta de 20 minutos

$\gamma$  (gama) = Aceleração da ferramenta nos ensaios de usinabilidade (m/min)

$d$  = Diâmetro de uma região usinada no ensaio de faceamento

$v_1$  = Velocidade de corte inicial

$v_2$  = Velocidade de corte final

$\Delta v (v_2 - v_1)$  = Variação de velocidade de corte linear

#### Símbolos de utilização geral

Rd = Bitola de perfil redondo

CNC = Controle numérico por computador

RPM = Rotações por minuto

#### Símbolo de elementos químicos

C = carbono

P = fósforo

Ni = níquel

Mn = manganês

S = enxofre

Pb = chumbo

Si = silício

Cr = cromo

O = oxigênio

## CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

As operações de usinagem fazem parte de praticamente todos os processos de fabricação na indústria de transformação mecânica, particularmente na automobilística e auto-peças. A utilização de aços de usinabilidade melhorada em substituição aos convencionais, permite trabalhar com maiores velocidades de corte, promovem menor desgaste das ferramentas e ainda possibilitam a obtenção de melhor acabamento superficial. Esses fatores constituem-se em redução de custos de fabricação e melhoria da qualidade dos produtos e, portanto, representam uma grande fonte de economia para a indústria nacional que vive atualmente em clima de busca de alternativas para concorrer a nível internacional.

A usinabilidade é portanto, uma propriedade dos materiais, que assume importante papel nos custos industriais, e por isso tem sido estudada por vários pesquisadores, na busca de parâmetros de usinagem que promovam o melhor desempenho do par ferramenta-peça. O seu conhecimento ganha cada vez maior importância no desenvolvimento de novos materiais de "usinagem fácil", no controle da qualidade e em ensaios de recebimento pelos usuários.

Variáveis como a composição química, a microestrutura, a distribuição e morfologia das inclusões metálicas e não-metálicas, a dureza e demais propriedades mecânicas, exercem marcante influência no comportamento do aço durante uma operação de usinagem.

Por outro lado, o processo de fabricação do material a ser usinado, no caso o aço, frequentemente possui operações como a trefilação, que introduzem tensões por encruamento e aumentam a

sua dureza. A necessidade neste estágio é de estabelecer relações quantitativas entre esta alteração de propriedades mecânicas e a usinabilidade do material

Para avaliação da usinabilidade dos aços, vários ensaios são conhecidos. Um dos mais práticos e difundidos, é o ensaio acelerado denominado "Ensaio de Faceamento" ou "Ensaio Mathon", normalizado pela AFNOR A03-654 (1).

Criado na década de 70, este ensaio não foi idealizado para máquinas CNC. Ao ser realizado em torno universal, apresenta a inconveniência de necessitar amostra com diâmetro mínimo de razoável proporção (geralmente superior a 30 mm), capaz de promover a falha ou queima da ferramenta num percurso de avanço a partir de um furo de 6,0 milímetros no centro da peça. Esta característica do ensaio, será discutida com detalhes ainda neste trabalho.

Adicionalmente, os demais testes de usinabilidade acelerados explorados pela literatura, não são adequados para a caracterização de barras com pequenos diâmetros. Em contrapartida, ensaios em barras com pequenas dimensões são muito importantes, pois os aços de "usinagem fácil", laminados e trefilados são os mais frequentemente empregados no abastecimento da indústria de produção seriada de peças por usinagem. E justamente neste sentido que a dúvida apontada merece maior atenção.

Portanto, o presente trabalho tem dois objetivos básicos:

(1) Avaliar a influência do grau de encruamento promovido pela trefilação a frio, sob o aspecto metalúrgico, na usinabilidade do aço SAE 12L14.

(2) Viabilizar a realização prática do ensaio de torneamento cilíndrico com velocidade de corte acelerada, a partir de uma proposta da própria norma AFNOR A 03-654, constituindo-se num novo ensaio acelerado, inspirado no ensaio de faceamento Mathon. O método proposto explora os recursos computacionais e das máquinas CNC, hoje com aplicação difundida inclusive no Brasil.

O resultado global deste trabalho é definir parâmetros do processo de fabricação para produção de barras trefiladas de aço SAE 12L14, que possam ser utilizados para definir o máximo nível de encruamento a frio, sem prejudicar as boas características de usinabilidade do material.

## CAPITULO 2 - A USINABILIDADE DOS MATERIAIS

### 2.1) Conceito

A usinabilidade pode ser definida como a capacidade que um material possui de ser trabalhado numa operação de remoção de cavaco, através de ferramentas de corte e sob determinadas condições de usinagem (2,3). O índice de usinabilidade é uma grandeza numérica comparativa que determina esta propriedade do metal, sempre em relação a outro tomado como padrão.

A usinabilidade não é portanto uma grandeza específica ou intrínseca de um material como é por exemplo a sua dureza. São definidas como propriedades de usinagem, aquelas que sofrem variações mensuráveis durante o processo, tais como, a força de corte, a vida da ferramenta, o acabamento superficial da peça, a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco.

A literatura indica os índices comerciais de usinabilidade (4), para diferentes tipos de aços e diferentes condições de processo de fabricação e tratamentos térmicos. Para obtenção destes índices, é adotado como padrão, barras de aço SAE 1212, laminadas a quente e trefiladas a frio com 10 a 15% de redução em área. A este é atribuído o índice de 100%. A rigor, qualquer material no entanto, pode ser tomado como padrão para um determinado ensaio (3).

## **2.2) Influência de fatores metalúrgicos**

### **2.2.1) Efeito da microestrutura na usinabilidade :**

Segundo Chiaverini(5), podemos avaliar o efeito da microestrutura dos aços com base no teor de carbono que os mesmos apresentam, conforme mostrado na tabela 1. Para baixos teores (até 0,20%), a condição mais recomendável, inclusive por fatores de economia é a de simplesmente laminado, contudo, melhores resultados são obtidos se um alívio de tensões for aplicado. Este alívio tem por objetivo remover o encruamento remanescente da laminação. A medida em que aumenta o teor de carbono, são necessários tratamentos térmicos de recozimento ou coalescimento para manter a baixa dureza do aço e evitar o efeito de desgaste por atrito excessivo entre a peça e a ferramenta (5,6,7). Para o caso dos aços-rolamento com 1% de carbono e 1,5% de cromo, Koyanagi e Sakajo (8) mostraram que o tamanho dos carbonetos

Tabela 1. Melhores condições de usinagem em função do teor de carbono dos aços conforme Chiaverini (5).

TEOR DE CARBONO	MELHOR CONDIÇÃO	TRAT. TERMICO
(a) até 0,20%	perlita b. lam. (mais econômico)	
(b) 0,2 a 0,3%	perlita b. lam.	norm. melhora
(c) 0,3 a 0,4%	perlita grossa	recoz. melhora
(d) 0,4 a 0,6%	perlita ou esf.	recoz. pleno
(e) maior 0,6%	esferoidizado	coalescimento

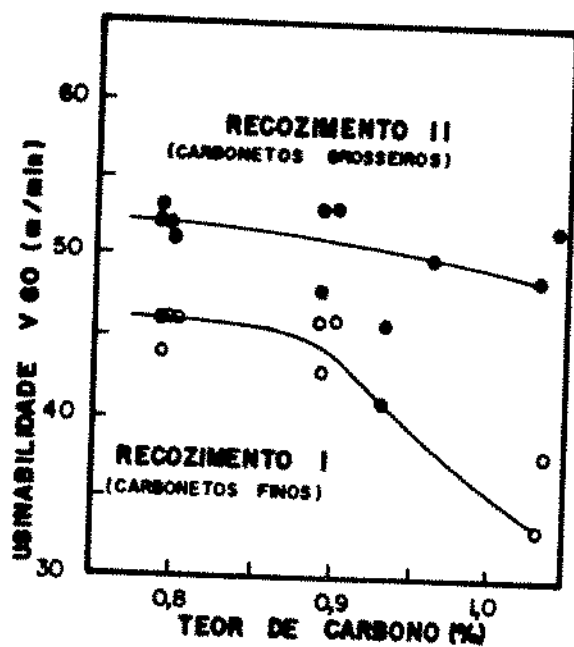


Figura 1. influência do teor de carbono e do tamanho dos carbonetos após tratamento térmico na usinabilidade do aço-rolamento (8).



esferoidizados por tratamento térmico, também exercem efeito na usinabilidade. O estudo mostrou, conforme a figura 1, que a microestrutura de carbonetos mais grosseiros e o menor teor de carbono, resultam em melhor índice de usinabilidade em testes de vida de ferramenta. Embora os autores considerem que este resultado não esteja claramente justificado, é atribuído a fatores como a menor quantidade de carbonetos presentes e às propriedades mecânicas da matriz ferrítica. Ambos os fenômenos sofrem a influência da partição de elementos de liga entre os carbonetos e a ferrita.

### 2.2.2. Efeito da dureza e ductilidade do material

Tendo em vista que toda operação de usinagem é acompanhada de um encruamento no material-base, as medidas de dureza isoladamente não servem como parâmetro de qualificação da usinabilidade dos aços. Como regra geral, sabe-se que altas durezas implicam em dificuldades de usinagem, enquanto que baixos e médios valores são sinais de boa usinabilidade. Elementos como o carbono, manganês, fósforo, nitrogênio e outros residuais, influenciam nesta propriedade e daí a necessidade de se estabelecer uma dureza ótima para cada material. Blank e colaboradores (7), estabeleceram uma curva de influência da dureza na usinabilidade (figura 2) para um aço de baixo teor de carbono com adição de enxofre, na qual, os valores extremos são de pior comportamento que os intermediários que inclusive passam por um pico em torno de 110 unidades Vickers. Este resultado torna evidente que durezas extremas (baixas e altas) promovem o desgaste excessivo da ferramenta.

O arrancamento de cavaco do material de estrutura ferrítica, que

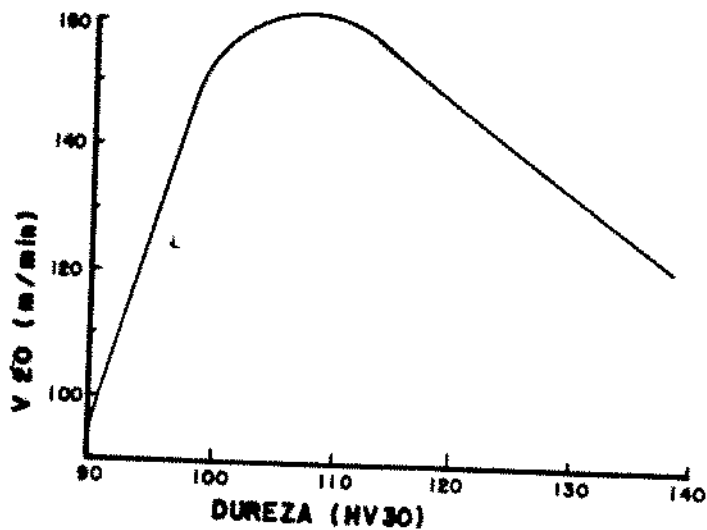


Figura 2. Efeito da dureza na vida da ferramenta (7).

é um constituinte mole, é uma operação difícil pois o material tende a aderir à ferramenta, diminuindo a eficiência do processo (5). Portanto, fatores como a plasticidade e a microestrutura, devem ser considerados nesta análise, segundo Micheletti (6). A maior plasticidade tem um efeito negativo na usinabilidade, devido ao alto grau de deformação do material antes do arrancamento do cavaco, o seu pequeno ângulo de cisalhamento e a possibilidade de acúmulo e aderência de material sobre a superfície de corte, reduzindo o contato direto da ferramenta com a peça e formando assim a denominada "aresta aresta postiça de corte" (6,9).

### 2.2.3) Efeito das microinclusões na usinabilidade:

Existem cinco classes de elementos que podem estar presentes nos aços e que têm influência na usinabilidade, isto é,

- elementos que formam inclusões não-metálicas como o enxofre e o telúrio,
- elementos que formam inclusões metálicas como o chumbo e o bismuto,
- elementos solúveis na ferrita como o níquel, o cobre e o estanho,
- elementos que formam carbonetos como o cromo, o molibdênio, o vanádio e o tungstênio,
- e elementos que formam óxidos como o alumínio, o cálcio, o silício e o manganês. As duas primeiras classes, são consideradas como aditivos à usinabilidade. As demais, são danosas, pois em geral provocam aumento de dureza da microestrutura ou entram na composição de inclusões com características abrasivas (10).

A classe de elementos químicos formadores de microinclusões, não-metálicas, exercem um importante papel no bom desempenho dos aços na usinagem. Dentre estes elementos, o enxofre se destaca por combinar com o manganês formando inclusões não-metálicas de sulfeto de manganês. Durante a formação do cavaco, esta inclusão se deforma plasticamente, para produzir planos de baixa resistência e favorece o início e propagação das trincas de cisalhamento (7).

A influência do enxofre segundo kovash (11), tem sido mais notável no aumento da velocidade de corte para uma dada vida da ferramenta. E quanto maior for o teor de enxofre, melhor é a usinabilidade para todos os tipos de aços, conforme mostrado na figura 3 (11).

O controle do desempenho da usinabilidade depende da fração volumétrica, da morfologia e da plasticidade do sulfeto de manganês,

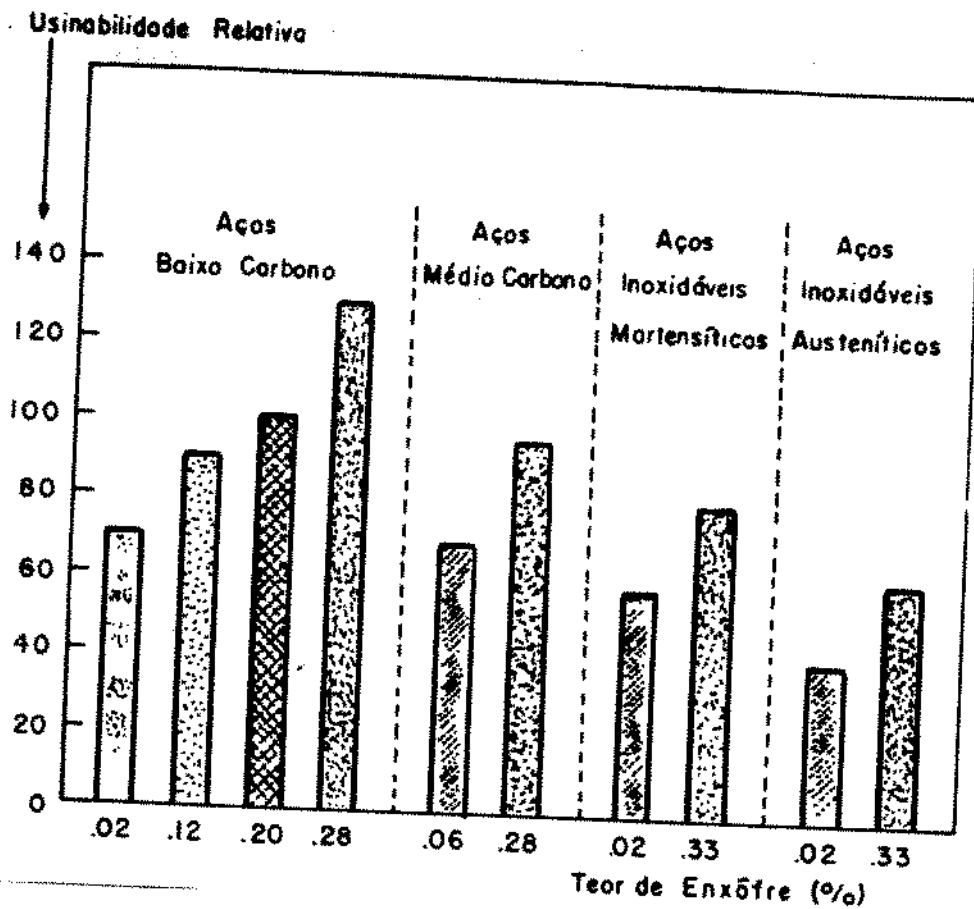


Figura 3. Usinabilidade relativa de diferentes tipos de aços em função da presença de diferentes teores de enxofre (1).

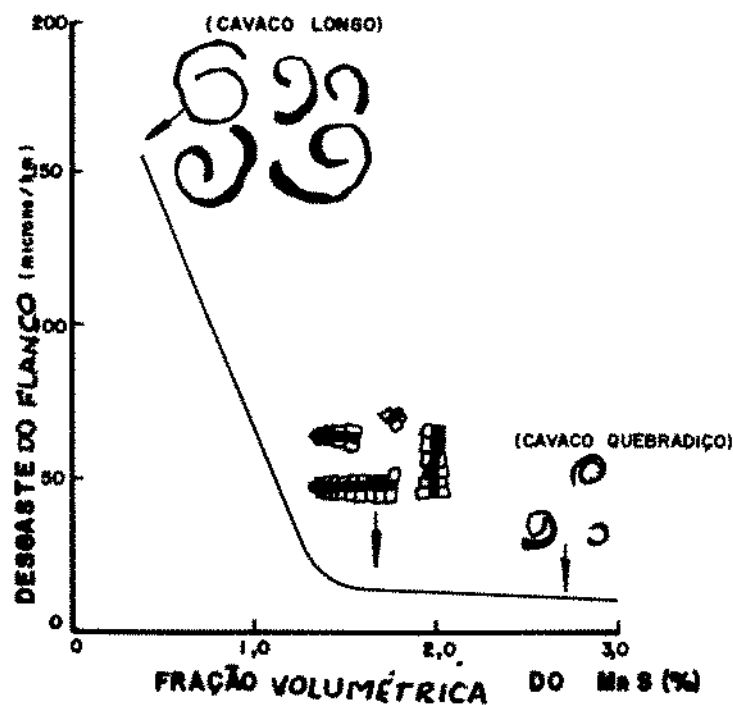
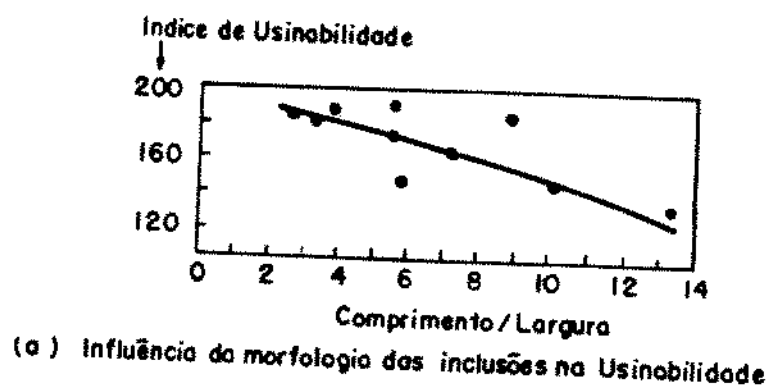


Figura 4. Efeito da fração volumétrica de sulfeto de manganês presente, na usinabilidade dos aços resulfurados (7).

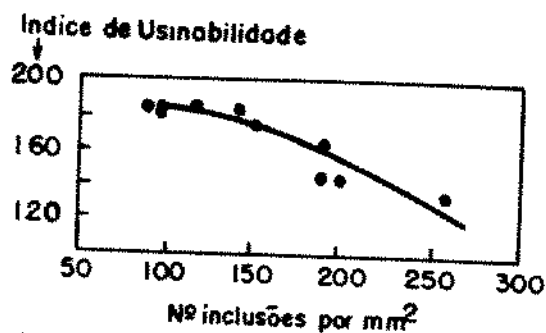
conforme ilustrado na figura 4. Enquanto a fração volumétrica é aumentada em 1,5%, um marcante acréscimo é obtido na usinabilidade. Entretanto, maiores quantidades produzem pouco efeito benéfico. Este máximo teor está situado na faixa de 0,300 a 0,400%, considerando aços e operações de usinagem convencionais (11).

#### 2.2.4. Morfologia e distribuição das microinclusões de sulfeto:

Conforme já mencionado, além da quantidade de enxofre presente, é fator de fundamental importância, a morfologia e distribuição das inclusões de sulfeto, no desempenho dos aços. Blank (7) e Koyamagi (8), demonstraram através de experiências com aços SAE 1212 e SAE



(a) Influência da morfologia das inclusões na Usinabilidade



(b) Influência do tamanho das inclusões na Usinabilidade

Figura 5. Efeito da morfologia(a) e tamanho(b) das microinclusões de sulfeto de manganês na usinabilidade de um aço SAE 1212 (7).

	TAMANHO MÉDIO DAS PARTÍC. ( $\mu\text{m}$ )	RELAÇÃO
a	10,5	1,7
b	68,5	2,5

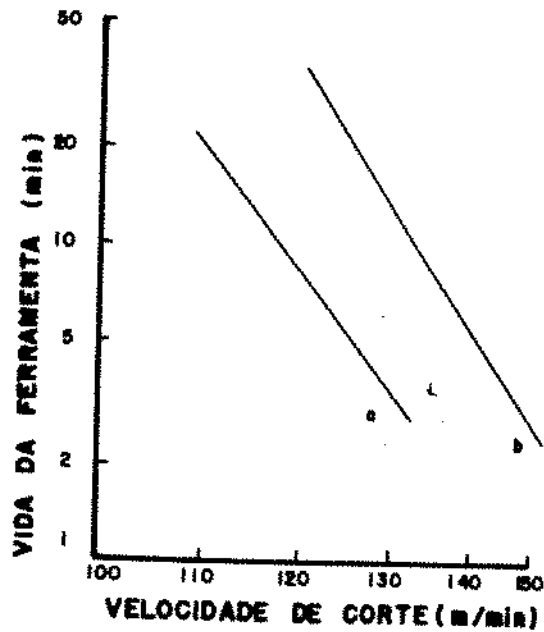


Figura 6. Efeito do tamanho e morfologia dos sulfetos na usinabilidade de um aço resulfurado SAE 12112 (8).

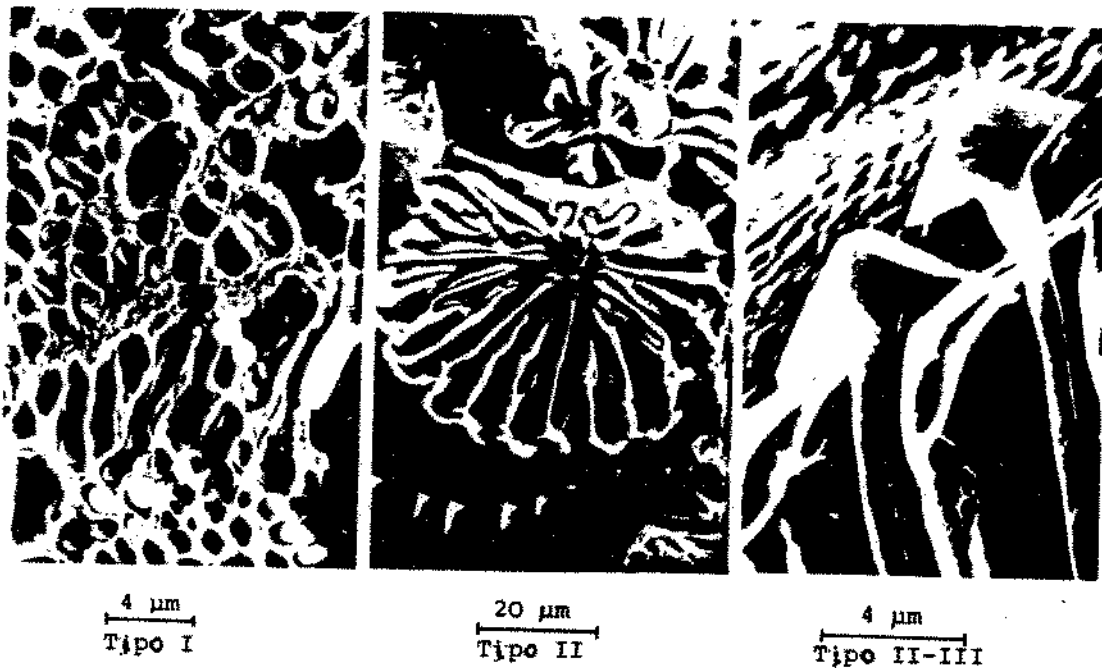


Figura 7. Morfologia dos sulfetos globulares (tipo I), eutéticos (tipo II) e poligonais (tipo III), na classificação de Sims (13).

