

EVIDENCIAÇÃO DA FRAGILIDADE DO REVENIDO REVERSÍVEL
NO AÇO AISI 4340 EM ENSAIOS DE TRAÇÃO: UMA PEQUENA
CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO SEU MECANISMO

NEY FREITAS DE QUADROS

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.).

RIO DE JANEIRO
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL
SETEMBRO DE 1971

4. 30

EVIDENCIAÇÃO DA FRAGILIDADE DO REVENIDO REVERSÍVEL
NO AÇO AISI 4340 EM ENSAIOS DE TRACÇÃO; UMA PEQUENA
CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO SEU MECANISMO .

NEY FREITAS DE QUADROS

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVER
SIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS RE
QUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIA (M. Sc.).

Aprovada por:

Presidente

RIO DE JANEIRO
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL
SETEMBRO DE 1971

17136

A MARTA,
MARION

e

EDUARDO

Minha profunda gratidão:

A Naide e Bianor Teodósio, Bernadeth e Napoleão Quadros, que sempre me incentivaram para a realização deste trabalho;

Ao Prof. U. Q. Cabral, amigo das horas difíceis, orientador deste trabalho;

Ao Prof. W. A. Mannheimer pelo apoio recebido;

Ao Prof. Edil Patury Monteiro pela ajuda e compreensão;

Aos Prof. Gustavo e Helena Ferran cujas discussões profundas muito me ajudaram;

Aos colegas Mauro, Lúcio, Osmar, Alexandre, Oscar, Tomosaburo e Paulo que colaboraram direta ou indiretamente comigo;

A Eda, amiga e irmã, Lourdes, Ana, Frida, Newton, Gileno, Felipe, José Olívio, amigos inesquecíveis de todas as horas;

A Luis Salvador e Maury, pela compreensão e carinho com que sempre me animaram durante a confecção desta tese;

Meus agradecimentos:

A COPPE, ao CNPq., pelo apoio financeiro;

Ao CTA, ao IPB, por me permitirem usar suas instalações durante a fase experimental deste trabalho;

Aos professores do Programa de Metalurgia;

Aos funcionários da COPPE.

ERRATA

P. 3, ítem 5, 2^a linha, leia-se Prosvirin em vez de Prsvirin.

P. 4, 2^a linha, leia-se Meshkin⁶ em vez de Meshkin.

P. 4, 8^a linha, falta a sílaba final de mostrou.

P. 9, 1^a linha, leia-se através em vez de atrvés.

P. 13, embaixo, o limite de variação das temperaturas de tratamento foi:

Austenitização: 850°C ± 20

Revenidos : 630°C ± 10

500°C ± 10

P. 15, última linha, 1^o parágrafo, leia-se $2 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$ em vez de $2 \cdot 10^{-12} \text{ mm}^2$.

P. 92, 4^a linha, leia-se maior em vez de maios.

P. 93, 2^o parágrafo, modificar da 4^a linha em diante para " das características mecânicas dos ensaios de tração entre um aço fragilizado e o mesmo quando não frágil"

P. 96, duas últimas linhas, substituir " medirá a maior ou menor " por " tem mais a ver com ".

INDICE

Resumo	iv
I - Introdução.....	1
II - Revisão Bibliográfica	6
III - Materiais e Métodos	11
III.1 - Materiais	11
III.2 - Tratamentos Térmicos	11
III.3 - Investigações Metalográficas	14
III.4 - Fratografia	14
III.5 - Dureza.....	17
III.6 - Resiliência.....	17
III.7 - Tração	18
IV - Resultados Experimentais	22
IV.A - Ensaios de Impacto	22
IV.B - Ensaios de Tração	24
IV.B.1 - Determinação dos Critérios de Sig- nificatividade	24
1.1 - Pequena Revisão da Estatística...	26

1.2 - Critérios de Significatividade para Ensaio à Temperatura Ambiente ..	30
1.3 - Critérios de Significatividade para Altas Temperaturas.....	34
1.4 - Coeficiente de Variabilidade em Relação à Média	35
IV.B.2 - Limite de escoamento	37
2.1 - Efeito da Velocidade de Deformação..	37
2.1.1 - Temperatura do Ensaio: 25°C	37
2.1.2 - " " : 200°C	41
2.1.3 - " " : 250°C	42
2.1.4 - " " : 300°C	43
2.2 - Efeito de Temperatura	45
2.2.1 - Vel. de Deformação: $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$..	46
2.2.2 - " " : $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$..	47
2.2.3 - " " : $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$..	48
IV.B.3 - Limite de Resistência	49
3.1 - Efeito da Velocidade de Deformação..	49
3.1.1 - Temperatura do Ensaio: 25°C.....	49
3.1.2 - " " : 200°C	51
3.1.3 - " " : 250°C	52

3.1.4 - Temperatura do Ensaio : 300°C	54
3.2 - Efeito da Temperatura	56
3.2.1- Vel. de Deformação: $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	56
3.2.2- " " : $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$	57
3.2.3- " " : $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$	58
IV.B.4 - Alongamento	59
4.1 - Efeito da Velocidade de Deformação	59
4.1.1 - Temperatura do Ensaio: 25°C	59
4.1.2 - " " : 200°C	62
4.1.3 - " " : 250°C	63
4.1.4 - " " : 300°C	65
4.2 - Efeito da Temperatura	67
4.2.1 - Vel. de Deformação: $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$	67
4.2.2 - " " : $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$	69
4.2.3 - " " : $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$	70
IV.B.5 - Estricção	71
5.1 - Efeito da Velocidade de Deformação	71
5.1.1 - Temperatura do Ensaio: 25°C	71
5.1.2 - " " : 200°C	73
5.1.3 - " " : 250°C	74
5.1.4 - " " : 300°C	76

5.2 - Efeito da Temperatura	78
5.2.1 - Vel. de Deformação: $2,5 \cdot 10^{-4} \text{seg}^{-1}$..	78
5.2.2 - " " : $2,5 \cdot 10^{-3} \text{seg}^{-1}$..	80
5.2.3 - " " : $1,0 \cdot 10^{-2} \text{seg}^{-1}$..	81
IV.C - Ensaio de Dureza	82
IV.D - Investigações Metalográficas	83
IV.E - Fratografia	86
V - Discussão	89
VI - Conclusões	117
VII - Referências Bibliográficas	121

I - INTRODUÇÃO

A Fragilidade do Revenido Reversível (FRR) é um fenômeno que ocorre em aços que, após tempera, são tratados termicamente em uma faixa de temperaturas determinada (entre 400°C e 600°C), ou são resfriados lentamente após revenido a temperaturas superiores a 600°C. Tal fenômeno se manifesta pelo aumento da temperatura de transição, explicitada em ensaios de impacto como o Charpy, por exemplo, que faz com que o material (N) após o tratamento (F) passe a sofrer fraturas frágeis a

uma temperatura onde, normalmente, romperia através de fraturas dúcteis (fiel).

O aspecto fundamental da fragilidade é o seu caráter reversível, ou seja, g

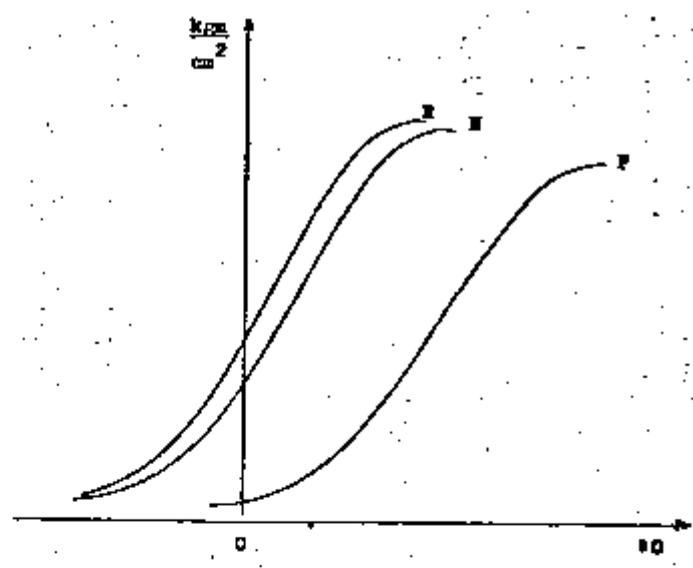


Fig. 1 - Curvas de transição de um aço nos estados estruturais de fragilizado (F), não frágil (N) e regenerado (R).

quecendo-se o material fragilizado (F) a temperaturas superiores a 600°C e resfriando-se rapidamente (o fim de evitar a sua permanência na faixa de temperatura considerada), obtém-se a restauração da antiga curva de temperaturas de transição (R).

A Fragilidade do Revenido Reversível é responsável por grande número de falhas em serviço de peças aparentemente perfeitas (utilidade adequada) e que se rompem por fratura frágil, geralmente imprevisível e catastrófica. Para se garantir a ausência do fenómeno é necessário e suficiente evitar a permanência do material na faixa de temperaturas já citada durante um tempo muito grande, ou seja, fazer a peça passar por esta faixa a uma velocidade de resfriamento bastante rápida. Em peças pequenas isto pode ser realizado facilmente através da utilização de um meio refrigerante adequado como óleo, água, etc.: em se tratando, porém, de peças de alto porte (como as usadas em forjas portáteis e em fundições), torna-se impossível a obtenção de uma grande velocidade de resfriamento no seu interior, devido a problemas inerentes à pequena condutibilidade térmica do aço (cerca de dez vezes menor que a do cobre), compreendendo assim um núcleo

fragilizado que, poderá quebrar em serviço, expondo uma fratura dútil na periferia e frágil no centro.