1213 que melhores resultados práticos se obtém com sulfetos maiores e mais globulares, As figuras 5 e 6, apresentam respectivamente os resultados dos dois autores.

O maior responsável pela morfologia dos sulfetos que se apresentam nos aços, é o processo de fundição aplicado na aciaria, ficando em segundo plano, o aquecimento e o processo de laminação de lingotes até a barra final. Salienta-se no entanto, que maiores temperaturas de laminação tendem a preservar mais o formato globular dos sulfetos. O controle da morfologia dos sulfetos na fundição é feito através da manutenção de um alto nível de oxidação do metal líquido (o equivalente a mais de 100 partes por milhão no produto final), de maneira a obter os sulfetos globulares. A figura 7, apresenta os sulfetos conforme a classificação de Sims (13). Estes parâmetros correspondem a o um equilíbrio termodinâmico entre "metal-enxofre-oxigênio", durante a solidificação (8,11,13,14).

Com ênfase à usinabilidade também, Yeo (14) mostrou que o uso de diferentes desoxidantes no aço, como o boro, alumínio e carbono, bem como a prática de temperaturas mais baixas de laminação, sempre provocam a redução no tamanho e maior deformação dos sulfetos, causando como consequência a queda na característica de usinabilidade do material. A figura 8, ilustra os resultados obtido pelo autor (14), que atribui o melhor resultado, quando houve a incorporação do oxigênio no sulfeto durante a fundição, passando a se solidificar já previamente, com morfologia globular, no seio do metal líquido, e portanto com uma boa dispersão e maior tamanho. A condição oposta, com o início da solidificação posterior ao metal, provoca a segregação do sulfeto nos contornos de grãos e, caracteriza a morfologia do tipo eutético [tipo 2 conforme Sims (13)]. Este tipo de sulfeto também se

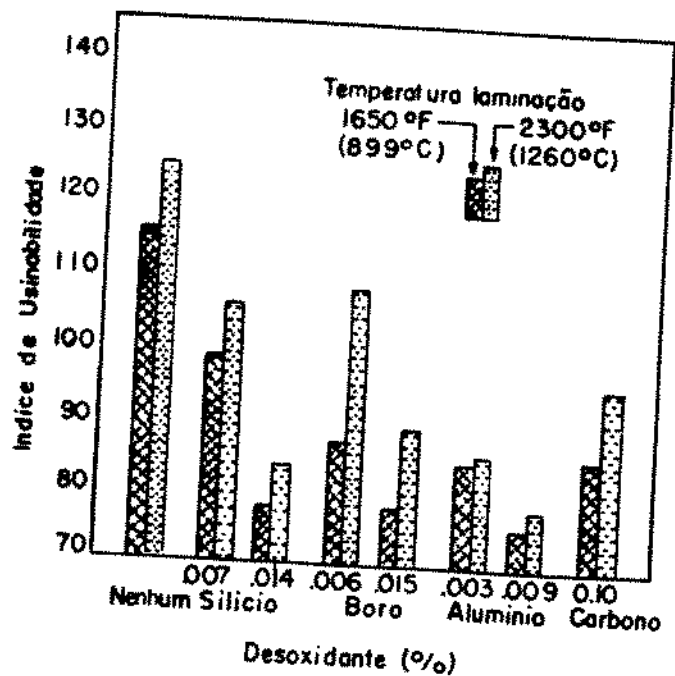


figura 8. Efeito do grau de desoxidação e da temperatura de laminação na usinabilidade do aço SAE 1212 (0,255% S) (14).

submete a maiores deformações após o processo de conformação por laminação a quente, tornando-se fino e de tamanho reduzido no produto laminado.

A respeito da dureza dos sulfetos de manganês globulares, e seu comportamento na deformação a quente, Opitz e Konig (15), mostraram que a presença de Mn-O na sua composição química, é o responsável pela menor deformação, porém este não produz nenhum endurecimento por solução sólida a temperaturas abaixo de 800°C, o que significa que a dureza à temperatura ambiente não será alterada. A única dureza comparativa entre sulfetos globulares e alongados, foi dada por Gaidos (16), onde o sulfeto globular apresentou-se aproximadamente 40 unidades Vickers mais mole que o alongado, quando medido à temperatura



ambiente. Este resultado é condizente com a informação da literatura (11) de que inclusões de sulfeto mais moles são melhores para a usinabilidade dos aços.

#### 2.2.5. Efeito das microinclusões de sulfeto na formação do cavaco:

Para ser entendido o efeito da morfologia dos sulfetos na usinabilidade, é necessário também ser avaliado o efeito dos mesmos na formação do cavaco. Conforme esquematizado na figura 9, neste mecanismo, ocorre uma interação do cisalhamento das zonas primária e secundária de deformação. O sulfeto de manganês aparece para promover a redução na tensão de cisalhamento e formar sítios de iniciação da fratura na zona primária de deformação. Na zona secundária de deformação, os sulfetos promovem o aparecimento de regiões de fácil cisalhamento (15,16,17). Tipnis e Cook (17), desenvolveram modelos mostrando que inclusões moles podem "rodar" durante o cisalhamento, de forma a criar uma zona mais fraca para a fratura. Já as inclusões duras, requerem um mecanismo mais difícil de formação de uma trinca, para provocar a fratura, conforme mostrado na figura 10. Outro aspecto discutido, é que estas zonas mais fracas, na verdade, são planos de intensa presença de inclusões na zona de fluência, que provocam intenso cisalhamento, grande velocidade de propagação de trincas e aumento da temperatura (16), levando conseqüentemente a uma queda na força tangencial de corte. Em alguns casos ainda, o sulfeto chega a formar um fino filme de oxi-sulfeto na interface do cavaco com a ferramenta, que age como lubrificante ou até como barreira para a difusão de carbono que, em ocorrendo, prejudica a vida da ferramenta.

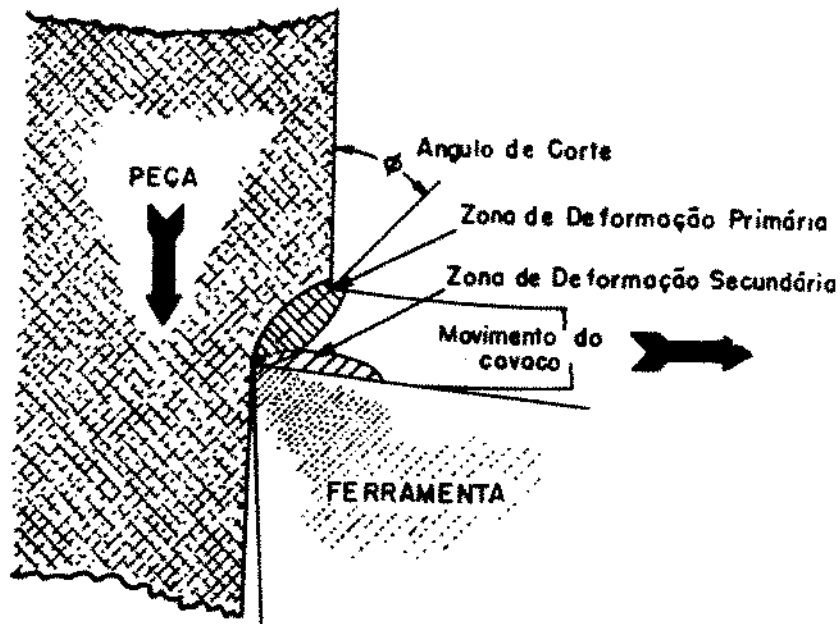


Figura 9. Esquema ilustrativo das zonas de deformação primária e secundária na formação do cavaco (6).

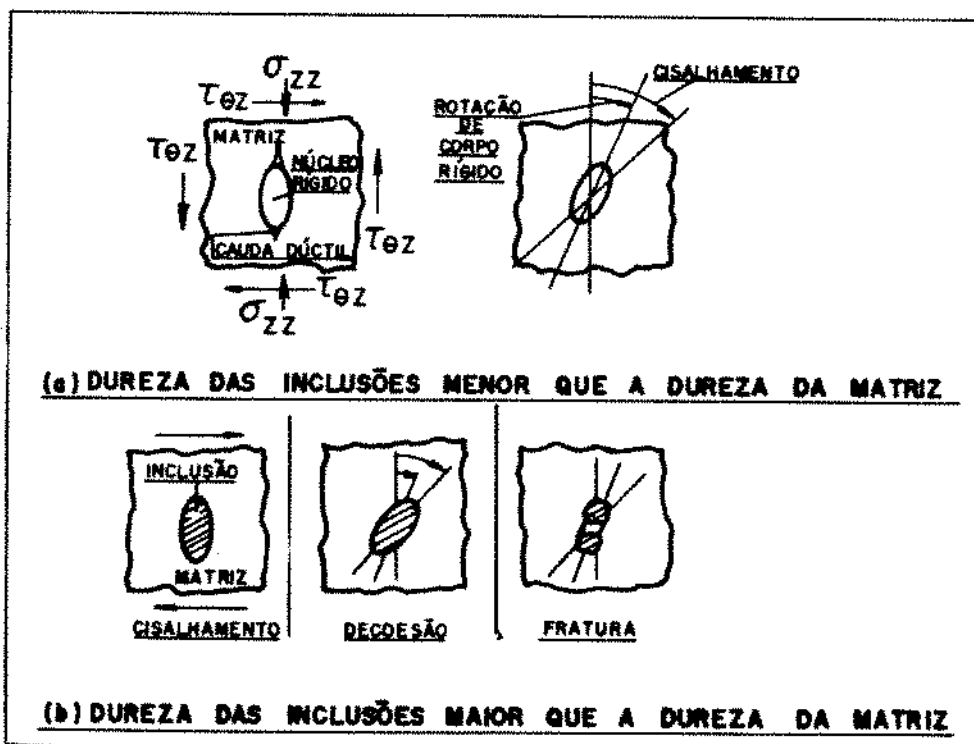


Figura 10. Mecanismos de fratura na zona primária de deformação em função da presença de inclusões moles(a) e duras(b) (7).

### 2.2.6. Efeito das microinclusões de sulfeto nas propriedades mecânicas dos aços:

A adição de enxofre, na maioria dos casos, apresenta reflexo negativo nas propriedades mecânicas dos aços (20):

- **Tenacidade na secção transversal:** A tenacidade é afetada na medida em que os sulfetos de manganês se apresentam mais alongados no material. Portanto, esta propriedade é função direta da morfologia e distribuição das inclusões. Bellot (21) e Fombalert (22), mostraram que é possível restaurar a tenacidade de aços com 0,030 % de enxofre ao nível daqueles com teores de 0,010%, apenas diferenciando a morfologia globular das inclusões de sulfeto.

- **Resistência à fadiga:** Em termos de limite de vida, a resistência à fadiga dos aços de usinabilidade melhorada é pouco afetada. Estatisticamente, estes valores se situam em torno de 10%, conforme mostra a figura 11.

- **Dutibilidade e conformação a frio:** São propriedades que também dependem basicamente do grau de globulização das inclusões. Em condições adequadas, os resultados podem ser comparativamente próximos.

Portanto, baseados nestes dados, verifica-se que a resposta do aço com usinabilidade melhorada às propriedades mecânicas, depende fundamentalmente da morfologia e distribuição das microinclusões deformáveis durante o processo de conformação a quente.

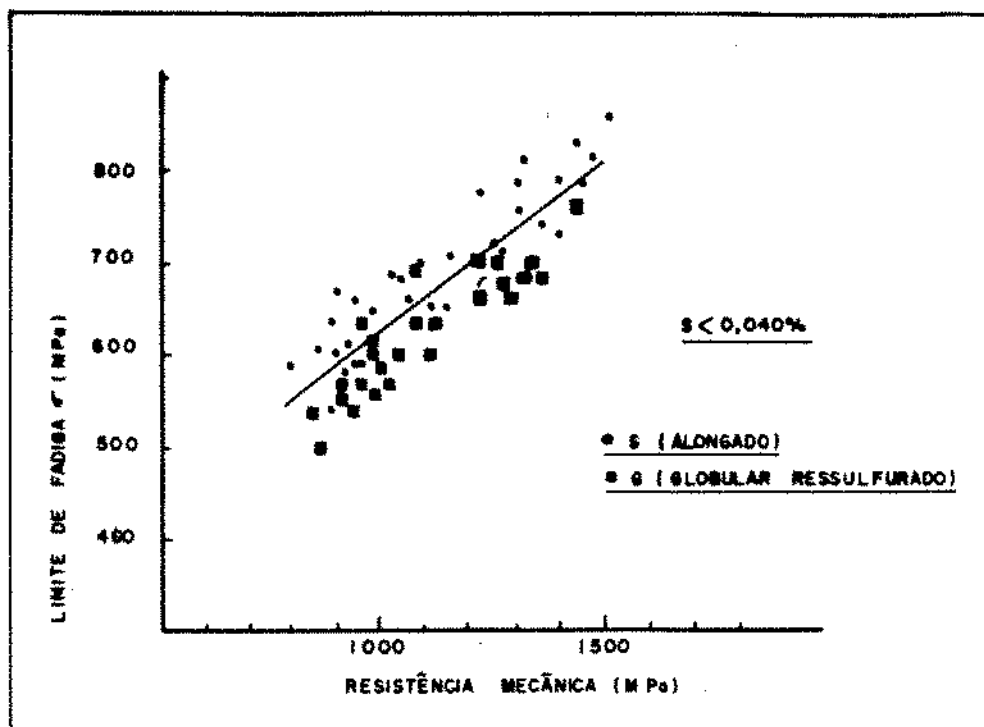


Figura 11. Relação do limite de fadiga em função da presença de inclusões alongadas (amostras S) e globulares (amostras G) (20).

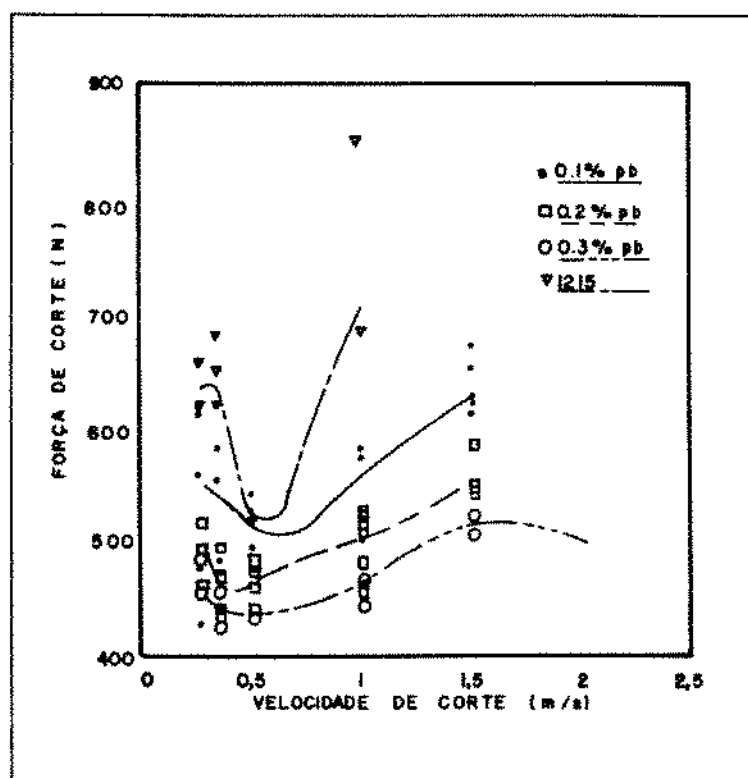


Figura 12. Efeito da adição de chumbo na força de corte para diferentes velocidades de ensaio (23).

### 2.2.7. Efeito da adição de chumbo na usinabilidade do aço:

O chumbo aparece quando adicionado ao aço, sempre em precipitados ou dispersão metálica por não se dissolver em nenhum teor no mesmo. A exemplo dos sulfetos, atua também como um lubrificante interno, reduzindo a temperatura na região de corte, aumenta a vida da ferramenta e melhora o acabamento superficial. Yagushi (23), verificou que o cavaco resultante da operação com aços ao chumbo é tão pequeno quanto maior for o teor de chumbo adicionado, inclusive para baixas velocidades de trabalho, e que a força de corte também é diretamente proporcional ao teor de chumbo presente no aço resulfurado SAE 12L14 (figura 12). Estes resultados podem ser explicados pela presença de microfissuras provocadas pela fusão do chumbo na formação do cavaco. Estas trincas atuam como núcleos de fratura no cavaco, reduzindo a área de resistência à deformação e concentrando tensões de cisalhamento (23).

Nos aços que possuem inclusões de sulfeto de manganês, o chumbo, em geral se apresenta envolvendo estas inclusões e se alojando nas suas extremidades. As figuras 13 a 16, mostram as imagens de raio x , da secção transversal de microinclusões de aço SAE 12L14, onde são apresentadas a distribuição e composição dos elementos chumbo, manganês e enxofre. Estas imagens confirmam a presença do chumbo envolvendo as inclusões de sulfeto de manganês, e poucas partículas dispersas na matriz. É importante que haja uma distribuição homogênea destas partículas no metal-base (23,24).



Figura 13. Aspecto das microinclusões em análise de raio-x da secção transversal de amostra de aço SAE 12L14. Aumento de 1000 vezes.

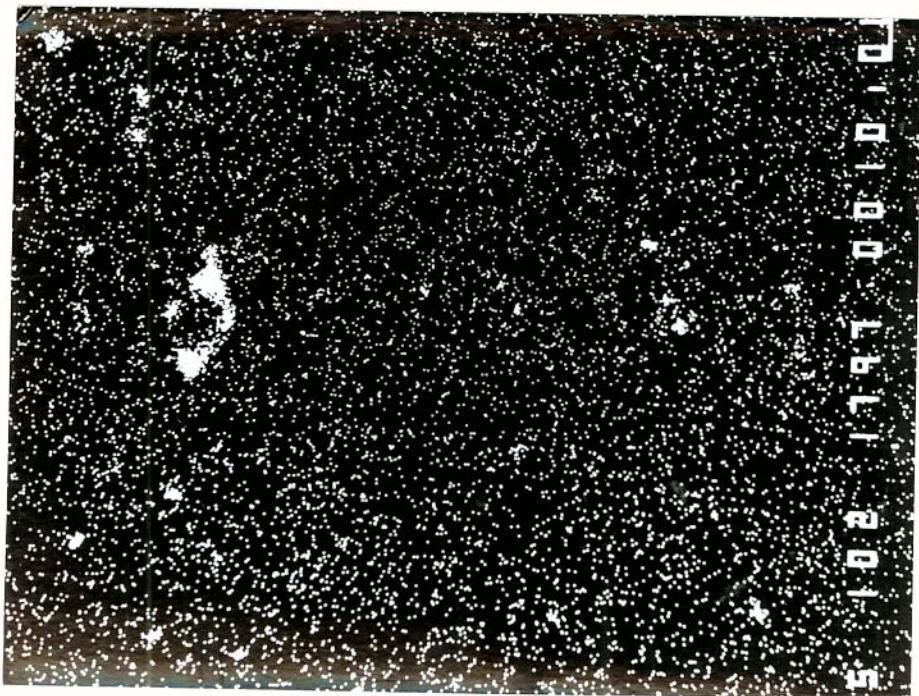


Figura 14. Aspecto da imagem de raio-x para o elemento chumbo em amostra de aço SAE 12L14. Aumento de 1000 vezes.

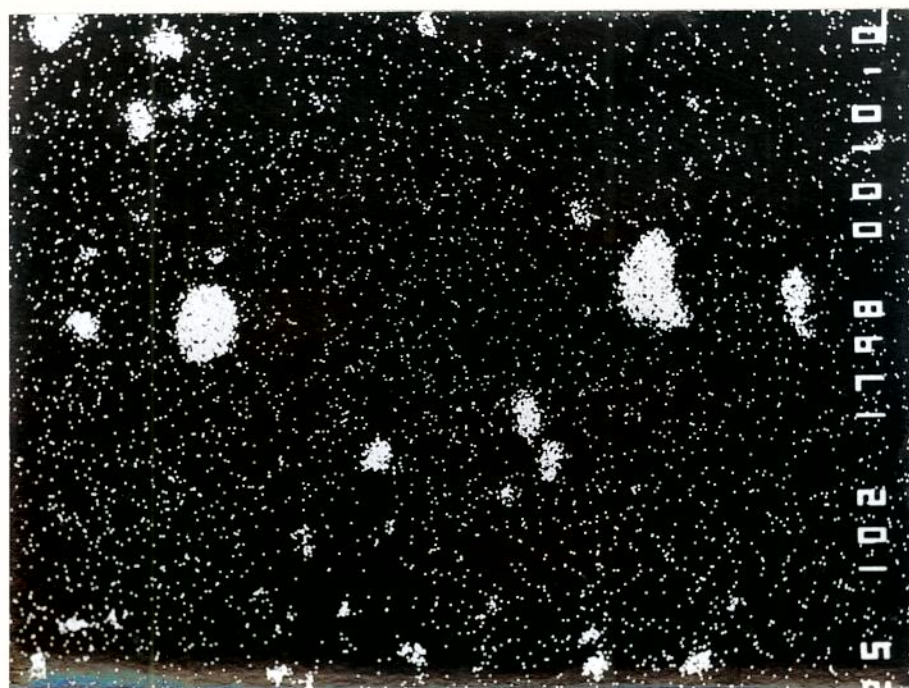


Figura 15. Aspecto da imagem de raio-x para o elemento mangar em amostra de aço SAE 12L14. Aumento 1000 vezes.



Figura 16. Aspecto da imagem de raio-x para o elemento enxofre em amostra de aço SAE 12L14. Aumento 1000 vezes.

#### **2.2.8. Efeito de outros elementos na usinabilidade dos aços:**

Elementos como o selênio, bismuto e telúrio, causam efeitos similares ao enxofre. Quando adicionados junto com o próprio enxofre, atuam como globulizantes dos sulfetos, condição esta que melhora a usinabilidade, conforme já apresentado.

Os aluminatos e os silicatos, que aparecem no aço geralmente pela adição respectivamente do alumínio e do silício durante o processo de desoxidação, na forma de metal-líquido, estarão presentes na forma de óxidos que causam efeitos adversos à usinabilidade. Os óxidos de alumínio são inclusões duras, abrasivas e indeformáveis que provocam o desgaste excessivo da ferramenta, diminuindo a sua vida. A adição de cálcio no processo, tem sido indicada para eliminar este efeito nocivo destas inclusões (25,26). O cálcio se incorpora na composição dos óxidos, formando uma película envolvente de aluminato de cálcio, que reduz o seu efeito abrasivo.

#### **2.2.9. Influência do processo de deformação a frio:**

A realização de operações prévias de encruamento da microestrutura excessivamente dútil, através da trefilação da barra por exemplo, tem sido indicado como um processo benéfico à usinabilidade o encruamento tende a aumentar o ângulo de cisalhamento na formação do cavaco, pois promove a queda da ductilidade e plasticidade, facilitando o arrancamento do cavaco e tendendo a eliminar a formação da aresta postiça de corte, principalmente nos



aços de microestrutura basicamente ferrítica. Este mecanismo está ligado à alteração do estado de deslizamento dos planos de cisalhamento, que influenciam na distribuição de esforços na região da aresta cortante e altera as condições de formação do cavaco de contínuo para cavaco de cisalhamento (2). Os melhores efeitos são observados na qualidade do acabamento superficial da peça usinada (27,28).