Um outro aspecto singular da FRR é que as fraturas são essencialmente intergranulares. Nessas condições, as teorias que procuram explicar o fenômeno apoiam-se em um enfraquecimento da coesão entre os grãos, seja por uma precipitação de uma nova fase seja por uma segregação. Entre outros, para referência, os seguintes mecanismos foram propostos:

- 1 - "Segregação de equilíbrio", de Mc Lean e Northcutt.¹
- 2 - "Segregação de equilíbrio modificada" de Woodfine.²
- 3 - Mecanismo do "filme de átomos de impurezas nas interfaces", de Powers.³
- 4 - Segregação de elementos dissolvidos para os contornos de grão, causando uma distorção da rede cristalina que enfraqueceria esta região, de Mikhailov-Mikheev.⁴
- 5 - Precipitação de carbono nas vizinhanças dos contornos dos grãos, de Prvčin e Svoboda.⁵
- 6 - Precipitação de fosfetos em aços comuns: formação de cristas frágeis ordenadas de M_3P ou de M_2P nos aços ao níquel-manganes e, finalmente,

a formação de uma fase sigma em aços ao cromo, de Meshkin.

- 7 - Adsorção física nas interfaces dos grãos, diminuindo a coesão nestas regiões, de Bernshtain⁷.
- 8 - Formação de carbonetos complexos, com uma redução de volume que produz vácuos (vazios) nos contornos dos grãos, de Yurev⁸.

Low Jr.⁹ em uma revisão crítica publicada em 1959, mostra que nenhum destes mecanismos explica totalmente o fenômeno, apoiando-se em outra revisão realizada por Sadovskii¹⁰ em 1957 para a apreciação dos 5 (cinco) últimos. A grande dificuldade permanece porém a de obter-se evidências experimentais que confirmem a aplicabilidade dos mecanismos aos mais diferentes casos, em particular, tendo-se em vista a reversibilidade do fenômeno.

Cabral¹¹, em 1967, mostrou que, de acordo com o que a 7
firmava a literatura especializada, ensaios de tração realizados à temperatura ambiente não seriam capazes de mostrar diferenças significativas entre as propriedades mecânicas de um aço nos três estados estruturais (não fragilizado, fragilizado e regenerado); o autor relacionou estes fatos à seguinte

na mobilidade dos átomos intersticiais de carbono e de nitrogênio a esta temperatura, o que não permitiria a existência de interações dos mesmos com as discordâncias. Daí o autor partiu para a realização de ensaios de tração a 300°C (velocidade de deslocamento da parte móvel da máquina: 0,05cm/min), constatando diferenças significativas entre o alongamento e a estricção nos três estados estruturais.

No mesmo trabalho o autor sugere um estudo sistemático a fim de observar-se a influência da velocidade de deformação e de temperatura sobre as diferenças constatadas a altas temperaturas.

O objetivo da nossa Tese consiste exatamente no estudo de um aço nos três estados estruturais já citados: em ensaios de tração a várias temperaturas e várias velocidades de deformação. As etapas experimentais que seguimos estão especificadas abaixo:

- 1 - Escolha do material.
- 2 - Tratamentos térmicos (têmpera e revenidos).
- 3 - Medição das durezas.
- 4 - Determinação das curvas de transição do material a fim de verificar o grau de fragilização e a re-

generação.

- 5 - Investigações metalográficas.
- 6 - Ensaio de tração a baixa temperatura, à temperatura ambiente e a altas temperaturas, a várias velocidades de deformação (entre $2,5 \cdot 10^{-5} \text{seg}^{-1}$ e $1,0 \cdot 10^{-2} \text{seg}^{-1}$).
- 7 - Ensaio diferencial visando determinar as energias de ativação do material nos três estados estruturais.
- 8 - Levantamento estatístico dos dados a fim de obtermos o desvio padrão e o grau de confiança dos resultados.
- 9 - Investigações fractográficas.

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1920, Greaves e Jones¹² estabeleceram pela primeira vez uma técnica eficiente para o estudo da Fragilidade do Revenido Reversível, a qual consistiu em submeter amostras de um mesmo material a um tratamento de revenido e depois

resfriá-las com velocidades de resfriamento diferentes (uma série resfriada em água e outra ao forno). Isto feito, resqueciam-se as amostras à mesma temperatura do tratamento anterior (acima de 600°C) e resfriavam-se as duas séries com velocidades de resfriamento inversas, ou seja, a série que havia sido resfriada em água seria resfriada ao forno e vice-versa. Evidentemente este método garantia que as amostras frágeis diferissem das não fragilizadas apenas pela transformação responsável pela Fragilidade do Revenido Reversível e pela grandeza das tensões residuais.

Em 1944, Jolivet e Vidal¹³ mostraram que a maneira segura de por em evidência a FRR, consistia na determinação das curvas de transição para o material no estado normal (não frágil) e no estado fragilizado, medindo-se então a suscetibilidade ao fenômeno pela diferença entre as respectivas temperaturas de transição do material nos dois estados.

Hollomon¹⁴, dois anos mais tarde, publicou um extenso artigo de revisão, onde mostrou a evolução do conceito da FRR e também a importância fundamental dos ensaios de impacto no estudo do mesmo. Afirmou, inclusive, serem estes os únicos testes capazes de diferenciar efetivamente uma amostra fra -

gilizada de uma normal; entretanto, já nesse tempo, o autor reconhecia possibilidades de êxito através de estudos microscópicos. O autor chama ainda a atenção para os resultados de um estudo de fractografia dos corpos de prova de tração realizado por Lea e Arnold¹⁵ no qual o material fragilizado mostra uma fratura estriada radialmente a partir do centro, denominada como "tipo estrêla". Infelizmente nada foi indicado sobre a significação e a importância do fato.

Woodfine¹⁶, em 1953, também em um artigo de revisão, mostra que, até 1952, não se havia ainda chegado a uma evidência completa sobre a variação das propriedades físicas ou mecânicas (exceto o comportamento do material quanto aos ensaios de impacto) em materiais fragilizados, a não ser um pequeno abaixamento no valor de estrição em alguns casos de fragilização muito severa; em segundo lugar conclui que a única evidência metalográfica de uma mudança estrutural em aços fragilizados era o ataque mais intenso dos seus contornos de grãos austeníticos por uma solução baseada em ácido pícrico em comparação com um aço não frágil; finalmente o autor confirma, baseado em evidências experimentais, que quando aumenta o grau de fragilização a fratura transforma-se de

transgranular para intergranular (através dos antigos contornos de grãos austeníticos).

Em outro trabalho, na mesma época, Woodfine¹⁶ mostrou que em ensaios de tração a -196°C os valores da estrição de materiais fragilizados são menores do que em aços não fragilizados, embora à temperatura ambiente, o autor, em concordância com Greaves e Jones^{12,17} e Hollomon^{14,18}, não tenha encontrado diferenças significativas entre suas propriedades mecânicas.

Em 1959, Low Jr.⁹, em excelente artigo de revisão, realizou um apanhado geral sobre a Fragilidade do Revenido Reversível, chegando às seguintes conclusões:

- 1 - É possível a obtenção de aços baixa-liga não fragilizáveis, desde que os elementos Sb, P, Sn, As, Mn e Si não estejam presentes.
- 2 - Com menos de 0,003% de carbono não se observa a Fragilidade do Revenido Reversível, mesmo com a presença dos elementos acima.
- 3 - O Mo e o W podem reduzir a sensibilidade à fragilização desde que presentes em determinadas quantidades. Estes mesmos elementos em grandes quan-

tidades aumentam a FRR.

4 - Os métodos atuais de pesquisa não permitem uma evidência concreta de qualquer formação de precipitados nos contornos dos grãos nem da formação de um filme intergranular de uma segunda fase durante a fragilização.

5 - Alguns reativos metalográficos usados em ataques seletivos dos contornos dos grãos permanecem como a única evidência de segregação nos contornos dos grãos durante a fragilização.

Cabral¹¹ chama a atenção para o fato de que as rupturas mecânicas de um aço no estado estrutural de não frágil geralmente são transgranulares e que as de um aço fragilizado são intergranulares. Isto poderia ser uma evidência de que o fenômeno é devido a modificações dos antigos contornos de grãos austeníticos ou de zonas vizinhas, que permitem o enfraquecimento coesivo dos cristais nestas regiões.

O grande problema seria, agora o de identificar a natureza dessas modificações nos contornos dos grãos. Pensou-se, em primeiro lugar, na presença de precipitados nestas regiões. Hollomon, em seu trabalho já citado, sugeriu que ês

tes precipitados poderiam ser nitretos, enquanto Maloof¹⁹ achava que eram carbonetos. Woodfine¹⁶, entretanto, mostrou que nem mesmo com a ajuda da difração eletrônica era possível identificar estes precipitados. Ainda contra as hipóteses de Hollomon¹⁴ e Maloof, Cabral¹¹ mostrou que, caso fossem verdadeiras, dever-se-ia ter sempre presente que:

- 1 - O domínio de existência destes precipitados seria bastante limitado, uma vez que seriam formados em torno de 500°C e entrariam em solução a cerca de 600°C (devido a característica reversível do fenômeno).
- 2 - Se fosse realizado um tratamento isotérmico a 500°C durante um tempo bastante longo, os precipitados deveriam coalescer; até hoje este fato não foi mostrado.

A hipótese mais plausível para Cabral é a de uma segregação ou de uma adsorção de átomos para os contornos dos antigos grãos austeníticos. Tal segregação estaria associada à distribuição dos átomos de carbono e de nitrogênio na rede em estudo. O autor chama ainda a atenção para o fato de que ensaios de tração efetuados à temperatura ambiente não permiti

tiriam interações entre estes átomos e as discordâncias devido a pequena mobilidade dos mesmos. Tal não se dá a 300°C uma vez que, a esta temperatura, além de os coeficientes de difusão destes átomos serem praticamente iguais, eles possuem uma grande mobilidade, a qual permitiria a existência das interações citadas acima.