Poucos trabalhos, tem divulgado o efeito do encruamento a frio na usinabilidade. M. C. Shaw e colaboradores (28), avaliaram este efeito em aços ao carbono com diferentes teores de enxofre, sobre ferramentas de metal-duro. A vida das ferramentas, em aços com 0,033% e 0,110% de enxofre, foi maior para a microestrutura encruada, no entanto, ela não foi maior em aços com 0,180% de enxofre, mostrando que a presença de inclusões influencia no resultado.

Takashi e colaboradores (29), também descreveram resultados de vida de ferramenta em aços ao carbono com níveis de deformação de 7 a 27%. Quanto maior o grau de encruamento, maior a vida da ferramenta de aço-rápido. A mesma correlação não foi obtida no entanto, para ferramentas de metal-duro. A razão destes resultados, conforme os autores é a influência da dureza das barras encruadas. Portanto, os dois efeitos contrapostos, queda de dutilidade contra aumento de dureza, podem se anular mutuamente, e o resultado líquido pode ser nulo ou até mesmo desfavorável à usinabilidade (27).

A figura 17, mostra a relação entre a velocidade máxima de corte para 20 minutos de vida da ferramenta ( $V_{20}$ ), versus o nível de deformação a frio, obtida por Yamamoto (30) em aço com 0,20% C, 1,0% Cr (denominado SCr22). Conforme esperado, quanto maior o teor de enxofre, maior a vida da ferramenta. No entanto, o efeito do

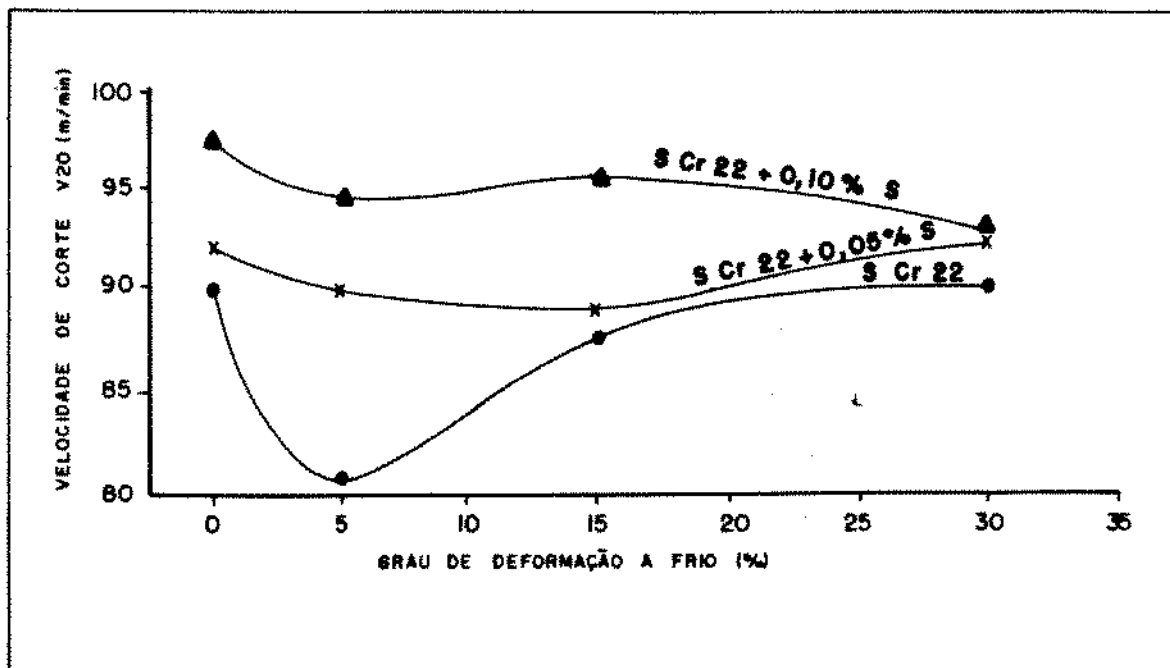


Figura 17. Efeito da deformação a frio na vida da ferramenta em aço ao carbono (SCr22) e resulfurado (SCr22+S) (29).

encruamento, varia com o teor de enxofre presente, onde, para 0,10% S este efeito é bem menor e diferente dos aços com baixos teores de enxofre. Este resultado mostra que as inclusões de sulfeto influenciam no comportamento do aço, quando submetido à deformação a frio.

Outro forte motivo para a recomendação de utilização de barras trefiladas em equipamentos de usinagem seriada e de alta produtividade são a melhor precisão dimensional, o menor sobremetal e a ausência de carepa abrasiva, o que permite maior homogeneidade na preparação da máquina e aparente melhor desempenho do aço (30). Estes efeitos são tidos como benefícios de origem mecânica para a usinagem, nada tendo a ver com o efeito metalúrgico sobre o aço.

Conforme já mencionado anteriormente, por se tratar de uma situação de propriedades conflitantes com a usinabilidade, isto é, o excesso de dureza se atingido neste caso, pode prejudicar a vida da ferramenta, é necessário que se defina a máxima redução de área que traz benefícios com a queda da ductilidade da microestrutura, sem no entanto, interferir marcadamente na vida da ferramenta. O trabalho ora em andamento visa justamente estabelecer estes limites, para o caso de um aço de microestrutura dútil como o SAE 12L14, considerando-se ainda neste caso a presença das microinclusões, importante fator na formação do cavaco, alteradas pela deformação a frio.

### **CAPITULO 3 - CUIDADOS OPERACIONAIS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS AÇOS RESSULFURADOS E AO CHUMBO**

#### **3.1. Fundição:**

A linha de aços especiais de usinabilidade melhorada, em geral é produzida em fornos elétricos a partir de sucata previamente selecionada e adição de ferro-ligas para correção e ajuste da composição química. A composição química final sempre obedece às especificações de normas do mercado (AISI/SAE/DIN), porém são mantidos rigorosos controles sobre os teores de manganês, enxofre, silício, alumínio e oxigênio. Os dois primeiros garantem a presença de inclusões de sulfeto de manganês e isenção de sulfetos de ferro que causam problemas de fragilidade a quente (32), causando a má qualidade

de superfície pela ocorrência de trincas e defeitos durante a laminação.

O silício e o alumínio, são enérgicos desoxidantes, portanto, os teores máximos admissíveis estão próximos de zero (máximo 0,05% e 0,005% respectivamente). Já o oxigênio, conforme apresentado anteriormente, é o maior responsável pela globulização dos sulfetos durante a solidificação. Portanto, os aços resulfurados devem ser produzidos com teores de oxigênio acima de 400 partes por milhão.

No caso dos aços ao chumbo, adições controladas deste elemento, são realizadas na última etapa do processo de fundição, visando as melhores condições de homogeneidade de distribuição em toda a corrida de aço-líquido. Todos os cuidados operacionais são tomados para evitar contaminação poluente à atmosfera, através da utilização de filtros de sucção de poeira em todas as fases do processo de adição de chumbo.

### **3.2. Transformação a quente:**

Com relação à transformação à quente, os aços são laminados a partir de lingotes até o produto final barras e bobinas, em temperaturas de trabalho que visam garantir o menor grau possível de deformação dos sulfetos, mantendo-os com o formato globular de partida. O resfriamento das barras é realizado em leito ao ar calmo e de maneira homogênea. A boa qualidade da superfície é obtida pelo alto grau de deformação a quente (lingote → barra final) e através de inspeções para o controle da qualidade do produto inicial e intermediário (tarugo).

### **3.3. Acabamento a frio:**

Dois tipos de produtos são produzidos por conformação a frio, na fase de acabamento:

- Arames ou barras finas (bitolas de rd 3,0 a 7,0 mm)
- Barras trefiladas

Os arames são trefilados a partir do fio-máquina até rolos de bitolas mais finas, sofrendo altos graus de deformação, com tratamentos térmicos intermediários de recozimento ou normalização, de maneira a não prejudicar a usinabilidade do produto pela elevação excessiva da dureza.

As barras trefiladas são produzidas a partir de barras laminadas em bitolas próximas (acima), geralmente prevendo deformações da ordem de 10 a 15%. Qualquer eventual necessidade de aproveitamento de barras com bitolas mais distantes, prevê um processo com recozimentos intermediários de modo a controlar a dureza final do produto e não prejudicar a sua usinabilidade.

## **CAPITULO 4 - ENSAIOS DE USINABILIDADE**

### **4.1. Critérios de usinabilidade**

Os métodos mais comumente utilizados para avaliar a usinabilidade dos metais, consideram critérios baseados em:

- Vida de ferramenta
- Produtividade

- Força de corte ou pressão específica de corte
- Força de avanço constante ou avanço constante
- Temperatura de corte.

Neste trabalho apenas o critério baseado em vida de ferramenta será abordado, isto porque, os ensaios mais aceitos e difundidos, tanto nas aplicações práticas como na literatura que aborda o assunto, são baseados no critério da vida.

#### 4.2 - Ensaio de usinabilidade baseado na vida da ferramenta

Chama-se vida de ferramenta, o tempo que a mesma trabalha efetivamente sem perder a sua capacidade de corte, segundo um critério previamente estabelecido e entre duas afiações consecutivas ou entre o estado de nova e o refugo (insertos intercambiáveis). Como critério de vida, utiliza-se o desgaste da ferramenta ou suas conseqüências, tais como o aumento da força e da potência de usinagem, rugosidade superficial da peça usinada, destruição da aresta de corte ou da cunha cortante da ferramenta, etc. O fim da vida, em geral, coincide com o avançado estado de desgaste das superfícies da ferramenta(3).

Os ensaios de longa duração são realizados com o objetivo de obter curvas de vida de um par ferramenta-peça e assim obter dados de fatores de influência quanto às condições econômicas de usinagem. Esta curva geralmente é apresentada em unidades logarítmicas da função " $T = f(v)$ ", de acordo com a expressão de "Taylor":

$$T \cdot v^x = K$$

onde: T = vida da ferramenta em minutos

v = velocidade de corte em metros por minuto

x = constante = coeficiente angular da reta T x v

K = constante = vida da ferramenta para a velocidade de 1 metro por minuto.

Estes ensaios tem como desvantagem o consumo elevado de material e o longo tempo de execução. Geralmente, os ensaios são realizados em condições normais de usinagem, onde o desgaste é verificado periodicamente até atingir a dimensão previamente definida como fim de vida da ferramenta. A partir destes valores são traçadas as curvas de vida em função de diferentes velocidades de corte aplicadas. Na sua utilização prática, pode-se obter de uma forma contínua, a vida correspondente a cada velocidade de corte.

#### 4.2.1. Ensaios de curta duração

Como alternativa aos ensaios de vida de longa duração, foram criados os ensaios de curta duração. Nestes, as condições de trabalho são mais agressivas em comparação com as condições reais de utilização, justamente com a finalidade de atingir o critério de vida de ferramenta de forma rápida (32, 33).

Dentro desta classe, os ensaios mais conhecidos e utilizados são:

-Ensaio de faceamento de "Mathon"

-Ensaio de torneamento cilíndrico escalonado

-Ensaio de torneamento cilíndrico acelerado uniformemente

Dentro destes ensaios, apresentam especial interesse neste trabalho, o "Ensaio de Mathon" e o "Ensaio de Torneamento Cilíndrico Acelerado".

#### 4.2.2. Ensaio de Faceamento de Mathon

O método de ensaio por faceamento de um disco, inicialmente proposto por "Brandsma", conforme o próprio título menciona, consiste numa operação de faceamento com rotação e avanço constantes, realizado do centro para a periferia da peça. O início se dá a partir de uma pequena velocidade de corte, que corresponde ao diâmetro do furo central do disco. Ao longo do ensaio, chega-se à velocidades bem maiores, o que provoca a "queima" da ferramenta junto à aresta de corte (norma AFNOR A03-654). Portanto, a realização deste ensaio, pressupõe trabalhar com amostras de diâmetros suficientemente grandes para destruir a ferramenta numa única operação de faceamento.

Com o objetivo de diminuir o tamanho do corpo-de-prova e obter uma medida do desgaste da ferramenta toda vez que se fizer uma operação, o pesquisador Renaut Mathon (34,35,36), introduziu algumas alterações no ensaio de disco que a partir daí recebeu o seu nome:

- O furo central de início do ensaio, foi normalizado em diâmetro de 6,0 mm.

- A profundidade de corte foi fixada em 1,0 mm, com rotação e avanço constantes.

- A usinagem é interrompida com a queima da ponta cortante da ferramenta. Após o ensaio, o perfil usinado da superfície de corte remanescente no corpo-de-prova, deve ser medido com o auxílio de um



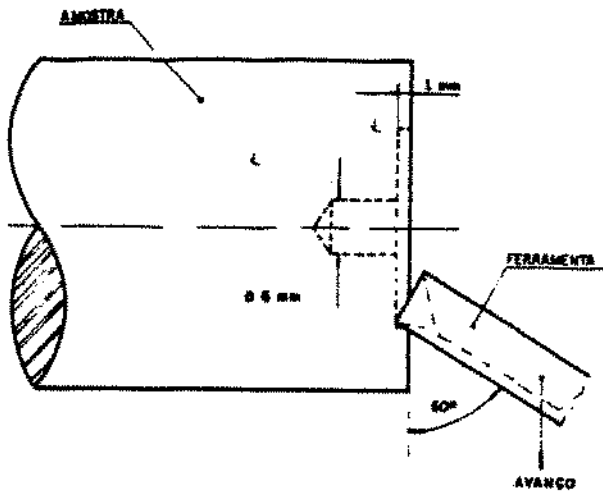
relógio comparador de precisão mínima de 0,02 mm, fixado ao próprio torno e isento de folgas. A leitura de 0,20 mm no relógio comparador, corresponde a um recuo de igual valor na ponta da ferramenta. Dessa maneira, define-se o diâmetro  $D_{0,20}$  do disco, que indica o comprimento usinado no teste. A figura 18, apresenta esquematicamente a geometria, a montagem dos corpos-de-prova e o esquema de realização do ensaio de Mathon. A figura 19, apresenta a configuração geométrica da ferramenta utilizada no ensaio, que é fundamental para que seja atingida a "queima" durante a operação. De igual importância é o fato destas ferramentas serem confeccionadas em aço SAE 52100 (alto-carbono), temperado e revenido para dureza de 59 a 61 na escala Rockwell C.

A variação da velocidade de rotação do torno, com avanço constante, permite obter-se diferentes resultados de  $D_{0,20}$ . Uma vez plotados num diagrama  $\log(D_{0,20}) = f(\log N)$ , se caracterizará uma reta, fazendo valer a relação:

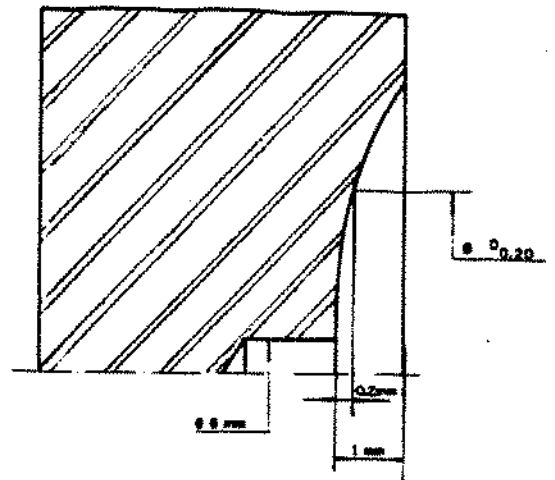
$$D_{0,20}^m \cdot n = \text{constante}$$

onde "m" é a inclinação da reta obtida (27).

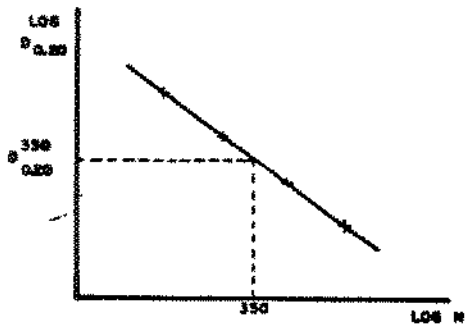
O índice de usinabilidade de cada material, é estabelecido pela relação percentual entre o diâmetro  $D_{0,20}$  das amostras-problema, com o diâmetro  $D_{0,20}$  da amostra-padrão, geralmente para velocidades de ensaio de 350 RPM para aços convencionais e de 1000 RPM para aços de usinabilidade melhorada (1).



**A - MONTAGEM**



**B - PERFIL APOS O ENSAIO**



**C - DETERMINAÇÃO GRÁFICA D 350 / 0.20**

**DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE USABILIDADE**

$V$	$D$	Apq. Examinada	$\times$	100
$350$	$0.20$			
$350$	$0.20$	Apq. Padrão		

Figura 18. Esquema do princípio de realização do ensaio Mathon e apresentação gráfica dos resultados.

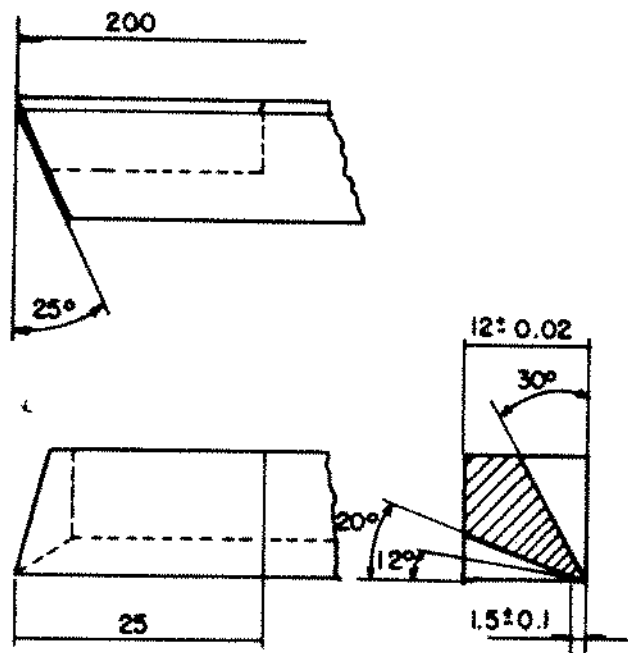


Figura 19. Desenho das ferramentas especificado pela norma AFNOR A03-654 (1).

#### 4.3. Ensaio de torneamento cilíndrico acelerado, baseado no ensaio de faceamento de Mathon:

Se o ensaio de faceamento de Mathon, é muito atrativo pela facilidade de execução, ele parte do pressuposto que o material é homogêneo quanto às propriedades mecânicas e metalográficas ao longo de toda secção transversal da peça. Esta condição geralmente não é atendida para o caso de barras de aço laminadas, utilizadas na indústria de construção mecânica. Além disso, é necessário que haja sempre um percurso de corte ( $l_c$ ), capaz de "queimar a ferramenta", o que significa que a secção redonda de faceamento, não pode ter diâmetro demasiadamente pequeno, o que limitaria a realização deste ensaio à barras de grandes bitolas .

O ensaio de torneamento cilíndrico é um derivado do ensaio de Mathon, na medida em que se utiliza de todos os parâmetros do ensaio de faceamento como: ferramenta; velocidade de corte inicial; aceleração da velocidade de corte, porém utiliza-se de uma operação de torneamento na mesma direção do eixo longitudinal de peça, com aceleração contínua da velocidade de rotação, o que permite simular uma operação de faceamento. O final do ensaio ocorre com o desgaste da aresta de corte da ferramenta, a partir de uma perda de 0,20 mm na cota usinada. Neste ponto obteve-se o comprimento usinado que será processado matematicamente e comparado aos valores obtidas em ensaios semelhantes realizados com a amostra-padrão.

As vantagens desse ensaio são:

- Permite a avaliação da usinabilidade em barras de pequeno diâmetro, sem prejudicar a caracterização no momento da "falha da ferramenta", fator determinante do índice de usinabilidade da peça.

- Permite avaliar a usinabilidade em "camadas" homogêneas da seção transversal. No caso de barras trefiladas, esta característica é muito importante, uma vez que temos gradientes de dureza entre a superfície e o núcleo das barras.

- Com o auxílio do CNC (Controle Numérico por Computador), podemos incrementar a velocidade de corte, com uma aceleração controlada e de maneira praticamente contínua (incrementos milésimos), muito próxima daquela conseguida no ensaio de faceamento, dispensando dispositivos especiais.

**4.4. Modelo matemático do ensaio de torneamento cilíndrico acelerado:**

Para correlacionar os dois ensaios, é necessário que os valores de aceleração e velocidade inicial, sejam idênticas. Para tanto, estabeleceu-se as seguintes condições operacionais :

**4.4.1. Cálculo da aceleração ( $f$ ) :**

Considerando as equações elementares do movimento de rotação:

$$V = V_1 + a \cdot t \quad \text{e} \quad V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (2)$$

onde "V" é a velocidade final após o tempo "t", com velocidade o inicial "V1" e aceleração "a". Na outra equação, a conversão da velocidade de rotação "n" em velocidade linear "v", para um diâmetro "d".

tem-se :  $V = \frac{\pi \cdot n}{1000} (d_1 + 2vt)$  e, se  $V_a = f \cdot n$  (f = avanço)

ficamos com  $V = \frac{\pi \cdot n}{1000} (d_1 + 2 \cdot f \cdot n \cdot t)$

$$V = \frac{\pi \cdot n}{1000} \cdot d_1 + \frac{\pi \cdot n^2 \cdot 2 \cdot f \cdot t}{1000}$$

se  $V = V_1 + a \cdot t$  temos que  $V_1 = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$

e, a aceleração é :  $a = (2 \cdot \pi \cdot n^2 \cdot f) / 1000$  (Ref.2-pag.584)

Considerando que o avanço "f" é constante, temos um valor de aceleração característico de cada rotação de trabalho utilizada no ensaio de faceamento Mathon.

#### 4.4.2. Cálculo do incremento de rotação:

quer se determinar:  $\Delta V = V_2 - V_1$

partindo-se de  $V_2 = V_1 + \gamma^1 t$  ou seja,  $V_2 - V_1 = \gamma^1 t$

e,  $\frac{\pi \cdot d \cdot (\Delta n)}{1000} = V_2 - V_1$ , temos  $\frac{\pi \cdot d \cdot (\Delta n)}{1000} = \gamma^1 \cdot t$

por outro lado, como o tempo para uma volta é o inverso da rotação aplicada no ensaio, "  $t = 1 / n$  "

e, sendo  $V = f \cdot n$  e,  $t = \frac{\text{espaço}}{\text{velocidade}}$

resulta:  $(\Delta n) = \frac{1000 \cdot \gamma^1}{\pi \cdot d \cdot n}$

se,  $\gamma^1 = (2 \cdot \pi \cdot f \cdot n^2) / 1000$

chega-se a  $(\Delta n) = \frac{1000 \cdot 2 \pi \cdot f \cdot n^2}{\pi \cdot d \cdot n \cdot 1000} = (2 \cdot f \cdot n^2) / d$

onde : |  $n$  = rot. de faceamento  
 |  $d$  = diâm. do c. prova  
 |  $f$  = avanço Mathon

para  $f = 0,035$  mm/volta, conforme sugere a norma AFNDR A03-654 resulta

$$" \Delta n = 0,070 \cdot n / d "$$

#### 4.4.3. Desenvolvimento do diagrama de blocos para incremento da velocidade no sistema CNC:

O ensaio requer basicamente a viabilidade de aplicação de aceleração contínua da velocidade de corte, fato que ocorre linearmente numa operação de faceamento, porém neste caso, a ser aplicado a uma operação de diâmetro constante.