Cabral sugere então que nos estados estruturais não frágil e regenerado haveria uma segregação em pequenas quantidades daqueles átomos para os contornos de grãos e, devido a escassez dos mesmos, não haveria formação de nuvens de intersticiais em torno das discordâncias. Entretanto, no estado estrutural do aço fragilizado, haveria uma segregação bastante acentuada de carbono e de nitrogênio para os contornos dos grãos e, concomitantemente, a formação de nuvens de intersticiais em torno das discordâncias (atmosfera de Cottrel) cujo efeito principal seria o de aumentar o número de prisões a serem superadas por estas mesmas discordâncias em qualquer processo de deformação.

III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1 - Materiais

Usou-se um aço de baixa liga ao Ni-Cr-Mo, AISI 4340, recebido em forma de barras de 3/4" de diâmetro. As análises químicas e espectrográficas de Raios-X revelaram a seguinte composição :

Elemento	Porcentagem
C	0,39
Si	0,26
Mn	0,68
Al	0,015
P	0,032
Mo	0,23
Cr	0,74
Ni	1,81
S	0,009
Cu	0,08

Para a realização dos revenidos usou-se sal de nomenclatura GS-230 e GS-540 da Brasimet.

Os ensaios a baixa temperatura foram realizados com Nitrogênio líquido.

III.2 - Tratamentos Térmicos.

A austenitização foi efetuada em um forno de mufla à temperatura de 850°C com uma faixa total de variação igual a 30°C, durante 1 (uma) hora, com resfriamento em óleo, resultando uma estrutura totalmente martensítica, conforme podemos observar pela figura . . , página (resultados experimentais).

Para os tratamentos de revenido o aquecimento foi realizado em um forno a banho de sal (semi-mufla) e o resfriamento em óleo de t \hat{e} mpera, com a finalidade de congelar a estrutura característica de cada tratamento.

A seq \uacute ncia dos tratamentos est \acute{a} indicada na fig.2, abaixo. Como podemos observar, todos os corpos de prova foram submetidos ao tratamento de t \hat{e} mpera e ao primeiro revenido, seguido de resfriamento r \acute{a} pido, ap \acute{o} s o qual apresentam uma estrutura de martensita revenida (N na fig.).

A seguir foram separados 2/3 (dois terços) do lote de amostras assim tratadas, e

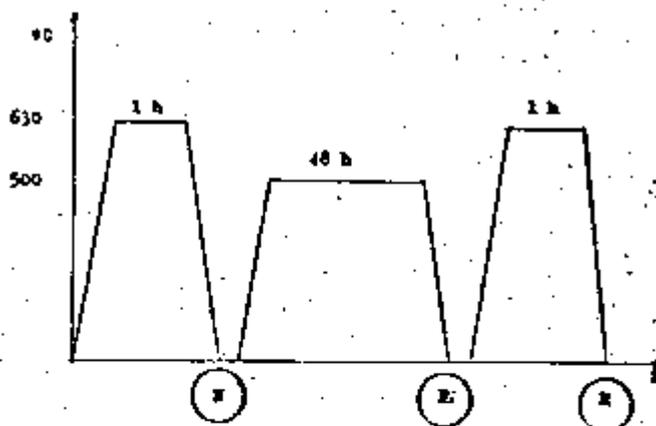


Fig. 2 - Seq \uacute ncia dos tratamentos de revenido efetuados.

submetidas a um segundo revenido de 48 (quarenta e oito) horas a 500°C. De acordo com a sensibilidade do aço ao fenômeno as amostras devem encontrar-se fragilizadas (letra F na fig. 2).

Finalmente, metade dos corpos de prova do último tratamento (onde deve ter ocorrido a fragilização) é submetida a um terceiro revenido de 1 (uma) hora a 630°C, obtendo-se assim as amostras regeneradas (letra R na fig. 2).

Resumindo, os tratamentos térmicos realizados nos permitem a obtenção do aço AISI 4340 em três estados estruturais diferentes, como indicado abaixo:

Estado N (não frágil) - Austenitização a 850°C durante uma hora, seguida de um resfriamento em óleo; revenido a 630°C durante uma hora, seguido de resfriamento em óleo.

Estado F (fragilizado) - Mesmos tratamentos anteriores, mais um segundo revenido a 500°C durante 48 horas, seguido de resfriamento em óleo.

Estado R (regenerado) - Mesmos tratamentos do estado F, mais um terceiro revenido a 630°C durante 1 hora, seguido de resfriamento em óleo.

III.3 - Investigações Metalográficas

As amostras foram polidas mecânicamente, em primeiro lugar com a série de papéis abrasivos de nº 100 ao nº 600 e, posteriormente, com alumina. De acordo com Woodfine¹⁶ foi desenvolvida uma técnica de polimento diferencial com a finalidade de revelar os antigos contornos de grãos da austenita e que consiste essencialmente na realização de ataques metalográficos relativamente severos seguidos de ligeiro polimento antes da observação ao microscópio.

Para os ataques usou-se uma solução aquosa de ácido pítrico saturada, determinando-se um tempo ótimo de ataque de 20 minutos. Após o primeiro ataque, realizou-se outro com picral saturado durante 5 minutos. O polimento era realizado após o ataque, várias vezes, até que os contornos dos grãos ficassem claramente visíveis.

As microfotografias foram obtidas com um banco metalográfico Leitz usando-se filmes pancromáticos de 125 ASA .

III.4 - Fractografia

Para o exame da fratura em cada corpo de prova usou-se um microscópio eletrônico de varredura, tipo Stereoscan, desenvolvido na Universidade de Cambridge, o qual deteta e mostra em um vídeo apropriado, em três dimensões, as informações resultantes da ação de uma sonda eletrônica que efetua uma varredura sobre a superfície da amostra. Este instrumento permite o exame de superfícies grosseiras, rugosas, como é o caso dos corpos submetidos à ruptura por meio de ensaios de tração ou de resiliência. Seu poder de resolução é sempre maior do que 500 \AA , podendo, em condições ótimas de operação, atingir até 150 \AA , com uma profundidade de foco cerca de 300 vezes maior do que a do microscópio ótico. O sistema de ampliação permite um aumento de 20 X a 50.000 X, que corresponde, na amostra, a áreas de 5 mm^2 a 2.10^{-12} mm^2 , respectivamente.

A sonda eletrônica é formada por um feixe de elétrons primários, os quais são focalizados na área em exame da superfície da amostra por meio de um sistema de lentes eletromagnéticas. Esta sonda atua sobre os elétrons da superfície da amostra que, uma vez arrancados, são atraídos por um sistema coletor de elétrons, que consiste de um eletrodo eletrostático de focalização e de um cintilador ótico acoplado a um fotomultiplicador. Os elétrons que ativam o cintilador liberam fótons os

quais são devidamente orientados para o foto-catodo do fotomultiplicador. Daí os sinais são lançados através de um amplificador principal (head amplifier) para um amplificador de vídeo de onde saem diretamente para a tela, na qual os sinais amplificados modulam o brilho do tubo do feixe dos raios catódicos. Este feixe varre a tela em sincronismo com a varredura da amostra pela sonda eletrônica. A imagem resultante possui uma aparência tridimensional porque o contraste é produzido pela variação do número de eletrons emitidos ou refletidos pelas diferentes partes da amostra. O Stereoscan possui ainda uma tela onde pode ser instalada uma câmara fotografica.

O diâmetro máximo permitido para a amostra é de 12mm mas o seu comprimento pode ser algumas vezes maior. O espécime a ser examinado é montado em um sistema que permite a sua manipulação em qualquer ângulo especificado

Foram examinados os corpos de prova dos ensaios de tração realizados à temperatura ambiente e à velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ para os três estados estruturais, e também os corpos de prova ensaiados à temperatura de -196°C à mesma velocidade de deformação .

III.5 - Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados numa máquina de durezas marca Zwick. Usou-se cone de diamante e uma carga total de 150 kgf. utilizando-se a escala Rockwell C.

Os resultados são uma média aritmética de 10 medidas por corpo de prova ensaiado. Foram usadas cerca de 5 amostras de cada estado estrutural.

III.6 - Resiliência.

Os ensaios de impacto foram realizados em uma máquina Iosenhauser de 30 kgm. Para os ensaios a baixa temperatura usou-se uma câmara fria tipo Amsler.

Como substância refrigerante foi utilizado o Nitrogênio líquido, o qual, colocado em um recipiente da câmara fria, era levado a circular pelas serpentina de outro recipiente da mesma por uma pequena bomba de sucção acoplada a um termostato cuja função é regular a temperatura de um banho líquido adrede preparado onde mergulhar-se-á a amostra devidamente usinada.

As amostras permaneceram mais de 5 minutos no banho re-

frigerante antes de serem ensaiadas. Após retiradas da câmara fria as amostras foram quebradas em um intervalo de tempo máximo de 5 seg., conforme o estabelecido pelas normas.

O corpo de prova usado foi o Charpy, cujas dimensões encontram-se na fig. 3 abaixo. O entalhe do mesmo foi usinado em uma máquina de entalhar tipo Black's.

Foram levantadas as curvas de transição do aço AISI 4340 para os seus três estados estruturais. Nos pontos de maior importância tomou-se a média aritmética de três ensaios, enquanto nos outros a média representa o resultado de dois ensaios.