As máquinas CNC, apresentam o recurso de variação contínua da rotação, que normalmente são utilizadas em operações com variação de diâmetro, para manter a velocidade de corte constante. Porém, tais máquinas não prevêm a variação contínua da rotação para permitir uma aceleração constante da velocidade de corte, quando o diâmetro é mantido constante.

Para a obtenção de tal efeito, numa primeira etapa, desenvolveu-se um programa CNC manual que permitiu obter uma variação de velocidade de corte proporcional a um incremento de 2 rpm para cada milímetro de avanço. Adotou-se uma dada velocidade inicial, e para garantir um percurso de avanço suficiente para provocar a falha da ferramenta, foram necessários 400 blocos de programação. Este procedimento, além de trabalhoso apresenta uma variação da velocidade por incrementos relativamente grosseiros, se comparado ao ensaio de faceamento.

Uma vez verificado que a idéia era factível, e considerando que o centro de torneamento disponível apresenta o padrão de linguagem previsto pelas normas DIN 66024 e DIN 66025, muito embora contemos com uma limitação de memória do mesmo, foi possível a escrita do programa na linguagem classificada como "G". O programa foi dividido em mil

TITULO DO PROGRAMA

1. DADOS DE ENTRADA
- ROTAÇÃO INICIAL (RPM): (conf. tabela 2)
  - POSIÇÃO INICIAL (MM): ZERO
  - INCREMENTO DE ROTAÇÃO (RPM): (conf. tab.2)
  - INCREMENTO DE POSIÇÃO (MM): (conf. tab.2)
  - DIAMETRO FINAL (MM): (conf. tab.2)

2. ARQUIVO DE DADOS GERADOS PARA O CNC:

```

N00 G 99 : define a programação "zero-máquina"
N10 T 0101 : chama ferramenta
N20 GXZ : define as coordenadas "zero-peça"/ponto-de-troca
N30 M6 : libera troca da ferramenta
N40 G 92X200.Z100 : coordenadas ponto troca-de-ferramentas
N50 GX22.001.73 : aproximação rápida para ferramenta
N60 G 97 : programação em RPM
N70 G 47 S ____ : rotação inicial em RPM
N80 G 92S300M4 : liga árvore anti-horária e máxima rotação
N90 G42 : aciona corretores de ferramenta
N100 G1X22.00Z.1F.1 : ativa corretores
N110 Z 0.F. ____ : define avanço por volta
Z 0.00 : define coordenada inicial do diâmetro
S ____ : rotação inicial
N 135 M30

```

3. COMANDOS DE MOVIMENTOS DA FERRAMENTA/PEÇA PARA UM ENSAIO

(1) Z 000	*	(6)Z-0,33	*	(11)Z-0,66
S 227(rot.in.)		S 252		S 277
(2) Z-0,07		(7)Z-0,40		(12)Z-0,73
S 232		S 257		S 282
(3) Z-0,13		(8)Z-0,46		(13)Z-0,79
S 237		S 262		S 287
(4) Z-0,20		(9)Z-0,53		(14)Z-0,86
S 242		S 267		S 292
(5) Z-0,26		(10)Z-0,59		(15)Z-0,92
S 247	*	S 272	*	S 297

Figura 20. Esquema de geração de dados para realização dos ensaios TCA através do CNC.



trechos, com os respectivos incrementos lineares e suas respectivas variações rotacionais, permitindo assim uma aceleração praticamente contínua e linear, com o avanço da ferramenta.

A limitação da memória, que não permitiu a utilização de sub-programas para a chamada aditiva da rotação, implicou na necessidade de um programa relativamente simples, porém extenso, com a criação de cerca de 2000 blocos de programação. A figura 20 mostra apenas como exemplo, os primeiros 15 blocos do programa CNC, gerados através de um programa computacional, aqui denominado de programa de apoio.

O programa de apoio solicita a introdução dos dados que caracterizam as condições de ensaio para ensaio, quais sejam:

- rotação inicial do corpo-de-prova
- posição inicial da ferramenta
- incremento da rotação (caracteriza a aceleração)
- incremento de posição (ponto de acréscimo na rotação)
- diâmetro final do corpo-de-prova
- limite de deslocamento (que é função do número de pontos de incremento e ou do comprimento do corpo-de-prova)

O programa de apoio foi concebido na linguagem Pascal, em um microcomputador IBM-PCXT e a transmissão do programa CNC para o "armário" de controle da máquina, foi realizado através da porta serial RS 232C.

## CAPITULO 5 - MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E METODOS UTILIZADOS

### 5.1. Amostragem

#### 5.1.1. Barras trefiladas de aço SAE 12L14

A partir de um lote de barras laminadas na bitola Rd 24,00 mm, pertencentes à uma corrida de aço SAE 12L14, com a seguinte composição química (%):

C= 0,12	P= 0,047	Ni= 0,05
Si= 0,04	S= 0,248	Pb= 0,21
Mn= 1,14	Cr= 0,10	O= 165 ppm

Foram trefiladas 6 barras, com crescentes graus de deformação a frio, constituindo um grupo de amostras conforme apresentado na tabela 2. De cada barra, foram retirados jogos de corpos-de-prova para ensaios de:

- Usinabilidade (9 corpos-de-prova)
- Dureza (perfil na secção transversal)
- Tração
- microestrutura e microinclusões

#### 5.1.2. Amostra-padrão de aço SAE 1212

Para utilização como padrão nos ensaios de usinabilidade, tal como previsto nas normas usuais, foi utilizada uma barra de aço resulfurado e refosforado do tipo SAE 1212, trefilada no diâmetro Rd

22,10 mm (15% de redução em área) e com dureza de 190 HB.

A análise química (%) desta barra apresentou:

C= 0,12	P= 0,027	Ni= 0,21
Si= 0,04	S= 0,197	O= 153 ppm
Mn= 0,29	Cr= 0,29	

Tabela 2 - Parâmetros de realização dos ensaios

Redução de área	C.P. n.	Diâm. inic. (mm)	Diâm. final (mm)	Rotaç. inic. (RPM)	Agres. rotaç. (RPM)	Acréscimo avanço (mm)
Bruto	21			227	5	0,066
	20	24,0	22,0	270	5	0,055
	19			327	5	0,046
10,6%	18			241	5	0,061
	17	22,7	20,7	290	5	0,051
	16			348	5	0,029
22,0%	15			260	5	0,058
	14	21,2	19,2	312	5	0,048
	13			375	5	0,040
37,0%	12			294	5	0,051
	11	19,0	17,0	352	5	0,042
	10			423	5	0,035
41,0%	09			305	5	0,049
	08	18,3	16,3	366	5	0,041
	07			439	5	0,034
51,0%	06			340	5	0,044
	05	16,7	14,7	408	5	0,037
	04			490	5	0,031
padrão	03			247	5	0,060
	02	22,6	20,6	297	5	0,050
	01			356	5	0,042

## **5.2. Ferramentas de Usinagem**

Conforme proposto pela norma AFNOR A03-654, as ferramentas foram todas fabricadas a partir de uma mesma barra de aço SAE 52100 e foram todas usinadas; temperadas; revenidas e retificadas em conjunto, proporcionando um jogo destas com idênticas propriedades e dimensões. A dureza atingiu o valor de 60 unidades Rockwell C na superfície. A figura 19 mostra o desenho destas ferramentas.

## **5.3. Preparação dos corpos-de-prova e da ferramenta:**

Os corpos-de-prova, foram todos cortados no mesmo comprimento para facilitar a montagem do equipamento. Todos com um furo de centro numa das extremidades. O conjunto é montado conforme mostrado na figura 21, obedecendo inclusive o ângulo de posicionamento de 60 graus entre a peça e a ferramenta, conforme estabelece a norma AFNOR A03-654. Para fixação da ferramenta, foi construído um suporte especial que garante a rigidez na montagem e facilita a calibração para ajuste da profundidade de corte.

## **5.4. Aplicação do ensaio**

### **5.4.1. Realização dos ensaios:**

Os ensaios de usinabilidade por torneamento cilíndrico, foram realizados a partir dos parâmetros que simulam as mesmas condições de

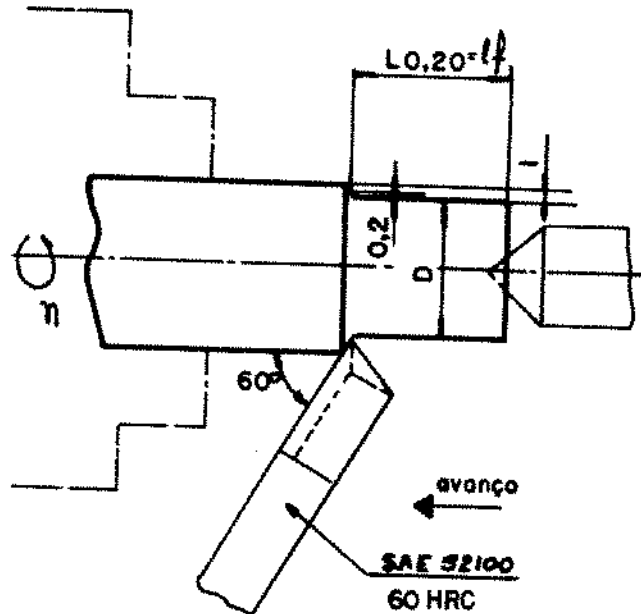


Figura 21. Esquema representativo da montagem da peça e ferramenta do ensaio de torneamento cilíndrico.

aceleração e velocidade inicial do ensaio de faceamento "Mathon". A tabela 2 apresenta estes dados operacionais, obtidos a partir das equações deduzidas no capítulo 4 e calculadas da seguinte forma :

A velocidade inicial foi obtida a partir da equação

"  $V = (\pi \cdot d \cdot n) / 1000$ ", aplicada às condições de :  $d = 6,0$  mm e "n" igual à velocidade de rotação (RPM), idêntica à de realização da operação de faceamento do ensaio "Mathon".

Da mesma forma, a aceleração obtida a partir da equação

"  $f = (2 \cdot a \cdot n) / 1000$ ", foi operacionalizada através do acréscimo de rotação por avanço da ferramenta. Este acréscimo " $\Delta n$ ", calculado através da equação " $\Delta n = (2 \cdot f \cdot n) / d$ ", conforme deduzido no capítulo 4

(item 4.4.2), varia também em função das condições da aplicação do ensaio de faceamento "Mathon". Para as condições de ensaios realizadas, foi utilizado avanço (f) de 0,035 mm por volta, conforme recomendado pela norma Afnor A 03-654, com demais dados decorrentes das dimensões dos corpos-de-prova. A aceleração portanto, é constante para cada grupo de amostras de igual diâmetro e de mesma velocidade de rotação (RPM) de referência no faceamento.

Uma vez montado e carregado o sistema de controle numérico por computador do torno "Cosmos", o ensaio constituiu-se no torneamento cilíndrico dos corpos-de-prova, no sentido longitudinal, conforme os parâmetros já estabelecidos e a profundidade de corte de 1,0 mm.

A usinagem evolui até a falha da ferramenta. O ponto de medição do percurso de avanço (lf) foi tomado onde ocorreu o desgaste de 0,20 mm da mesma.

#### 5.4.2. Cálculo do índice de usinabilidade

A partir do percurso de avanço "lf", calcula-se o "lc" que é o percurso de corte da ferramenta, isto é :

$$*-----*$$

$$lc = lf \times d \times 1/f = lf \times d \times \sqrt{1/0,035} = lf \times d \times 89,85 \text{ (mm)}$$

$$*-----*$$

Para maior confiabilidade no processo, foram realizados três ensaios por amostra. Foram testadas também, três diferentes condições de velocidade, correlacionados com as três rotações do ensaio Mathon: 833;1000 e 1200 rpm por exemplo (progressão geométrica de razão 1,2).

Estes resultados, conforme proposto pela equação de vida de ferramenta de Taylor, " $T.v^x = K$ ", devem apresentar uma relação linear para grandezas logarítmicas. Assim sendo, uma análise de

regressão linear foi realizada a partir dos percursos de corte "log lc", proporcionando melhor precisão nos resultados.

A partir destas retas redesenhadas pelas equações de regressão, foi estabelecido o comprimento usinado para a marca dos 1000 RPM e a relação deste com o valor obtido da mesma forma para os ensaios com as amostras-padrão, estabeleceu os índices de usinabilidade (em %), de cada corpo-de-prova:

$$I.U. = \frac{lc \text{ (amostra-problema)}}{lc \text{ (amostra-padrão)}} \times 100$$

A média destes valores foi adotada como índice para cada condição de redução por trefilação das barras de aço SAE 12L14. O apêndice 1, denominado de "programa de regressão linear para os resultados dos ensaios", mostra todas os gráficos de pontos obtidos a partir dos ensaios e as respectivas retas após a aplicação da regressão linear.

## CAPITULO 6 - RESULTADOS

### 6.1 Caracterização metalográfica

**6.1.1. Microestrutura :** As amostras das barras nas condições de bruto de laminado, em redondo de 24,00 mm, apresentaram microestrutura com alinhamentos de ferrita e perlita, tal como mostrado na figura 22. A medida que o grau de redução de área por trefilação, foi aumentando, maior foi o encruamento e a microestrutura se mostrou mais deformada, no sentido longitudinal (figuras 23 a 27). Nas amostras com 41 e 51%

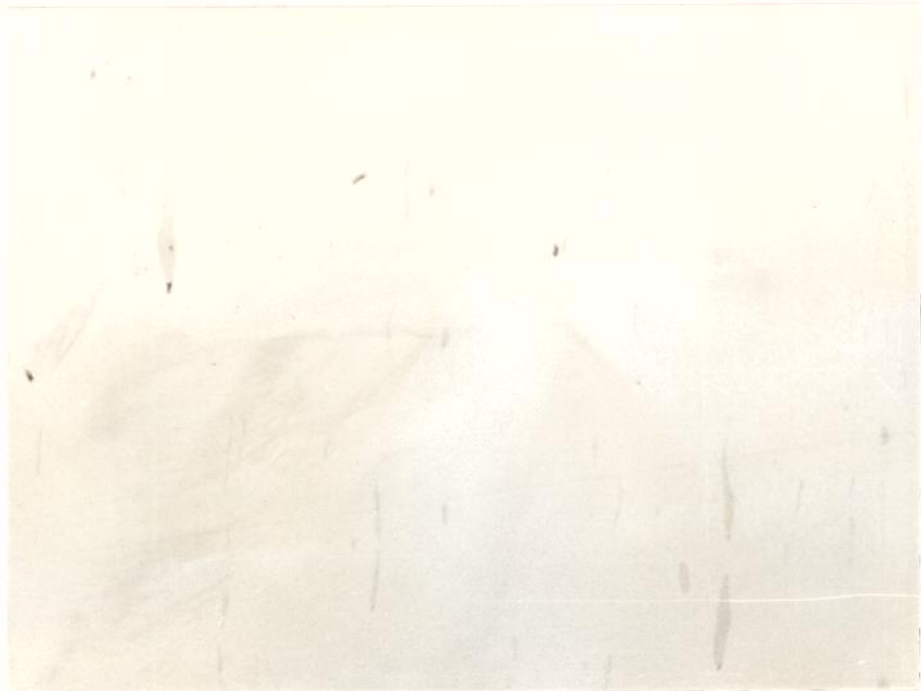


Figura 22. Microestrutura da amostra de aço SAE 12L14 bruta laminação (Rd 24,00 mm). Aumento de 100 vezes. Ataque de nital.



Figura 23. Microestrutura da amostra de aço SAE 12L14 com 10, de redução de área (Rd 21,2 mm). Aumento de 100 vezes.





Figura 24. Microestrutura da amostra de aço SAE 12L14 com 22 % redução de área (Rd 21,2 mm). Aumento de 100 vezes. Ataque de nital.



Figura 25. Microestrutura da amostra de aço SAE 12L14 com 37 % redução de área (Rd 19,0 mm). Aumento de 100 vezes. Ataque de nital.



Figura 26. Microestrutura da amostra de aço SAE 12L14 com 41 % redução de área (Rd 18,3 mm). Aumento de 100 vezes. Ataque de nital.

Figura 27. Microestrutura da amostra de aço SAE 12L14 com 51% redução de área (Rd 16,7 mm). Aumento de 1000 vezes. Ataque de nital

de redução de área, já não se distinguem os contornos de gr ferríticos, conforme mostrado nas figuras 26 e 27.

**6.1.2. Microinclusões:** As microinclusões presentes nas amostras aço SAE 12L14, são de sulfeto de manganês, frequentemente associadas uma inclusão metálica de chumbo que as envolve, tal como mostrado figura 28. Esporadicamente, encontram-se também algumas partículas chumbo isoladas.

As microinclusões de sulfeto de manganês, apresentam morfolog pouca alongada e espessa, típica de procedência de solidificação , formato globular, dispersa e levemente deformada durante a laminação quente. Em função da deformação a frio , e neste caso, a partir



Figura 28. Microinclusões da amostra da aço SAE 12L14 na condição bruta de laminação (24,0 mm). Aumento de 200 vezes.

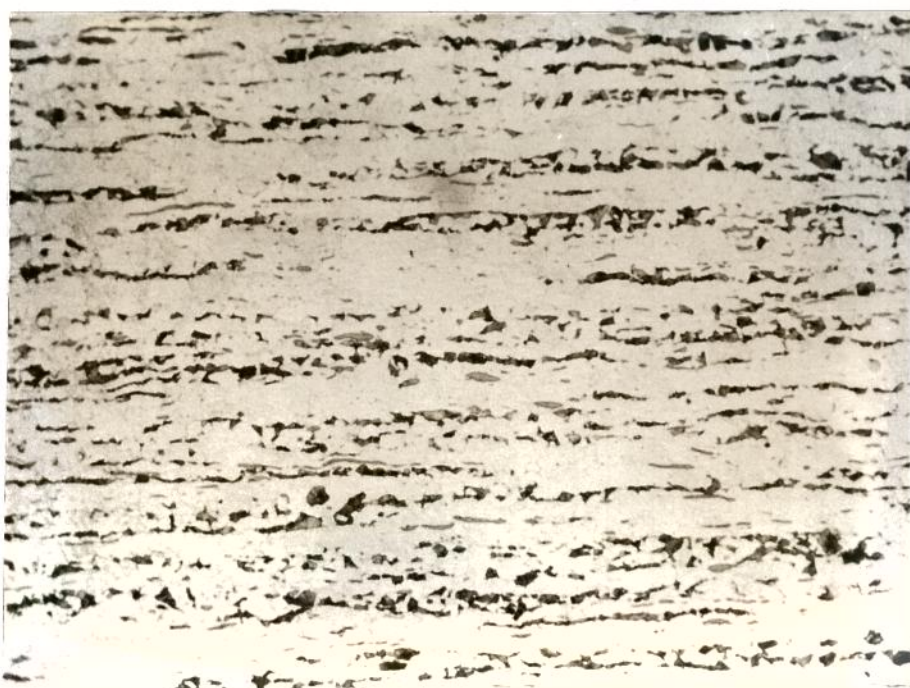


Figura 29. Microinclusões da amostra de aço SAE 12L14 com 10, de redução de área (Rd 22,7 mm). Aumento de 200 vezes.



Figura 30. Microinclusões da amostra de aço SAE 12L14 com 22, de redução de área (Rd 21,2 mm). Aumento de 200 vezes.



Figura 31. Microinclusões da amostra de aço SAE 12L14 com 37% redução de área (Rd 19,0 mm). Aumento de 200 vezes.



Figura 32. Microinclusões da amostra de aço SAE 12L14 com 41% redução de área (Rd 18,3 mm). Aumento de 200 vezes.



Figura 33. Microinclusões da amostra de aço SAE 12L14 com 51% redução de área (Rd 16,7 mm). Aumento de 200 vezes.

41% redução (inclusive), encontram-se muitas inclusões fragmentadas provocando vazios no material, conforme mostrado na figuras 29 a 33.

## 6.2. Propriedades mecânicas

6.2.1. Dureza: O perfil de dureza na secção transversa apresentou um incremento a partir do núcleo, para todas as amostras conforme mostrado na figura 34. A figura 35, numa outra análise de dureza das amostras, medidas ao meio-raio, mostra que o encruamento acrescenta muito mais dureza no material para baixos níveis de deformação (até 22%). A partir dos 120 HB iniciais. Para reduções de área por trefilação, acima de 37%, a dureza do material sofreu pouca elevação então, uma curva de mais leve inclinação. Este comportamento

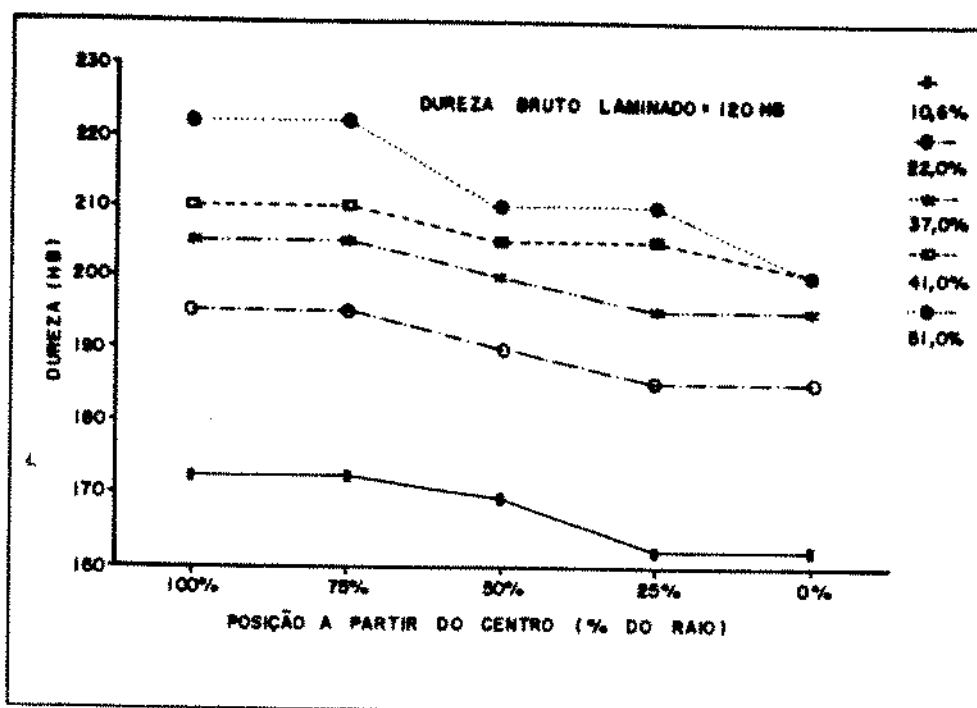


Figura 34. Perfil de dureza na seção transversal das amostras de aço SAE 12L14 após crescentes graus de redução por trefilação.

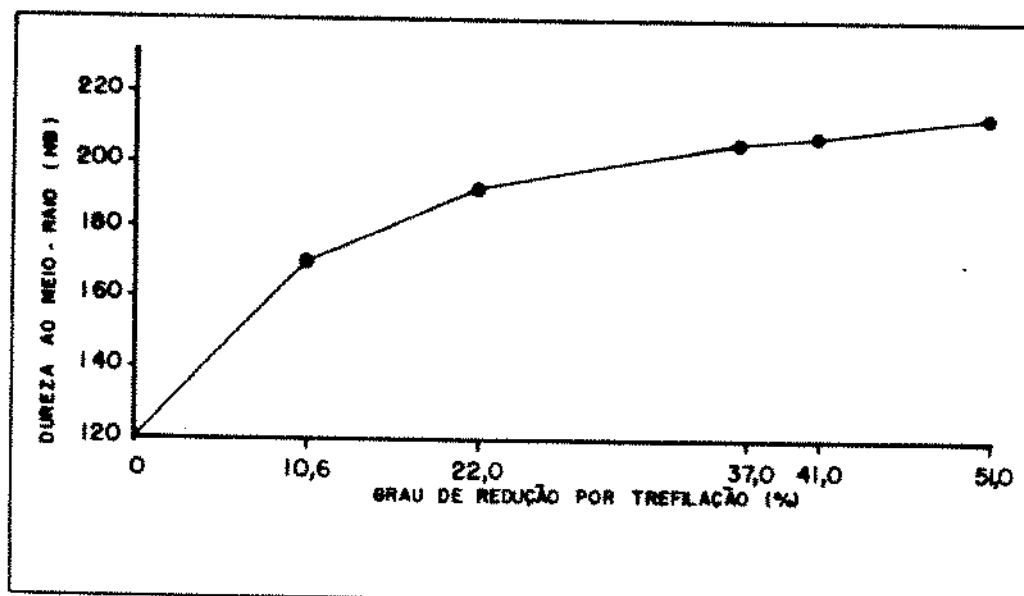


Figura 35. Gráfico da dureza ao meio-raio das amostras de aço SAE 12L14 em função do grau de redução aplicado por trefilação.

é típico dos aços de estrutura basicamente ferrítica em função do seu alto potencial de encruamento inicial.

6.2.2. **Ensaio de tração:** Os ensaios de tração realizados em amostras trefiladas, conforme mostra a figura 36, apresentaram maior grau de encruamento para deformações de até 22%, a exemplo do ocorrido nos ensaios de dureza. A partir deste nível, o incremento de resistência mecânica foi cada vez menor, para o mesmo grau de deformação a frio por trefilação. A queda de ductilidade, apresentou evolução semelhante, conforme mostra a curva de redução de área (RA) versus grau de redução a frio (%), na mesma figura.

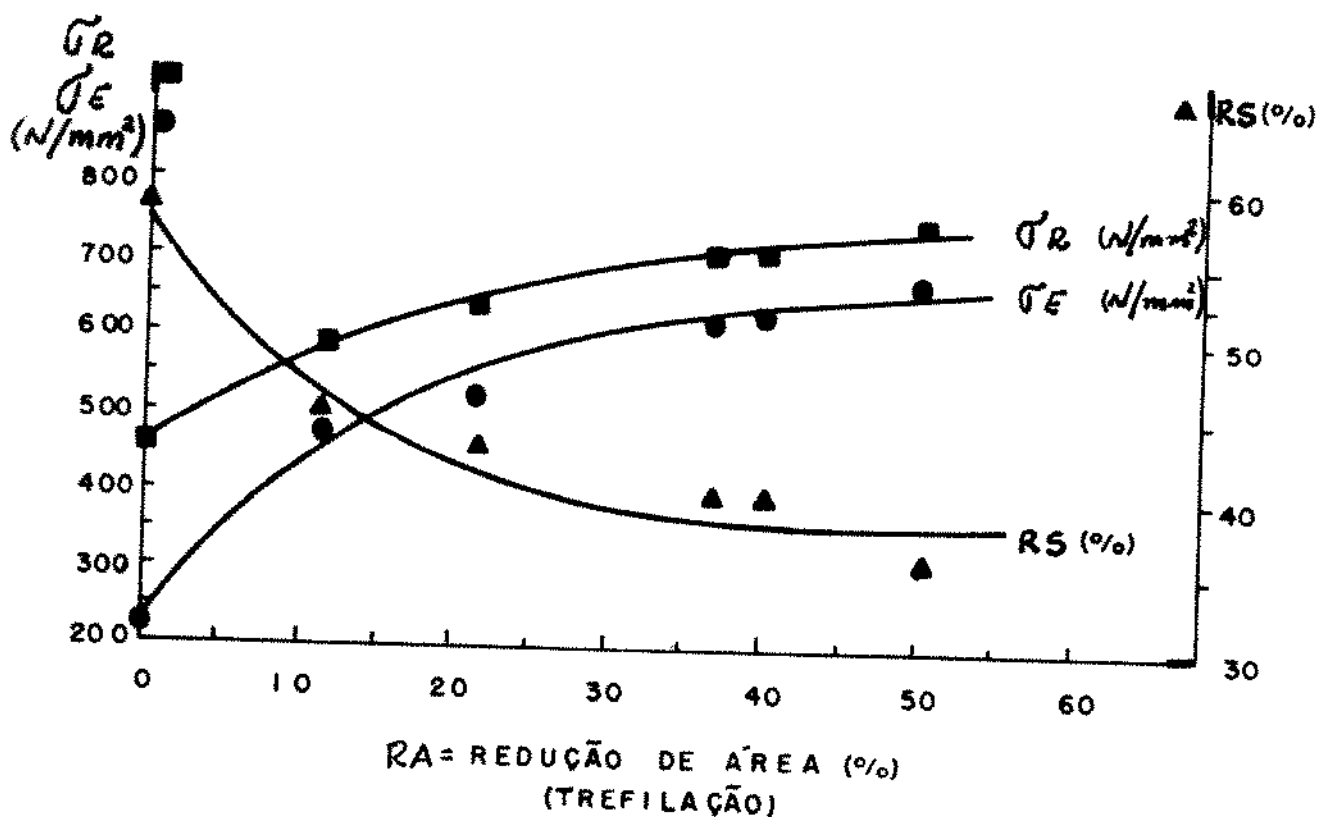


Figura 36. Gráfico de variação das propriedades de tração em função do grau de redução aplicado por trefilação nas amostras de aço SAE 12L14.



### 6.3. Ensaio de Usinabilidade

As tabelas 3 e 4, apresentam os resultados finais dos ensaios de torneamento cilíndrico (9 x 21 = 189 ensaios), realizados em todas as condições propostas, isto é, abrangendo os diferentes graus de redução de área introduzidos por trefilação. Na tabela 3, são mostrados os comprimentos usinados "lf" e "lc" que correspondem à vida da ferramenta para cada ensaio.

Tabela 3. Resultados do percurso usinado nos ensaios

Redução de área	Corpo de prova	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3	
		lf (mm)	lc (mm)	lf (mm)	lc (mm)	lf (mm)	lc (mm)
Bruto	21	24,2	147836	26,6	152626	29,7	157902
	20	18,0	135581	21,7	142935	17,8	135199
	laminado	19	15,8	131232	15,5	126669	16,8
10,6%	18	16,8	131246	24,9	146398	22,4	141600
	17	13,5	125108	13,9	126006	18,8	134990
	16	9,6	117669	13,1	124375	16,0	129798
22,0%	15	22,2	138298	23,8	141108	33,8	158300
	14	19,2	133205	17,1	129584	21,1	136400
	13	16,0	127602	13,1	122592	12,2	121000
37,0%	12	30,0	145824	19,5	129787	28,2	143100
	11	16,0	124512	15,8	124092	22,3	134100
	10	12,7	119399	11,7	117813	14,1	121500
41,0%	09	24,2	135442	19,0	127826	27,0	139500
	08	13,3	119549	14,0	120500	22,0	132200
	07	11,5	116843	10,7	115680	13,0	119000
51,0%	06	24,0	131699	25,2	133234	24,7	132600
	05	16,4	121675	20,2	126759	19,7	126000
	04	15,0	119812	15,2	120073	14,5	119100
Padrão	03	16,5	130610	18,0	133247	17,9	133200
	02	11,5	121262	14,6	127060	14,3	127100
	01	8,4	115580	10,3	119098	10,4	119200
$lc = n_0 \text{ voltas} \times \pi \times d = lf \times (1/0,035) \times \pi \times d$ $"lc = lf \times d \times 89,85"$							

Na tabela 4, são apresentadas as equações de regressão linear para a média de resultados de cada grupo de três ensaios idênticos: o comprimento total usinado correspondente à simulação do ensaio de faceamento de 1000 rotações por minuto e o respectivo índice de usinabilidade que decorre destes resultados em relação à amostra-padrão de aço SAE 1212, cujo índice é de 100%. A média destes três valores define o índice de cada condição das amostras ensaiadas.

Tabela 4 . Índices de usinabilidade a partir das equações de regressão linear

Ensaio	Red. area	Equação de regressão linear	L total (n=1000RPM)	Índice usinabilid.	
1	B.Lam.	C11=18,6-1,17 C12	36972	164,4	
	10,6	C11=20,9-1,56 C12	32983	146,7	
	22,0	C11=16,6-0,89 C12	24932	110,9	
	37,0	C11=26,5-2,36 C12	26841	119,4	
	41,0	C11=24,1-2,04 C12	22207	98,2	
	51,0	C11=19,0-1,29 C12	24077	107,1	
	Padrão	C11=22,8-1,85 C12	22486	100,0	
2	B.Lam.	C11=23,4-1,86 C12	38238	157,0	
	10,6	C11=22,5-1,76 C12	31019	127,4	
	22,0	C11=21,6-1,64 C12	28891	118,7	
	37,0	C11=19,8-1,41 C12	23390	96,2	
	41,0	C11=20,8-1,57 C12	21054	86,5	
	51,0	C11=11,7-1,38 C12	26077	106,9	
	Padrão	C11=20,6-1,52 C12	24348	100,0	Média
3	B.Lam.	C11=21,1-1,52 C12	40141	158,7	160,0
	10,6	C11=16,8-0,91 C12	35820	141,6	138,5
	22,0	C11=29,8-2,80 C12	34827	137,7	122,4
	37,0	C11=23,5-1,90 C12	32054	126,7	114,0
	41,0	C11=24,1-2,00 C12	29272	115,7	100,3
	51,0	C11=20,3-1,46 C12	27299	107,9	107,3
	Padrão	C11=20,5-1,50 C12	25293	100,0	100,0
Obs: C11=log D 0,20 e C12=log n					

O gráfico da figura 37 é um diagrama de barras, que reproduz os índices de usinabilidade para cada grau de redução aplicado às barras de aço SAE 12L14. Os resultados mostram que a melhor condição de usinabilidade foi obtida para o material bruto de laminação, sem qualquer grau de redução.

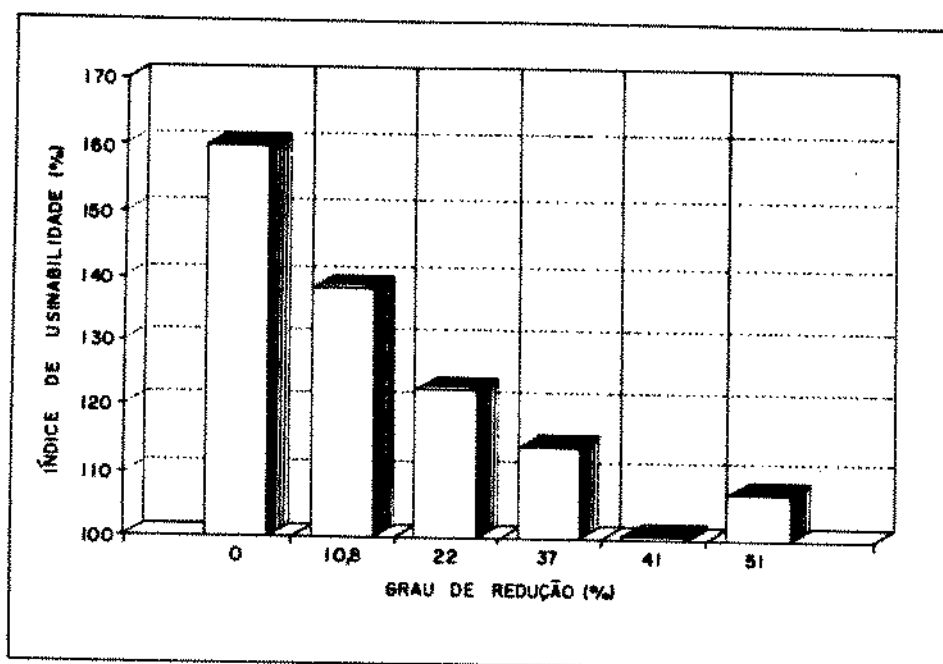


Figura 37. Gráfico de barras dos índices de usinabilidade das amostras de aço SAE 12L14 submetidas a crescentes graus de redução a frio por trefilação e ensaiadas por torneamento cilíndrico.

## CAPITULO 7: DISCUSSAO DOS RESULTADOS

### 7.1. Aspectos da microestrutura e microinclusões

As barras de aço SAE 12L14 utilizadas nos ensaios, apresentaram morfologia e distribuição dos sulfetos e das partículas de chumbo, consideradas adequadas para uma bom desempenho do aço na usinabilidade. A presença de sulfetos de formato espesso e pouco alongado, com distribuição aleatória e o teor de oxigênio final de 0,0165% (165 ppm), indicam que o processo de fabricação do aço na aciaria, atendeu aos requisitos básicos propostos inclusive pela literatura (11,14,15,16).

A microestrutura, com presença de matriz ferrítica e grãos de perlita fina alinhados, é tida como a mais indicada para esta classe de aços (5).

A medida em que as barras foram submetidas a crescentes graus de redução por trefilação a frio, foi notável o efeito do encruamento nas propriedades mecânicas e metalográficas :

- Aumento da dureza (mais acentuado na superfície do que no núcleo)
- Deformação da microestrutura na direção longitudinal
- Encruamento e fragmentação dos sulfetos a partir de 37% de redução por trefilação

Todos estes fatores têm significativa influência na usinabilidade das barras de aço.

## 7.2. Alterações das propriedades mecânicas:

O gráfico de dureza das amostras na secção transversal da figura 34, caracterizou um gradiente de dureza da superfície para o núcleo das amostras, o que implica em alteração de comportamento do material como se formassem "camadas", até atingir o núcleo que se constitui na região de menor dureza.

O ensaio de torneamento cilíndrico portanto, por apresentar a possibilidade de sua realização em diâmetros selecionados e constantes, mostra-se como uma forma muito especial de caracterização da usinabilidade de barras trefiladas, embora tal avaliação não tenha sido alvo deste trabalho.

Com relação à dureza das microinclusões de sulfeto, através de medidas realizadas em microdurômetro, verificou-se que os valores obtidos nas barras iniciais estão abaixo daqueles obtidos nas barras que sofreram deformação a frio. Este resultado apresenta como consequência a fragmentação e um perceptível alongamento nas microinclusões que sofreram maiores níveis de deformação. Este comportamento também é considerado fator importante no resultado da usinabilidade do material, conforme mencionado por Kovash (11) e por Tipnis e Cook (17).

## 7.3. Resultados dos ensaios de torneamento cilíndrico:

Os ensaios de torneamento cilíndrico foram realizados conforme proposto, com os parâmetros de velocidade de corte inicial e aceleração, numa reprodução dos ensaios de faceamento de Mathon. Graças ao desenvolvimento do programa CNC, a transferência de

acréscimos de velocidade foram de tal forma aplicados, que o movimento da ferramenta se tornou muito semelhante à operação de faceamento.

As medidas do comprimento usinado, foram bem definidas nos ensaios, uma vez que as falhas das ferramentas foram instantâneas e completa provocando inclusive na maioria dos casos, o surgimento de fagulhas na queima.

Os gráficos obtidas através das equações de regressão linear, apresentaram uma boa precisão dos resultados, onde constatou-se que em geral os coeficientes de correlação estão acima de 93,6%. Em alguns ensaios isolados, estes coeficientes chegaram ao mínimo entre 82,5 e 88,8%. Estes valores de "lc e n" se relacionam conforme a equação de vida de ferramenta de Taylor, caracterizando uma reta de fatores logarítmicos:

$$K = lc_{0,20} \cdot n^m \quad \text{ou,} \quad \log K = \log lc_{0,20} + m \cdot \log n$$

onde,

- "lc 0,20" = comprimento total usinado até a medida de desgaste de 0,20 mm da ferramenta.

- "m" = coeficiente angular da reta em coordenadas dilogarítmicas.

- "n" = velocidade de rotação de referência do ensaio de faceamento.

- "K" = constante.

Esta equação portanto, ficou bem estabelecida após a aplicação da regressão linear dos logaritmos de "lc e n". A determinação dos parâmetros "m" e "n", não foi realizada por não ser objetivo deste trabalho.

#### 7.4 Influência do grau de encruamento na usinabilidade:

Embora o resultado esperado nos ensaios, fosse de melhoria da usinabilidade para as amostras trefiladas, conforme estabelecem alguns autores (24,27), é necessário considerar dois fatores que decorrem desta operação no material:

1g. A presença das microinclusões de sulfeto de manganês, altera radicalmente o comportamento do aço na usinabilidade, uma vez que estas por si só, introduzem um efeito mais representativo que as variações de ordem microestrutural do material (24,27,37).

O sulfeto de manganês é uma inclusão que provoca o aumento do ângulo de cisalhamento do cavaco, tornando-o curto e quebradiço. Com a aplicação do encruamento por trefilação, ocorre o aumento da dureza destas microinclusões, até torná-las frágeis e quebradiças. Este aumento de dureza, conforme Tipnis e Cook (17) provoca uma queda no índice de usinabilidade do material.

2g. O encruamento da microestrutura, provoca o aumento da dureza do material, o que também promove a queda na vida da ferramenta (5,27). Quanto maior a dureza do aço, maior é o desgaste e tendência ao lascamento da ferramenta, em função do aumento do atrito entre esta e a peça (6,7,8).

Portanto, se por um lado, esperava-se que houvesse um grau

adequado de redução por trefilação, onde o efeito benéfico provocado pelo encruamento da microestrutura, provocasse maior fragilidade do material e conseqüente melhoria da usinabilidade por facilidade de arrancamento de cavaco, por outro lado, verificou-se que a dureza de partida do material bruto de laminação, já se encontra num valor tal que a qualquer aumento só vai prejudicar a usinabilidade. Este efeito já foi previsto por Blank e colaboradores (7) e está mostrado na figura 2. A este fator negativo, somam-se ainda as alterações verificadas nos sulfetos e já comentadas.

#### **7.5. O processo industrial:**

Na prática industrial o que ocorre, é que para a produção de barras trefiladas, raramente o grau de encruamento aplicado ultrapassa a um passe de calibração, com reduções da ordem de 15%, uma vez que um processo devidamente planejado prevê bitolas bem próximas de laminação a quente. No entanto, nos casos de aproveitamento de material de estoque, ou na produção de arames de bitolas muito finas, eventualmente os índices de redução a frio podem alcançar valores bem maiores e nestes casos os parâmetros de processo serão semelhantes aos estudados. Os resultados dos ensaios realizados mostraram portanto, que para manter o bom desempenho do material após a trefilação, o processo deve prever um tratamento térmico para recuperação da microestrutura e dureza. Com relação ao efeito da fratura dos sulfetos no produto final, mesmo após recuperada a microestrutura, não se tem garantias ou sequer algum resultado avaliado para certificação da melhoria da usinabilidade do material.



## CAPITULO 8: CONCLUSOES

Os resultados obtidos nos ensaios de torneamento cilíndrico, realizados em barras trefiladas de aço SAE 12L14, mostraram que:

8.1. O ensaio desenvolvido, apresentou-se como um método rápido e confiável na caracterização da usinabilidade de barras de aço de pequenos diâmetros (avaliou-se desde 16,70 mm). O ensaio possibilita ainda, caracterizar a propriedade por camadas, ou seja, a diferentes distâncias da superfície, o que permite ensaiar barras trefiladas que apresentam um perfil variável de dureza na secção transversal.

8.2. A usinabilidade do aço SAE 12L14, avaliada através de ensaio de vida de ferramenta, sendo esta de aço alto-carbono SAE 52100, apresentou máximo desempenho para a condição de microestrutura bruta de laminação e dureza de 120 HB, portanto sem nenhum grau de redução a frio

8.3. A justificativa mais provável para o comportamento do material, com a queda da usinabilidade, sempre que aplicada a redução de área por trefilação, está na preponderante influência da dureza da microestrutura na vida da ferramenta, e na alteração das características de ductilidade e morfologia das microinclusões de sulfeto de manganês que atuam sobre o mecanismo de formação do cavaco. Na medida em que o sulfeto se tornou mais duro e frágil, sua atuação como uma inclusão dútil, que aumenta o ângulo de cisalhamento do cavaco, deixou de ser eficaz como supostamente agia na condição inicial.

utilização de barras trefiladas, por provocar efeitos metalúrgicos negativos à usinabilidade, sob o ponto-de vista mecânico, isto é, fatores referentes à precisão dimensional, economia no sobremetal e ausência de carepa abrasiva, influenciam beneficemente na aplicação do processo em escala industrial. Neste caso, tanto melhor será o comportamento do material, quanto menor for o grau de redução em área (encruamento e dureza) aplicado às barras.

### SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Assim como, durante a realização deste trabalho, muitos resultados foram obtidos inesperadamente, e somente com um estudo mais profundo da influência dos parâmetros metalúrgicos puderam ser explicados, também outros assuntos tiveram de deixar de ser abordados, uma vez que fugiam da abrangência deste trabalho.

Estes assuntos se tornaram nossas sugestões para futuros trabalhos:

- Avaliar o desempenho deste mesmo aço, em ensaios similares ao desenvolvido neste trabalho, porém, para outros materiais de ferramentas que sejam comumente utilizados na usinagem de barras trefiladas.
- Aplicar os ensaios desenvolvidos para caracterização de vários aços da linha de usinabilidade melhorada, em diferentes condições de dureza, microestrutura e presença das microinclusões.
- Avaliar a influência sobre a usinabilidade, da aplicação de encruamento por trefilação e em seguida um tratamento térmico adequado

para recuperação da microestrutura.

- Avaliar a influência da presença de microinclusões que sofreram fratura e fragmentação durante a trefilação, e foram posteriormente submetidas a um tratamento de recuperação da microestrutura do aço. Verificar o efeito deste tratamento na modificação da morfologia dos sulfetos de manganês.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) Norma AFNOR A03-654, Méthodes de Contrôle de l'Usinabilité par Tournage des Aciers Destinés au Décolletage et des Aciers de Construction a l'Aide d'Outils en Acier Rapide. Juin, 1981.
- (2) Ferraresi D., Fundamentos da Usinagem dos metais, Editora Edgard Blücher, Sao Paulo 1970.
- (3) Datsko J., "Machinability, Materials Properties and Manufacturing Process", John Wiley & Sons, p. 444.
- (4) Metcut Research Association, Machining Databook, 2nd. Edition, Machinability Datacenter, Cincinnati, Ohio, 1979, USA.
- (5) Chiaverini V., Tecnologia Mecânica, V. II, Materiais de Construção Mecânica, Editora Mc. Graw Hill do Brasil, 1978.
- (6) Micheletti G. F., Work on Machinability in the Cooperative Group C of C.I.R.P. and outside this group, Annals of the C.I.R.P. V. XVIII, Great Britain 1970.
- (7) Blank J. R., Naylor D. J., Wannell P.H., Improved and More Consistent Steel for Machining, Int. Symposium on Influence of Metallurgie on Machinability of Steel, Tokio 1977, p. 397-419.