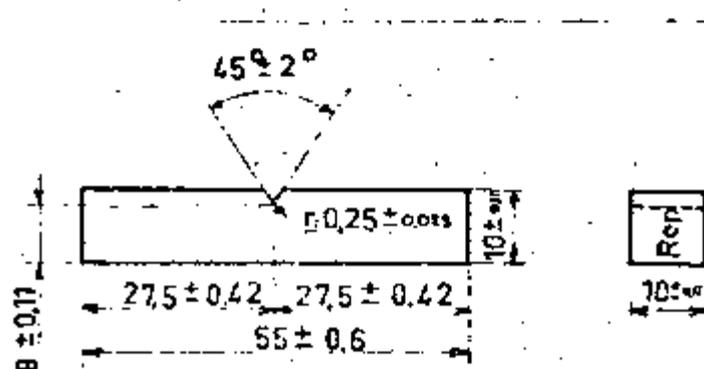


Fig. 3 - Corpo de prova utilizado no ensaio Charpy.

III.7 - Tração.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina Ins

tron modelo TT-DM de 10 toneladas, usando-se uma célula de tensão GRM em uma escala de 2 toneladas. A Instron possui um sistema de engrenagens que permite variar o movimento de sua ponte móvel desde 5 cm/min até 0,005 cm/min. Em nosso trabalho foram usadas as velocidades de 0,005 cm/min, 0,05 cm/min, 0,5 cm/min e 2 cm/min, que correspondem respectivamente às velocidades de deformação seguintes: $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$; $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$; $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$; $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$. A Instron é considerada como uma máquina "dura" (hard machine) por Basinski²⁰. A resistência oferecida pela amostra devido ao movimento da sua ponte móvel é transmitida à célula de tensão cuja finalidade é realizar uma pesagem eletrônica de alta sensibilidade e gravá-la em um registrador acoplado à máquina.

Os ensaios de tração realizados podem ser divididos em três partes:

- a) Ensaios a alta temperatura.
- b) Ensaios à temperatura ambiente
- c) Ensaios a baixa temperatura

a) Ensaios a alta temperatura.

Foram feitos às temperaturas de 200°C, 250°C e 300°C. Utilizou-se um forno de soleira redonda vertical marca Instron, acoplado à máquina de tração, o qual permite ensaios desde a temperatura ambiente até 1.200°C, no vácuo ou em atmosferas inertes. A amostra é presa por um sistema de garras envolvido por uma cápsula de proteção e irradiação de calor, a qual é inserida no forno na hora do ensaio. Este tipo de forno permite um grande controle de temperatura do corpo de prova, da ordem de 2°C.

O corpo de prova adotado foi a amostra padrão recomendada no catálogo do forno, como mostra a fig.4, ao lado.

Para a determinação da Energia de Ativação as amostras foram submetidas a variações de temperatura

e de velocidade de deformação dentro do próprio forno.

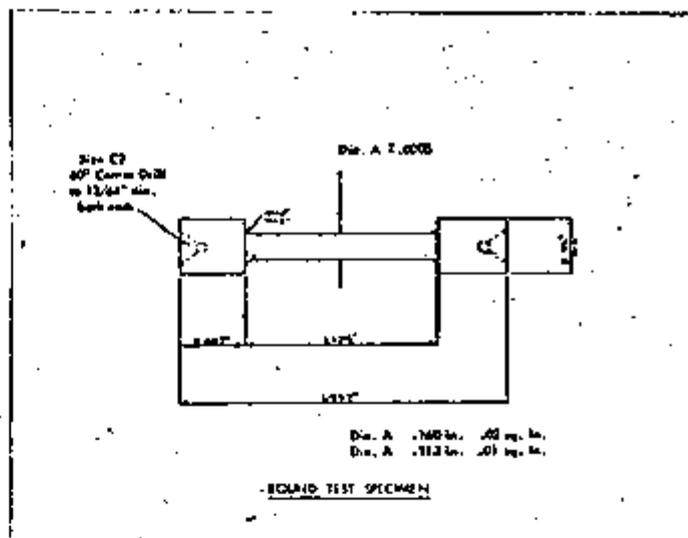


Fig. 4 - Corpo de prova padrão do forno de Instron.

b) Ensaios à temperatura ambiente.

Por motivo de comodidade e de facilidades na usinagem estes ensaios realizaram-se no próprio forno da Instron, desligado, uma vez que este procedimento permitiu o aproveitamento dos mesmos corpos de prova utilizados nos ensaios a alta temperatura, proporcionando assim uma maior uniformidade nos resultados. Considerou-se como temperatura ambiente a média de 25°C.

c) Ensaios a baixa temperatura.

Para estes ensaios utilizou-se um sistema de garras modificado que permitia a adaptação de um vaso criogênico com uma substância refrigerante à ponte móvel, onde se mergulhava a amostra a ser ensaiada. A temperatura escolhida foi de -196°C e a substância usada para o banho o Nitrogênio líquido. Para este sistema modificado de garras apenas a abertura de rês nas partes não úteis das amostras foi necessário.