- (8) Koyanagi A., Sakajo T., Influence of microstructure and free-machining Additives on Machinability of High Carbon-Chromium Bearing Steel, Int. Symposium on Influence of metallurgie on Machinability of Steel, Tokio 1977, p. 275-287.
- (9) Nagai D., Kaneda T., Furusawa S., Takeshita H., Yamamoto Y., Machinability of Low Carbon Resulphurized Free-cutting Steels on an Automatic-Screw-Machine, Int. Symposium on Influence of Metallurgie on Machinability of Steel, Tokio 1977, p.57-65.
- (10) Sata T., Murata R., Akasawa T., Review of Recent Research and Development on Machinability of Steel in Japan, Int. Symposium on Influence of Metallurgie on Machinability of Steel, Tokio 1977, p. 357-369.
- (11) Kovash C. W., Ekenrod J.J., Studies on sulfide inclusions on machinability of steels, 13th. Mechanical Working and Steel Processing Conference, AIME, New York, 1971, p. 300-331.
- (12) Van Vlack, L. H., Correlation of machinability and inclusions characteristics in resulfurized steels, Transaction of AMS, Volume 45, 1953, p. 741-757 .
- (13) Sims C. E., Transaction of TMS-AIME, Volume 215, 1959, p. 367-393

- (14) Yeo R. B. G., The effect of oxygen in Resulfurized steels- Part 1, Journal of Metals, Volume 19, No 6, 1967, p.29-32.
- (15) Opitz H., Konig W., Machinability, Iron Steel Institute Special Report 94, Grosvenor Press, Portsmouth, 1967, p.35-42.
- (16) Gaydos R., Free Machining Steel and the Effect of Sulfide and Siliceous Nonmetalics, Journal of Metals, 16, 22, 1964, 972-977.
- (17) Tipnis V. A., Cook N.H., Machinability of Resulfurized Steels, Proceedings of 8th Mechanical Working and Steel Processing Conference, AIME, New York, 1969, p. 285-308.
- (18) Trent E. M., Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools-part II, Journal of Iron and Steel Institute, 201, 1963, 923-932.
- (19) Trent E. M., Cutting Steel and Iron with Cemented Carbide Tools-part III, Journal of Iron and Steel Institute, 201, 63, 1001-1015.
- (20) Naylor J.P., Les Aciers à Usinabilité Améliorée: Relations microstructure-propriétés d'emploi, Traitement Thermique, Volume 188, No 84, p. 35-37.
- (21) Bellot J., Machinables Matériaux, Matériaux et Techniques, Aout-Septembre 1981, p. 241-254.
- (22) Fombalert J., Machine-Outil No 316, Février 1975, p. 81-135.

- (23) Yagushi H., Effect of soft additives (Pb/Bi) on Machinability of Low Carbon Resulphurised free machining Steels, Materials Science and Technology, March 1989, Vol 5, p. 255-267.
- (24) Bhattacherya D., Machinability of Steel, Journal of Metals, March 1987, p. 32-35.
- (25) Koyanagi A. Morphologie des nclusions non métallique et usinabilité de l'acier désoxidé au calcium, Tetsuo to Hanage, Nov. 1971, Volume 57, ng 13, p. 2128-2140.
- (26) Hilty D. C., Mechanisms and Modification of Inclusion Formation in Steel, Int. Symposium on Influence of Metallurgie on Machinability of Steel, Tokio 1977, p. 199-230.
- (27) Itoh T., Abeyama S., Kimura A., Nakamura S., Influence of Cold Working on Machinability, Int. Symposium on Influence of Metallurgie on Machinability of Steel, Tokio 1977, p. 313-322.
- (28) Shaw M. C., Cook N. H., Smith P. A., Transaction of ASME, ser. B, Volume 81, 1961, p. 163-174.
- (29) Takahashi K., Nakashima K., Kikuma T., Seitetsu KenkYu, Ng 254, 1966, p. 6376-6395.

(30) Yamamoto T., Kumagai K., Effects of Heat-treated Structures and Cold Working on Machinability of Chromium Case-Hardening Steel in comparison with Other Carbon and Low Alloy Steels, Transaction ISIJ, Vol 15, 1975, p.345-351.

(31) The Making Shaping and Treating of Steel, Publ. Association of Iron and Steel Engineers, 10th. Edition 1985, Chapter 52- Machinability of Carbon and Alloy Steels, p.1465-1488.

(32) Backer L., Main Physical Properties of Leaded High Grade Carbon and Low-Alloy Steels Produced in a continuous Casting Facility, Int. Symposium on Influence of Metallurgie on Machinability of Steel, Tokio 1977, p. 27-40.

(33) Silveira J., Tese de Mestrado, Influência de Fatores Metalúrgicos na Usinabilidade de Ferros Fundidos FE 6002, FE4212 e FGR5; cação FEC 01/83, Unicamp.

(34) Mathon R., Greciet M. Usinage des Fontes et alliages: Quels Critères retenir?, Hommes et Fonderie, Jun-Jul 1976, p. 9-17.

(35) Slatineanu L., Gramescu T., Coman G., Pruteanu, Variante de la Méthode Renault-Mathon pour l'évaluation de l'usinabilité, Revue de Métallurgie-CIT, Février 1984, p. 161-165.

(36) Ortiz M., Jourdan G., Guimier A., Apréciation de l'usinabilité à l'aide d'un essai de chariotage accéléré, Mémoires et Etudes Scientifiques Revue de Métallurgie, Décembre 1986, p.643-648.



(37) Wise M. L.H., Milovic R., Ranges of Application of Free-Cutting Steel and Recommended Tool Materials, Materials Science and Technology, October 1988, Volume 4, p. 933-943.

## APENDICE

CURVAS E EQUAÇÕES DE REGRESSÃO LINEAR  
PARA TODAS AS AMOSTRAS ENSAIADAS

REALIZADAS CONFORME O SOFTWARE "MINITAB"

### LEGENDA

\*-----\*

| C1 = lc = percurso de corte  
| C2 = n = rotação correspondente  
|            ao ensaio de faceamento  
| C11 = log lc  
| C12 = log n  
| C4 = log lc corrigido pela regressão  
|        linear  
\*-----\*

```

MTB > read c1 c2
DATA> 47836 833
DATA> 35581 1000
DATA> 31232 1200
DATA> end
      3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

E! - B.L.

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB >
MTB > log c2 c12
MTB >
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 18.6 - 1.17 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	18.603	1.804	10.31
C12	-1.1681	0.2612	-4.47

S = 0.06741

R-SQUARED = 95.2 PERCENT  
R-SQUARED = 90.5 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

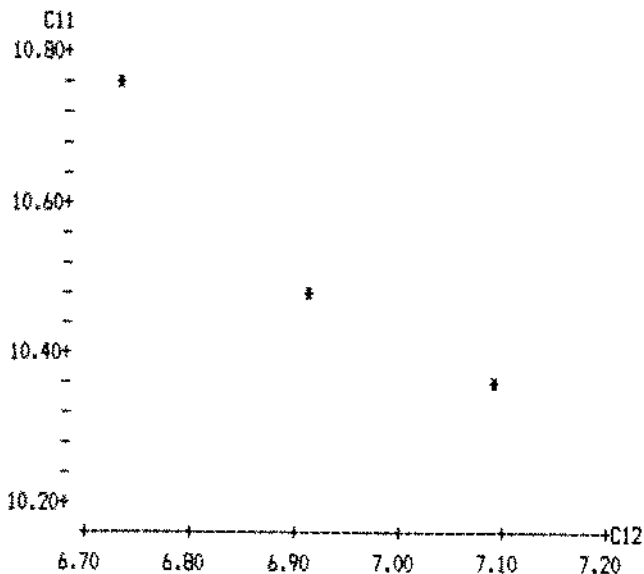
DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.090907	0.090907
RESIDUAL	1	0.004545	0.004545
TOTAL	2	0.095451	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

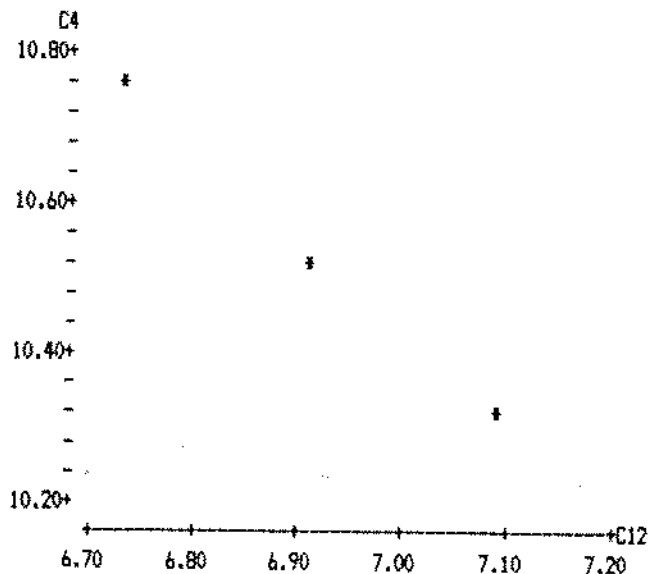
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > plot c11 c12



plot c4 c12



E 1 - 10,6

MTB > read c1 c2  
DATA> 31246 833  
DATA> 25108 1000  
DATA> 17669 1200  
DATA> end  
3 ROWS READ  
MTB > log c1 c11

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>  
MTB > log c2 c12

MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 20.9 - 1.56 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. DF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	20.873	1.457	14.33
C12	-1.5615	0.2108	-7.41

S = 0.05442

R-SQUARED = 98.2 PERCENT

R-SQUARED = 96.4 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

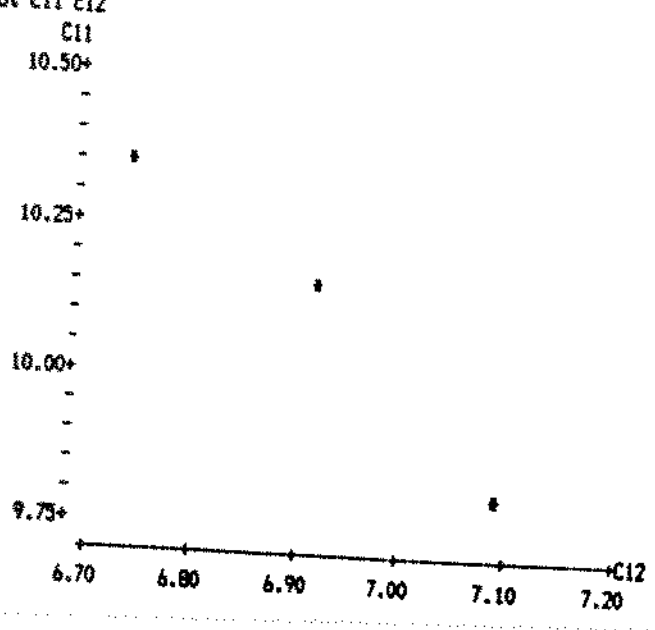
DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.16247	0.16247
RESIDUAL	1	0.00296	0.00296
TOTAL	2	0.16543	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

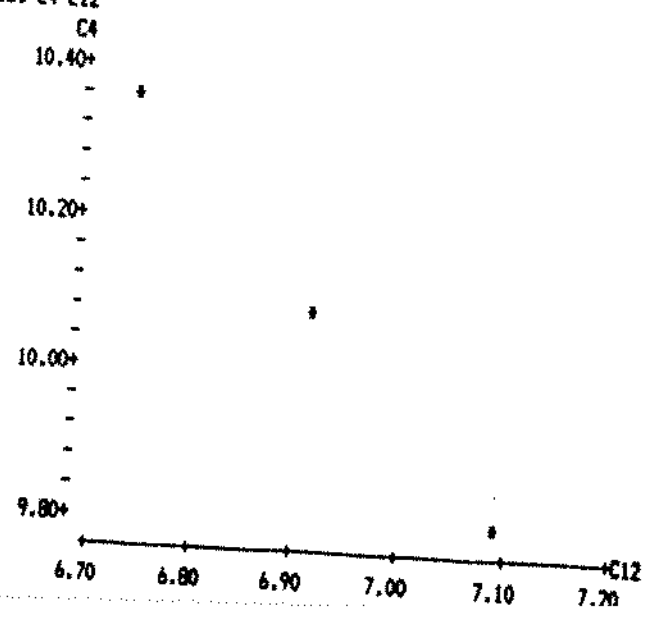
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > plot c11 c12



plot c4 c12



E! 22,00%

MTB > read c1 c2  
DATA> 38298 833  
DATA> 33295 1000  
DATA> 27602 1200  
DATA> end  
3 ROWS READ  
MTB > log c1 c11

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>  
MTB > log c2 c12  
MTB >

MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 16.6 - 0.897 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	16.5944	0.5233	31.71
C12	-0.89713	0.07574	-11.85

S = 0.01955

R-SQUARED = 99.3 PERCENT

R-SQUARED = 98.6 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

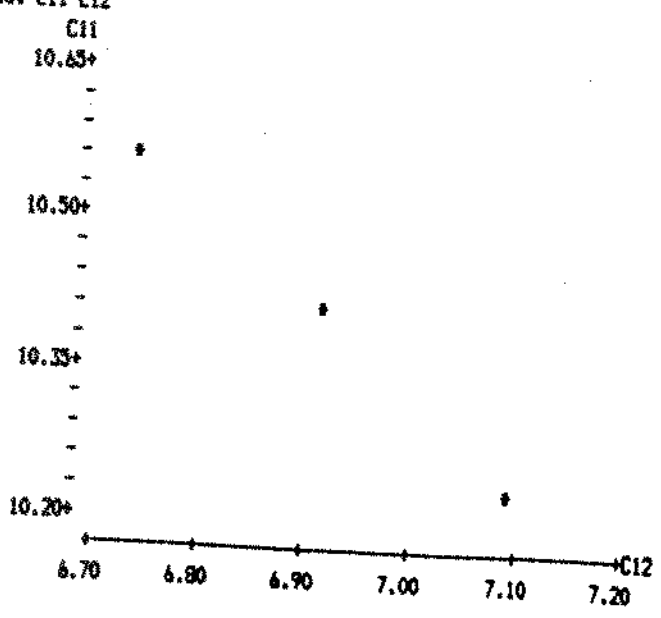
DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.053626	0.053626
RESIDUAL	1	0.000382	0.000382
TOTAL	2	0.054008	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

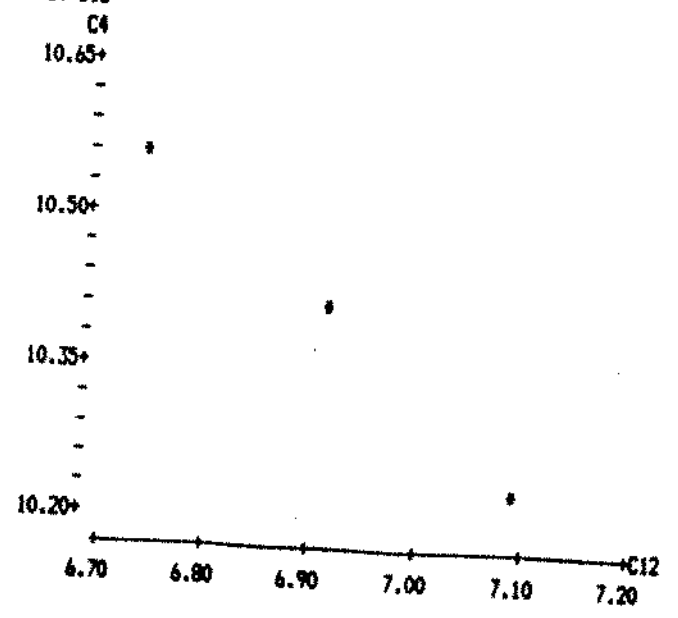
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > plot c11 c12



plot c4 c12



```

MTB > read c1 c2
DATA> 45824 833
DATA> 24512 1000
DATA> 19399 1200
DATA> end
      3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

EL-37%

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB >
MTB > log c2 c12
MTB >
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 26.9 - 2.36 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	26.906	4.270	6.21
C12	-2.3551	0.6180	-3.81

S = 0.1595

R-SQUARED = 93.6 PERCENT

R-SQUARED = 87.1 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.36957	0.36957
RESIDUAL	1	0.02545	0.02545
TOTAL	2	0.39502	

URBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

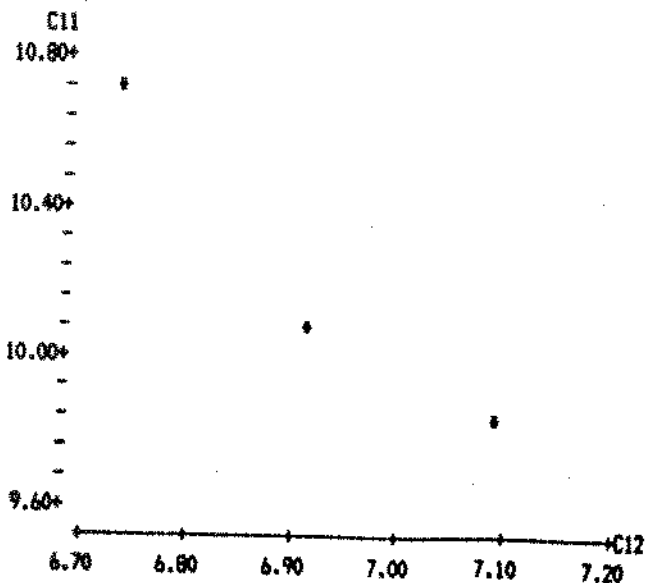
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB > plot c11 c12

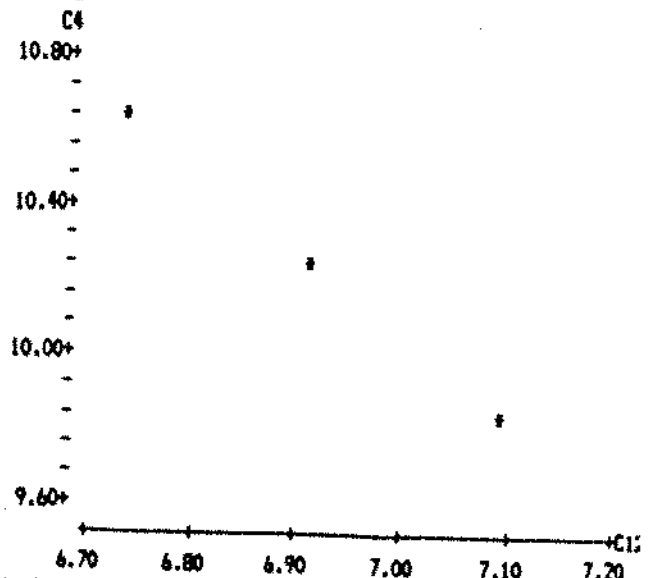
```



```

plot c4 c12

```



```

MTB > read c1 c2
DATA> 33442 833
DATA> 19549 1000
DATA> 16843 1200
DATA> end
3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

E1-41%

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.DVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.DVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB > log c2 c12
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.DVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 24.1 - 2.04 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	24.110	4.865	4.96
C12	-2.0385	0.7041	-2.90

S = 0.1817

R-SQUARED = 89.3 PERCENT

R-SQUARED = 78.7 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.27686	0.27686
RESIDUAL	1	0.03303	0.03303
TOTAL	2	0.30989	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

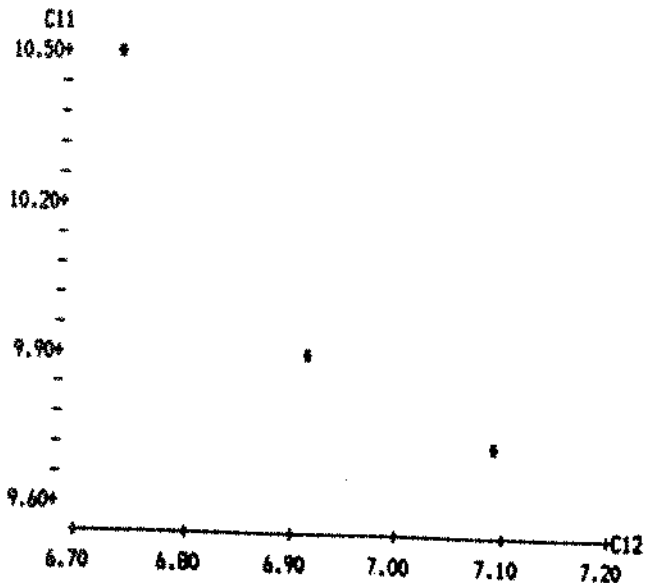
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.DVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB > plot c11 c12

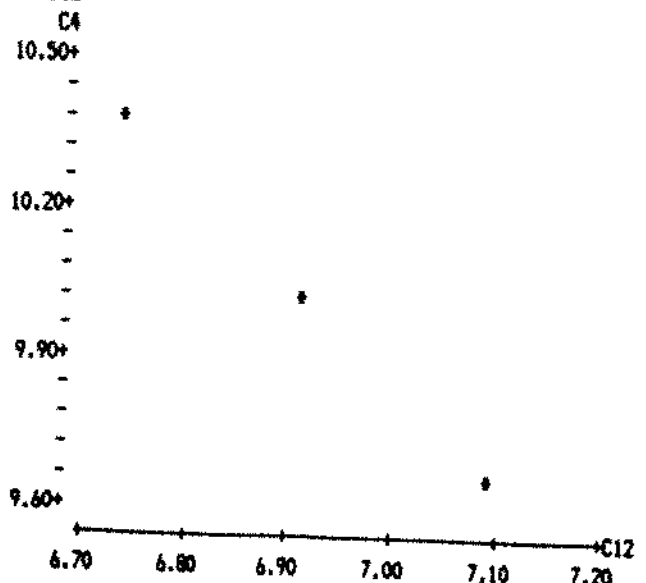
```



```

plot c4 c12

```



```

MTB > read c1 c2
DATA: 31699 833
DATA: 21675 1000
DATA: 19812 1200
DATA: end
      J ROMS READ
MTB > log c1 c11

```

E1-51%

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB >
MTB > log c2 c12
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 19.0 - 1.29 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	18.976	3.166	5.99
C12	-1.2878	0.4583	-2.81

S = 0.1183

R-SQUARED = 98.8 PERCENT  
R-SQUARED = 77.5 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

SOURCE	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.11050	0.11050
RESIDUAL	1	0.01399	0.01399
TOTAL	2	0.12449	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

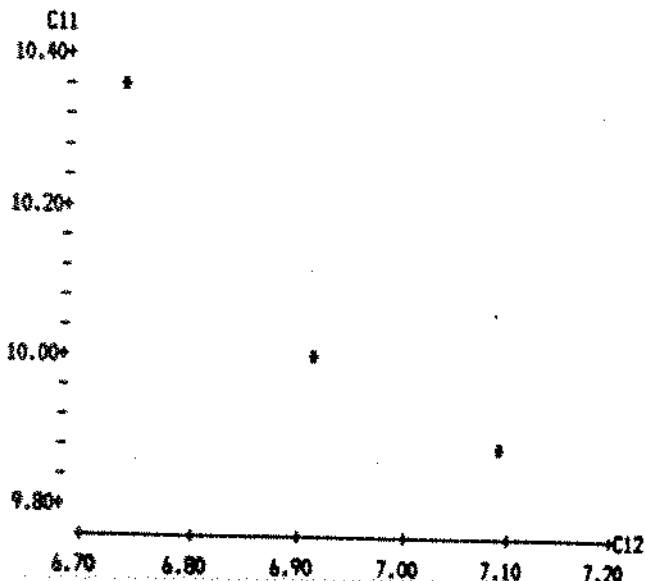
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB > plot c11 c12

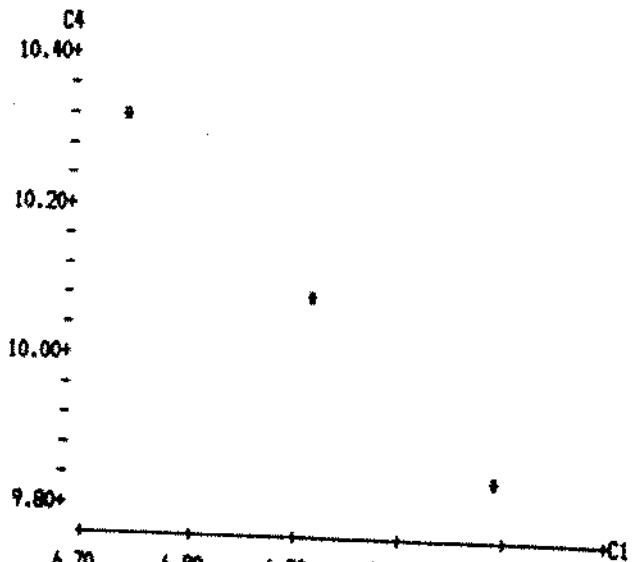
```



```

plot c4 c12

```





DATA> 30610 833  
 DATA> 21262 1000  
 DATA> 15580 1200  
 DATA> end  
 3 ROWS READ

E1. PADRÃO

MTB > log c1 c11  
 \*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB >  
 MTB > log c2 c12  
 MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 22.8 - 1.85 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	22.7621	0.5762	39.50
C12	-1.85008	0.08340	-22.18

S = 0.02153

R-SQUARED = 99.8 PERCENT  
 R-SQUARED = 99.6 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

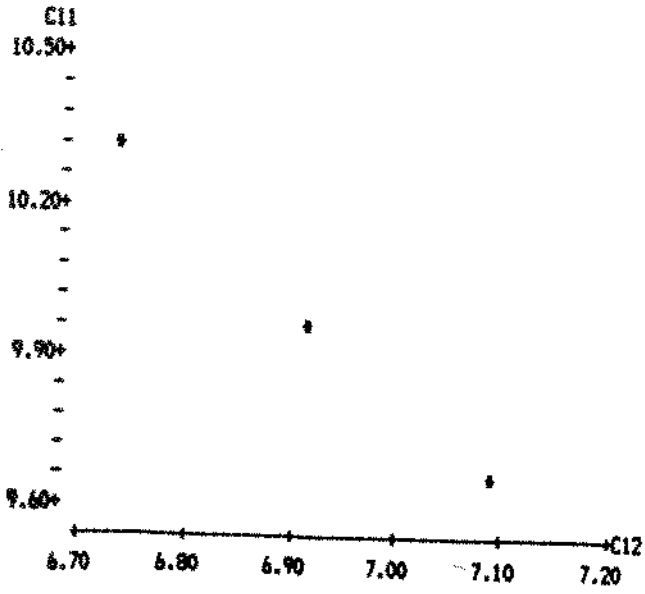
DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.22805	0.22805
RESIDUAL	1	0.00046	0.00046
TOTAL	2	0.22852	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

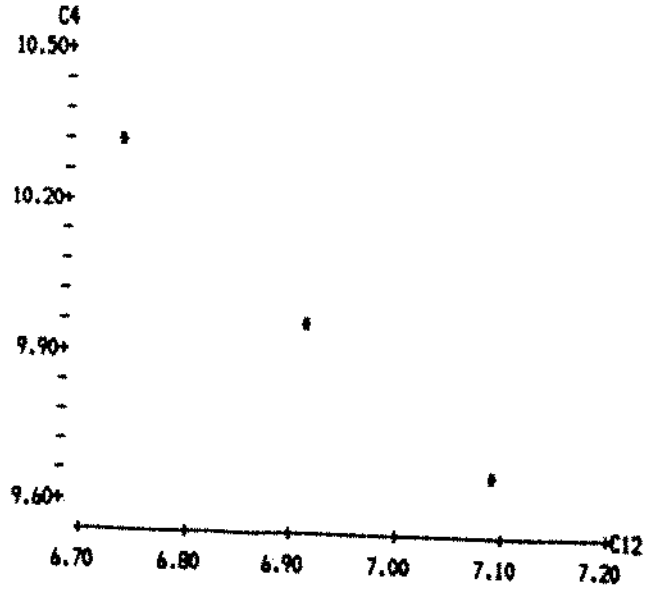
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
 Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > plot c11 c12



plot c4 c12



```

MTB > read c1 c2
DATA> 52626 833
DATA> 42935 1000
DATA> 26669 1200
DATA> end
3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

E 2 - B. 2

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB > log c2 c12
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 23.4 - 1.86 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	23.437	2.988	7.84
C12	-1.8617	0.4324	-4.31

S = 0.1116

R-SQUARED = 94.9 PERCENT

R-SQUARED = 89.8 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.23093	0.23093
RESIDUAL	1	0.01246	0.01246
TOTAL	2	0.24339	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

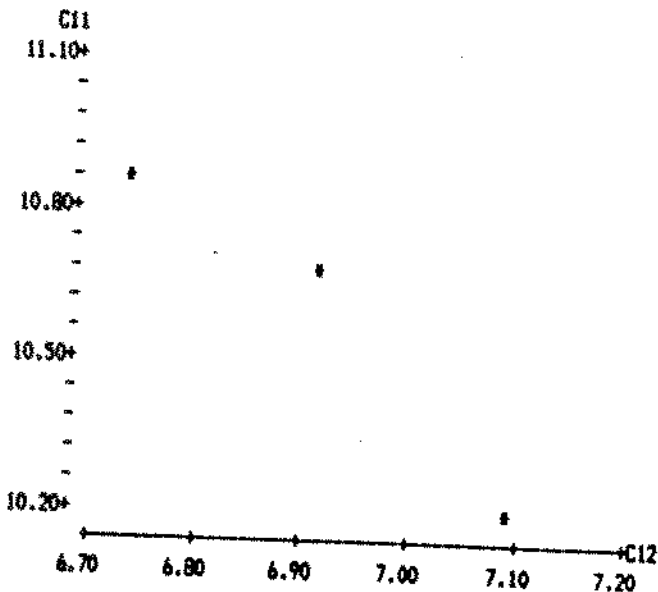
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB > plot c11 c12

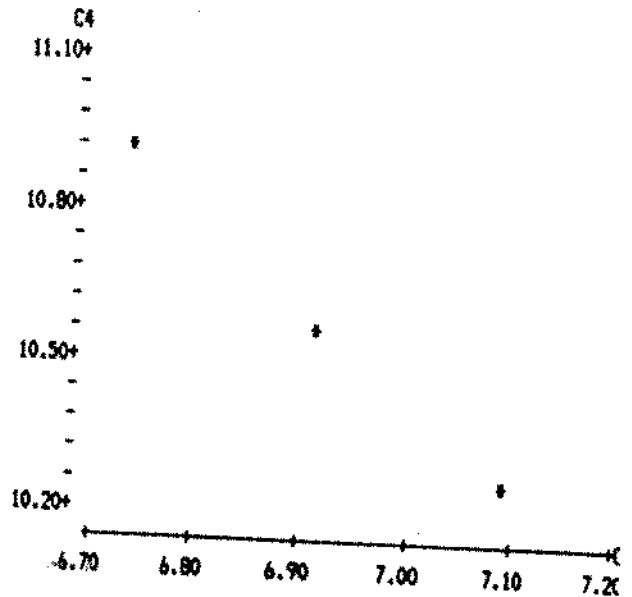
```



```

plot c4 c12

```



```

MTB > read c1 c2
DATA: 46398 833
DATA: 26006 1000
DATA: 24375 1200
DATA> end
      3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

*EZ - 10.6%*

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find MTABE_B1.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find MTABE_A.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>
MTB > log c2 c12

```

```

MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find MTABE_B1.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

$C11 = 22.5 - 1.76 C12$

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	22.522	5.611	4.01
C12	-1.7639	0.8121	-2.17

S = 0.2096

R-SQUARED = 82.5 PERCENT

R-SQUARED = 65.0 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.20729	0.20729
RESIDUAL	1	0.04394	0.04394
TOTAL	2	0.25123	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find MTABE_A.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

```

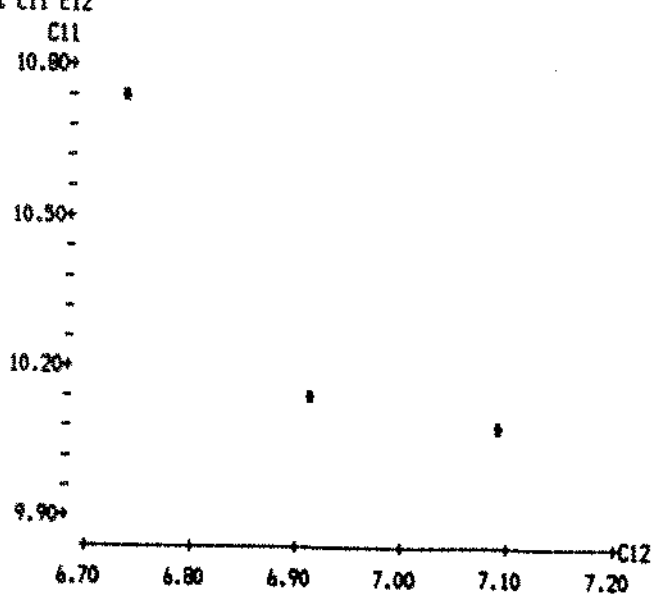
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

```

MTB > plot c11 c12

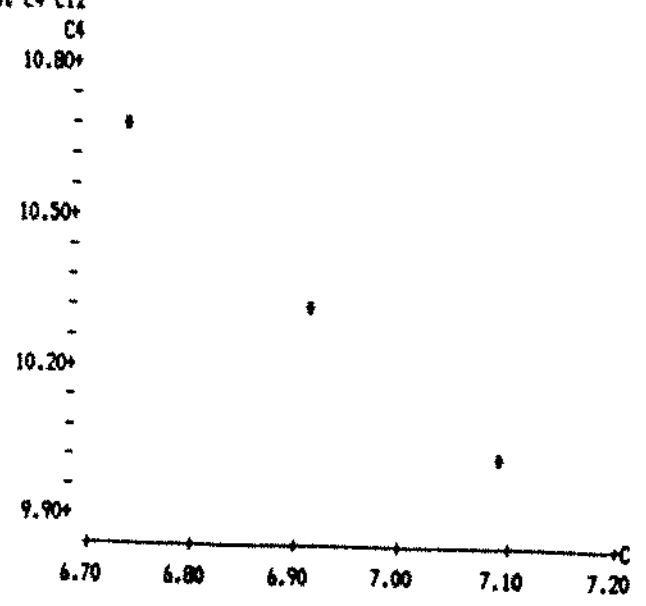
```



```

plot c4 c12

```



```

MTB > read c1 c2
DATA> 41108 833
DATA> 29584 1000
DATA> 22592 1200
DATA> end
      3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

E2 - 22%

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.DVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.DVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

C11 = 21.6 - 1.64 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	21.6424	0.6412	33.75
C12	-1.63988	0.09280	-17.67

S = 0.02395

R-SQUARED = 99.7 PERCENT

R-SQUARED = 99.4 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.17918	0.17918
RESIDUAL	1	0.00057	0.00057
TOTAL	2	0.17975	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

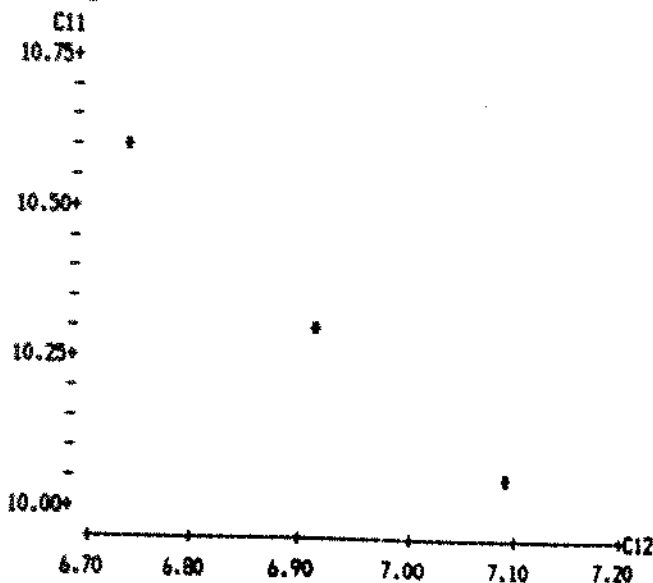
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.DVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB > plot c11 c12

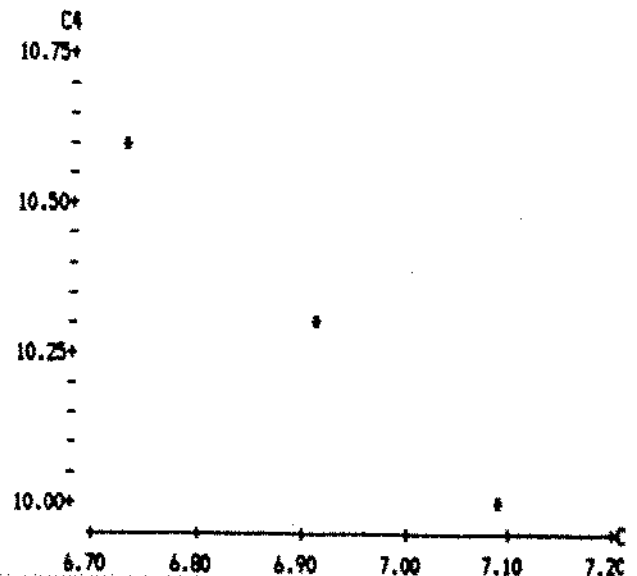
```



```

plot c4 c12

```



E2 - 37%

MTB > read c1 c2  
DATA> 29787 833  
DATA> 24092 1000  
DATA> 17813 1200  
DATA> end  
3 ROWS READ  
MTB > log c1 c11

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > log c2 c12  
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 19.8 - 1.41 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	19.7881	0.9870	20.05
C12	-1.4084	0.1429	-9.86

S = 0.03687

R-SQUARED = 99.0 PERCENT

R-SQUARED = 98.0 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

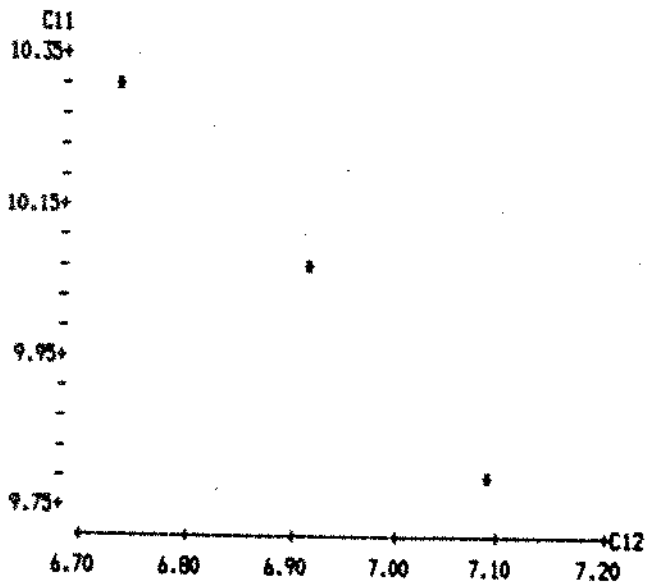
DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.13216	0.13216
RESIDUAL	1	0.00136	0.00136
TOTAL	2	0.13351	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

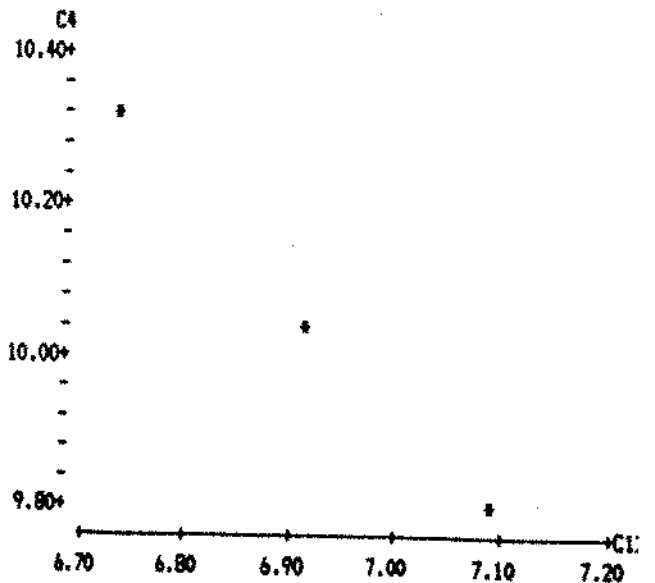
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > plot c11 c12



plot c4 c12



E2-41%

MTB >  
MTB > read c1 c2  
DATA> 27826 833  
DATA> 20500 1000  
DATA> 15680 1200  
DATA> end  
3 ROWS READ  
MTB > log c1 c11

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > log c2 c12  
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

C11 = 20.8 - 1.57 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	20.7948	0.4030	51.60
C12	-1.57132	0.05833	-26.94

S = 0.01506

R-SQUARED = 99.9 PERCENT

R-SQUARED = 99.7 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

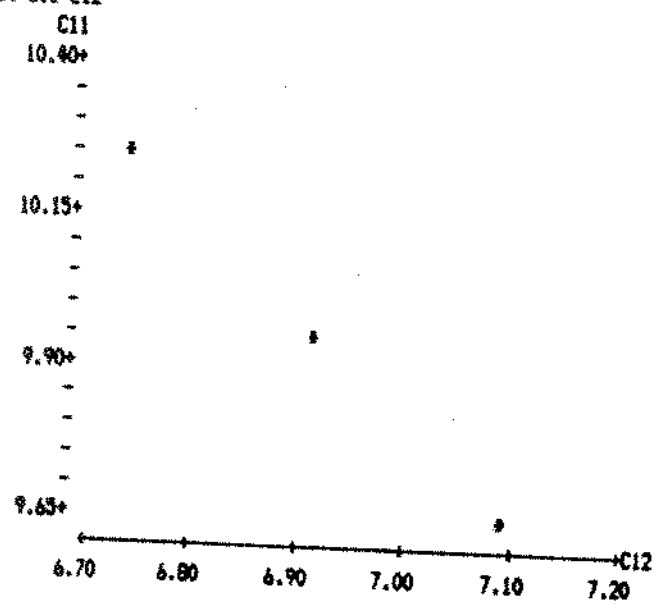
ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.16451	0.16451
RESIDUAL	1	0.00023	0.00023
TOTAL	2	0.16473	

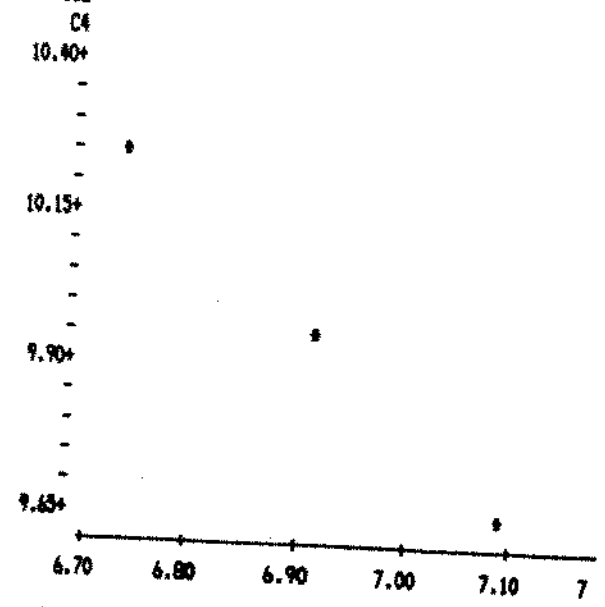
DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > plot c11 c12



plot c4 c12



```

MTB > read c1 c2
DATA> 33234 833
DATA> 26759 1000
DATA> 20073 1200
DATA> end
      3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

E2-51%

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

MTB > log c2 c12
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

:11 = 19.7 - 1.38 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	19.7113	0.7796	25.28
12	-1.3811	0.1128	-12.24

\* = 0.02913

-SQUARED = 99.3 PERCENT

-SQUARED = 98.7 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.12709	0.12709
RESIDUAL	1	0.00085	0.00085
TOTAL	2	0.12794	

COBBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

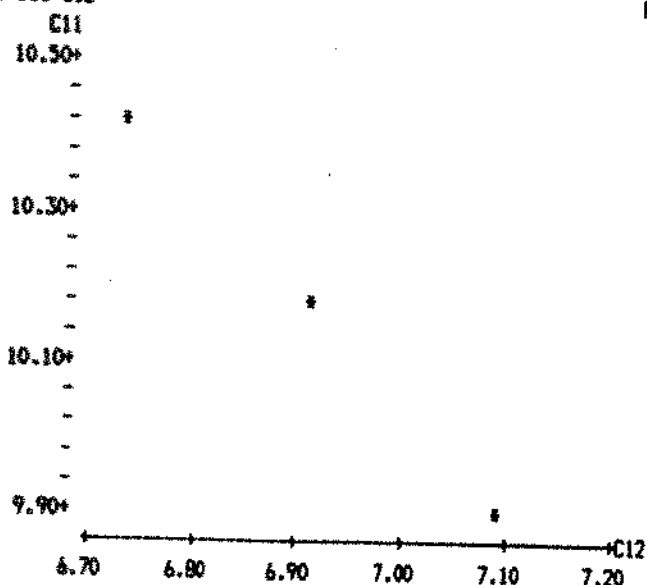
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

B > plot c11 c12

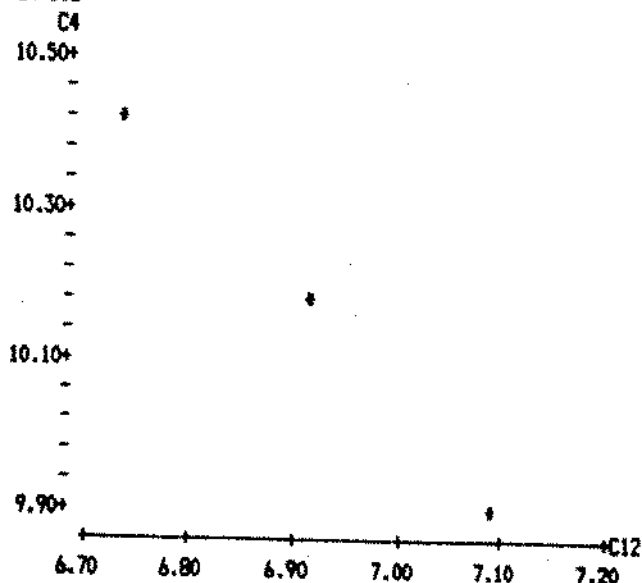
```



```

plot c4 c12^2

```



```

MTB > read c1 c2
DATA> 33247 833
DATA> 27060 1000
DATA> 19098 1200
DATA> end
      3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

E 2 - PADRAO

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find MTABE_B1.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find MTABE_A.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

```

MTB > log c2 c12
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find MTABE_B1.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

C11 = 20.6 - 1.52 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	20.648	1.565	13.20
C12	-1.5185	0.2264	-6.71

S = 0.05845

R-SQUARED = 97.8 PERCENT

R-SQUARED = 95.6 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.15364	0.15364
RESIDUAL	1	0.00342	0.00342
TOTAL	2	0.15706	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find MTABE_A.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

```

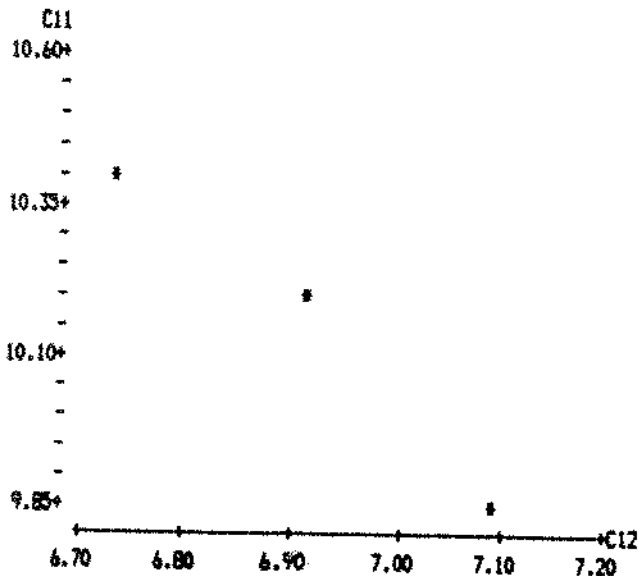
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

```

MTB > plot c11 c12

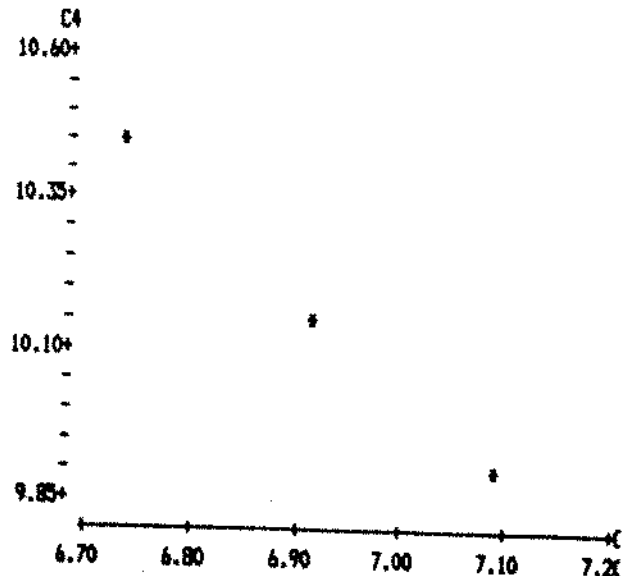
```



```

plot c4 c12

```





```

MTB > read c1 c2
DATA> 57902 833
DATA> 35199 1000
DATA> 33201 1200
DATA> end
      3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

± 3 - 3.4

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find NTABE_B1.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>
MTB > log c2 c12

```

```

MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

```

*NOTE* Change disk if necessary - Can't find NTABE_B1.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

C11 = 21.1 - 1.52 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	21.143	4.794	4.41
C12	-1.5240	0.6938	-2.20

S = 0.1791

R-SQUARED = 82.8 PERCENT

R-SQUARED = 65.7 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.15475	0.15475
RESIDUAL	1	0.03207	0.03207
TOTAL	2	0.18683	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

```

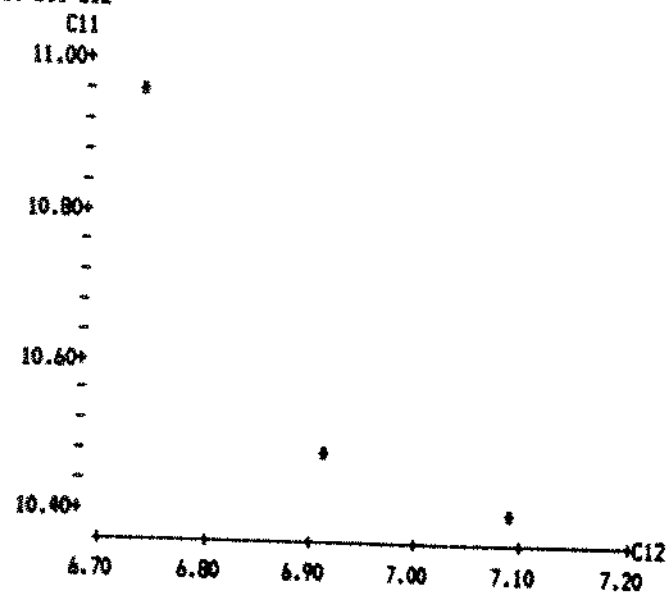
*NOTE* Change disk if necessary - Can't find NTABE_A.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```

```

MTB > plot c11 c12

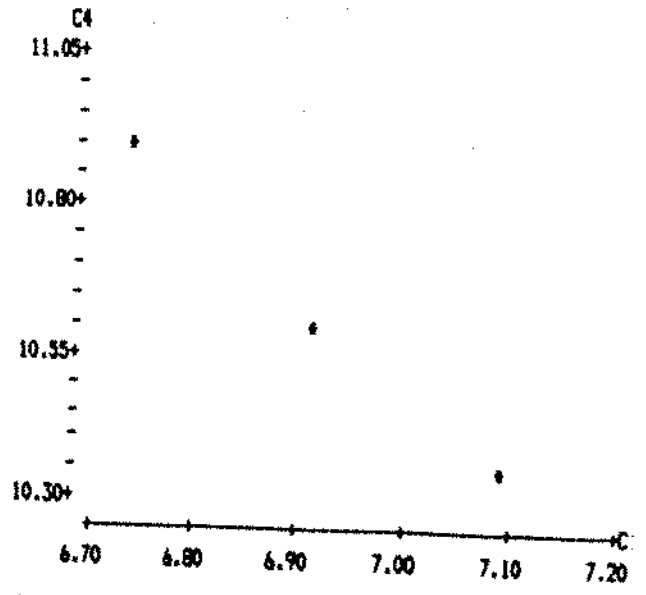
```



```

plot c4 c12

```



```

MTB >
MTB > read c1 c2
DATA> 41600 833
DATA> 34990 1000
DATA> 29798 1200
DATA> end
      3 ROWS READ
MTB > log c1 c11

```

E3 - 10,6%

```

MTB > log c2 c12
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

$$C11 = 16.8 - 0.914 C12$$

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	16.7808	0.1317	127.42
C12	-0.91404	0.01906	-47.95

S = 0.004920

R-SQUARED = 100.0 PERCENT

R-SQUARED = 99.9 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

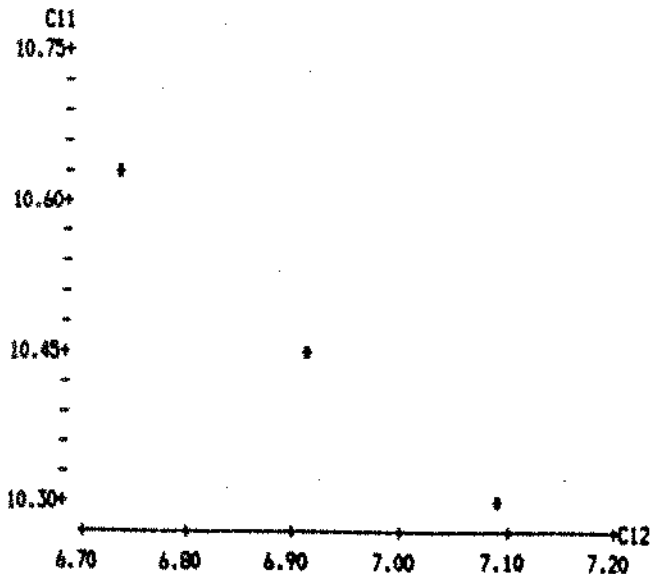
DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.055666	0.055666
RESIDUAL	1	0.000024	0.000024
TOTAL	2	0.055690	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

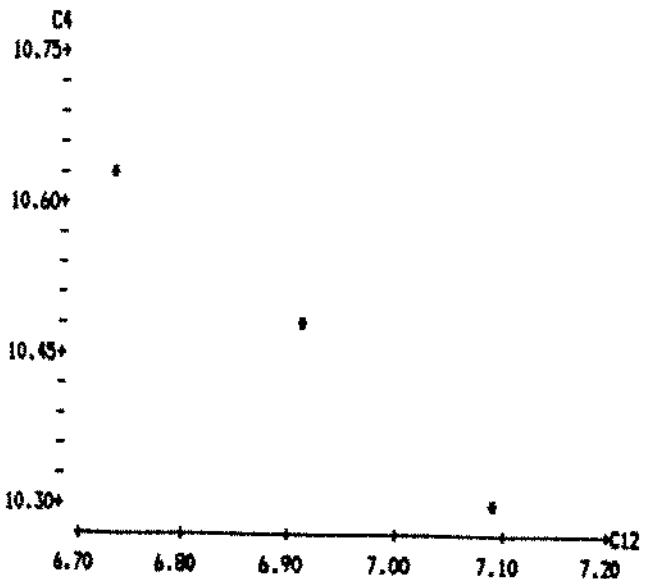
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```
MTB > plot c11 c12
```



```
c4 c12
```



```
MTB > read c1 c2
DATA) 58300 833
DATA) 36400 1000
DATA) 21000 1200
DATA) end
```

E3-22%

```
3 ROWS READ
MTB > log c1 c11
MTB > log c2 c12
MTB >
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4
```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 29.8 - 2.80 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	29.7971	0.8756	34.03
C12	-2.7971	0.1267	-22.07

S = 0.03271

R-SQUARED = 99.8 PERCENT

R-SQUARED = 99.6 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

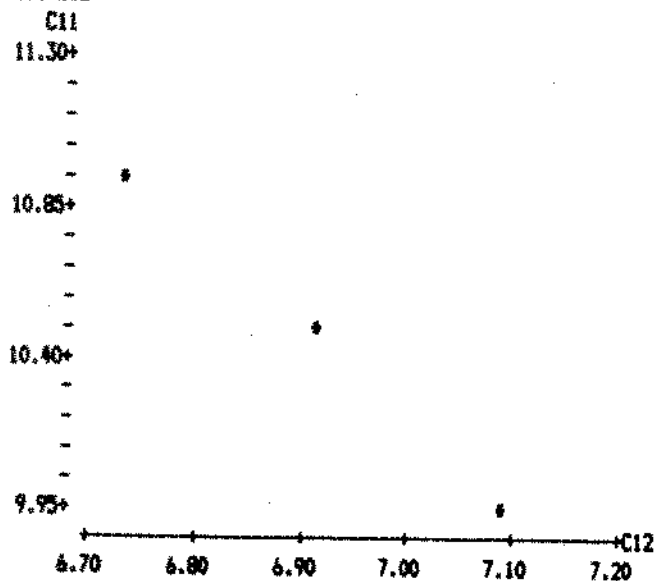
DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.52127	0.52127
RESIDUAL	1	0.00107	0.00107
TOTAL	2	0.52234	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

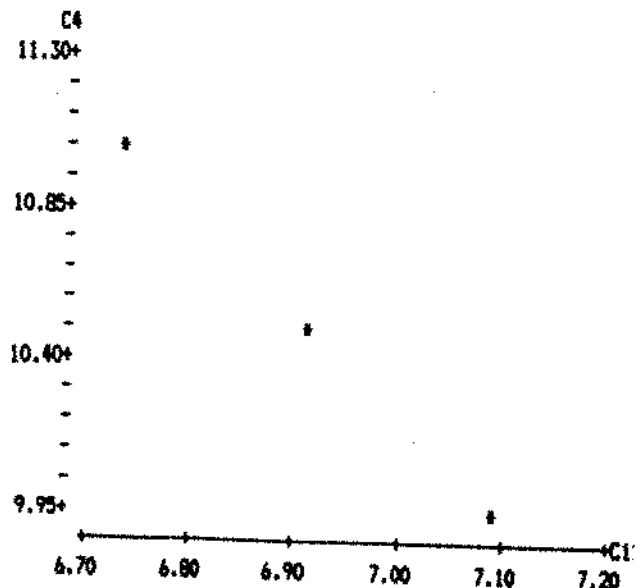
\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```
MTB > plot c11 c12
```



```
plot c4 c12
```



MTB >

E3-37%

```

MTB >
MTB > read c1 c2
DATA> 43100 833
DATA> 34100 1000
DATA> 21500 1200
DATA> log c1 c11
      3 ROWS READ
MTB > log c2 c12
MTB >
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.DVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 23.5 - 1.90 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	23.520	2.489	9.45
C12	-1.9049	0.3603	-5.29

S = 0.09299

R-SQUARED = 96.5 PERCENT  
R-SQUARED = 93.1 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

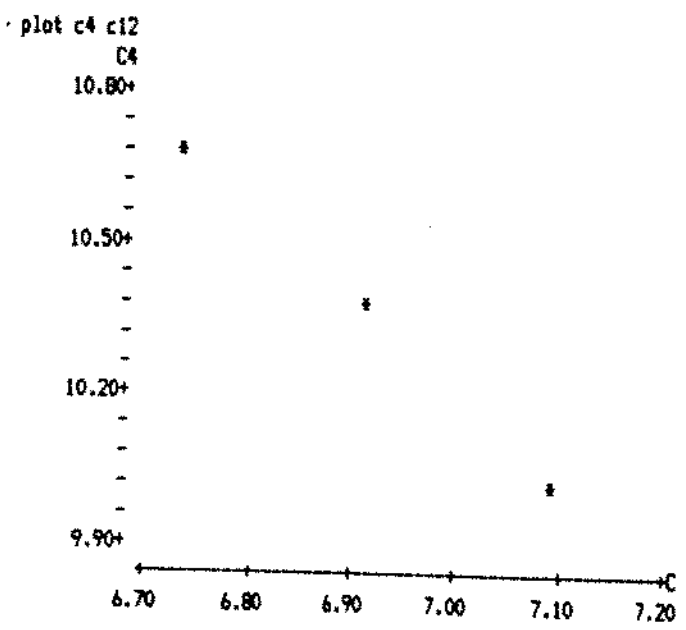
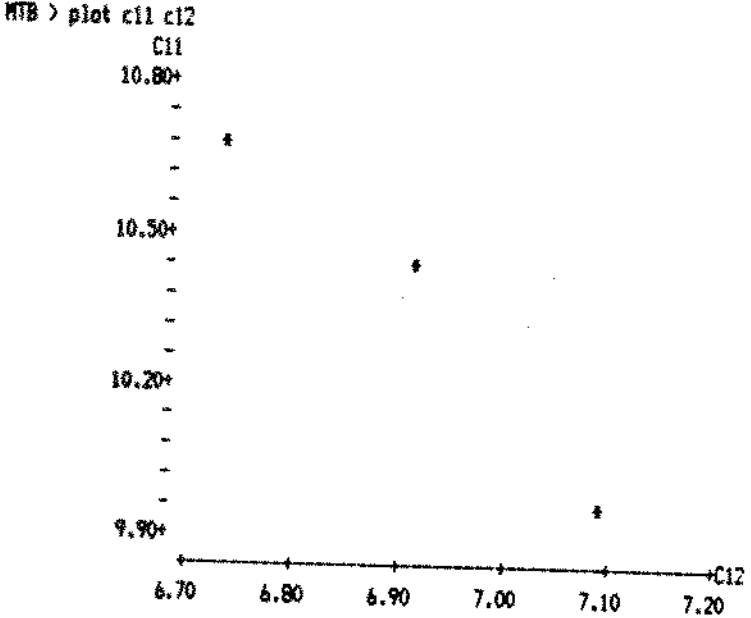
ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.24178	0.24178
RESIDUAL	1	0.00865	0.00865
TOTAL	2	0.25043	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B.DVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>



E3-41%

MTB > read c1 c2  
DATA> 39500 833  
DATA> 32200 1000  
DATA> 19000 1200  
DATA> end  
3 ROWS READ  
MTB > log c1 c11

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > log c2 c12  
MTB >  
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 24.1 - 2.00 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	24.119	3.540	6.81
C12	-2.0045	0.5124	-3.91

S = 0.1323

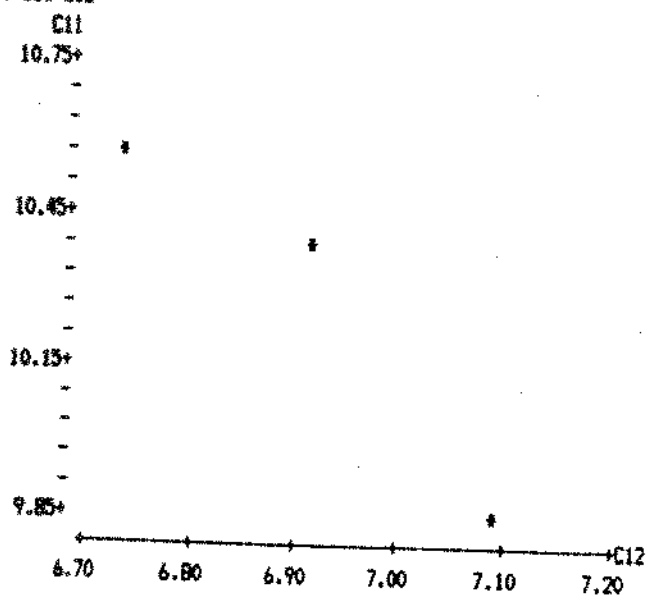
t-SQUARED = 93.9 PERCENT  
t-SQUARED = 87.7 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

ANALYSIS OF VARIANCE

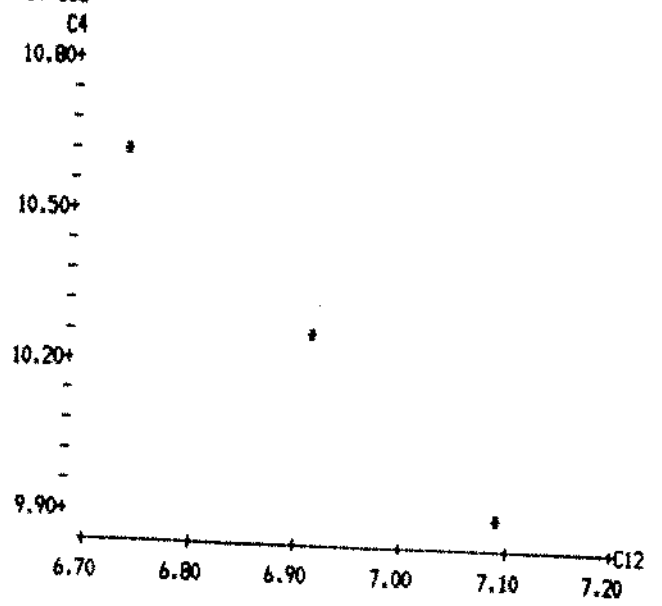
DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.26772	0.26772
RESIDUAL	1	0.01750	0.01750
TOTAL	2	0.28522	

KURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

MTB > plot c11 c12



plot c4 c12



23-51%

MTB >  
MTB > read c1 c2  
DATA> 32600 833  
DATA> 26000 1000  
DATA> 19100 1200  
DATA> end  
3 ROMS READ  
MTB > log c1 c11

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > log c2 c12  
MTB >  
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 20.3 - 1.46 C12

COLUMN	COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
	20.2544	0.9046	22.39
C12	-1.4645	0.1309	-11.19

S = 0.03379

R-SQUARED = 99.2 PERCENT

R-SQUARED = 98.4 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

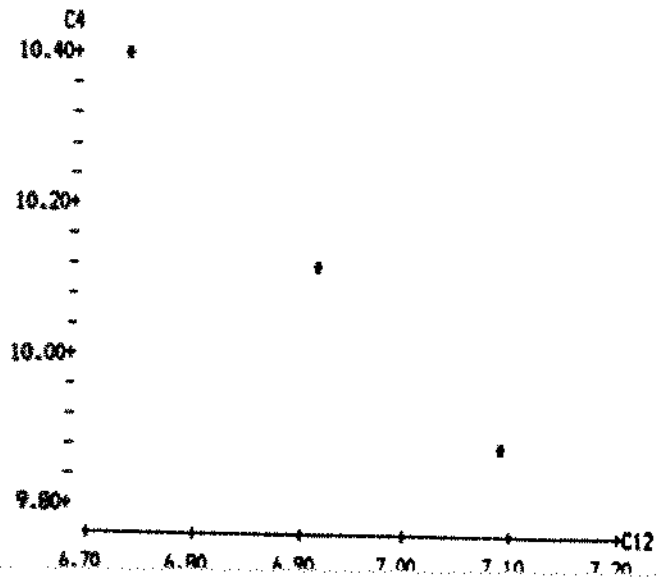
ANALYSIS OF VARIANCE

DUE TO	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.14290	0.14290
RESIDUAL	1	0.00114	0.00114
TOTAL	2	0.14404	

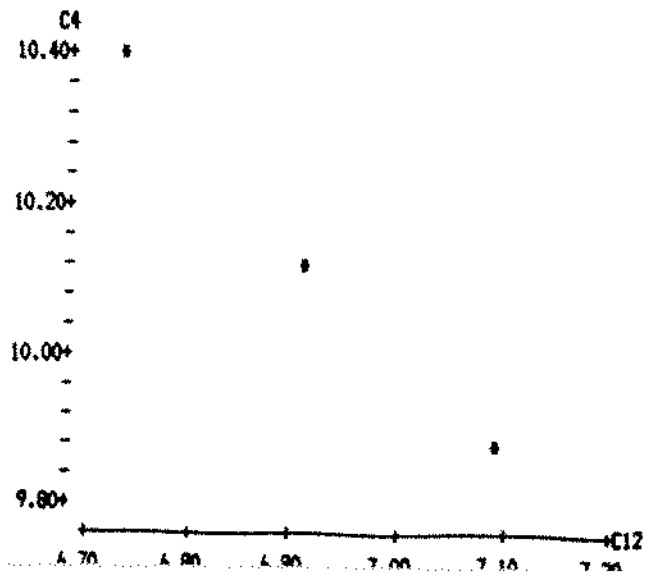
DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find MTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

MTB > plot c4 c12



plot c4 c12



E3 - PADRÃO

```
MTB > read c1 c2
DATA> 33200 833
DATA> 27100 1000
DATA> 19200 1200
DATA> end
      J ROWS READ
MTB > log c1 c11
```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```
*NOTE* Change disk if necessary - Can't find NTABE_A.OVL.
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>
MTB > log c2 c12
MTB > regress c11 1. c12 c3 c4
```

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_B1.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

C11 = 20.5 - 1.50 C12

COEFFICIENT	ST. DEV. OF COEF.	T-RATIO = COEF/S.D.
20.522	1.554	13.21
-1.5001	0.2249	-6.67

0.05806

R-SQUARED = 97.8 PERCENT

ADJ-R-SQUARED = 95.6 PERCENT, ADJUSTED FOR D.F.

#### ANALYSIS OF VARIANCE

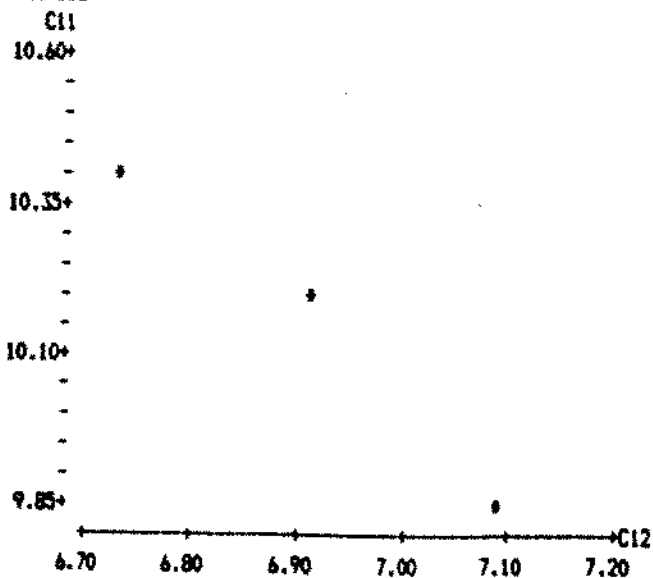
SOURCE	DF	SS	MS=SS/DF
REGRESSION	1	0.14993	0.14993
RESIDUAL	1	0.00337	0.00337
TOTAL	2	0.15330	

DURBIN-WATSON STATISTIC = 3.00

\*NOTE\* Change disk if necessary - Can't find NTABE\_A.OVL.  
Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

Enter file name prefix (X: or path name/) or '.' to quit=>

```
MTB > plot c11 c12
```



```
plot c4 c12
```