As medidas, antes e após cada ensaio, foram tomadas através de um microscópio de medição Zeiss.

IV - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

IV.A - Ensaio de Impacto

Os resultados obtidos indicam que, à temperatura ambiente (25°C), o aço AISI 4340 é tenaz para qualquer dos três tratamentos térmicos efetuados, sendo que o mais tenaz é o material no estado regenerado, como era de se esperar. A fragilização do material no estado estrutural F, começa a aparecer mais ou menos a -60°C, ficando satisfatoriamente determinado a -80°C.

Medindo-se a sensibilidade do material à Fragilidade do Revenido Reversível pelas diferenças das temperaturas de transição tomadas ao nível de 5 kg/cm^2 , (fig. 5) podemos notar que o grau de sensibilidade ao fenômeno do material fragilizado em relação ao não

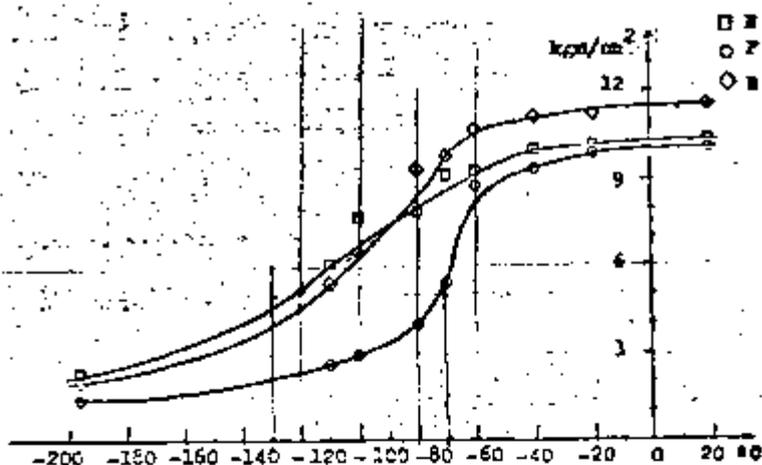


Fig. 5 - Curvas de transição do aço AISI 4340 nos estados N, F e R.O grau de fragilização é de 50°C.

frágil. é de mais ou menos 50°C. Por outro lado, em relação ao re-
generado, a sensibilização é de cerca de 40°C.

Pelos resultados apresentados conclui-se que estamos tra-
balhando com o material nos estados estruturais que nos propú-
nhamos obter. Todavia, cumpre chamar atenção para o fato de que,
embora os tratamentos térmicos tenham produzido os resultados
esperados, o grau de sensibilidade à fragilização obtido não foi
muito severo. Logo abaixo segue a tabela dos resultados do ensaio
de impacto.

°C	N(kgm/cm ²)	F(kgm/cm ²)	R(kgm/cm ²)
20	10,30	10,10	11,50
-20	10,20	9,90	11,20
-40	10,00	9,40	11,10
-60	9,30	8,80	10,70
-70	9,20	5,40	9,80
-80	8,90	4,00	9,40
-100	7,70	3,00	6,50
-110	6,10	2,70	5,40
-196	2,40	1,50	2,10

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de impacto. Valores
médios.

IV.B. - Ensaio de Tração

Nesta parte do nosso trabalho examinaremos em detalhe os resultados experimentais obtidos em nossos ensaios de tração, assim como os critérios adotados para fixar das diferenças consideradas como realmente significativas. As características mecânicas determinadas foram : o limite de escoamento, o limite de resistência, o alongamento e a estrição. A partir das curvas levantadas na Instron, calculamos os diversos coeficientes de encruamento. Além disso foram efetuados ensaios de tração diferenciais, com a finalidade de determinarmos a energia de ativação no processo de deformação do aço em estudo nos seus três estados estruturais.

As tabelas gerais contendo todos os dados experimentais encontram-se no fim do capítulo, o que permite uma visão de conjunto dos mesmos.

IV.B.I - Determinação dos Critérios de Significatibilidade.

De acordo com Dieter²¹ e Wine²², resolveu-se realizar

uma pequena análise estatística dos resultados dos ensaios de tração com a finalidade de definir um critério que permitisse diferenciar os valores que surgissem no decorrer das experiências.

O ideal, reconhecemos, seria a realização de uma série de pelo menos 30 ensaios de cada tipo, pois isto nos daria uma série de observações praticamente infinita e portanto, permitir-nos-ia definir claramente a nossa população ou universo estatístico. No caso particular dos nossos testes isto não foi possível, em primeiro lugar porque não dispúnhamos de um número de amostras suficiente e, em segundo lugar porque o tempo necessário para o levantamento dos parâmetros de uma só amostragem seria muito grande. Todavia, a estatística nos permite ter uma idéia aproximada dos parâmetros de uma população através de uma amostragem aleatória constituída de um número bastante reduzido de observações.

Em nosso caso particular havia uma grande necessidade de determinar diferenças significativas entre os valores das características mecânicas dos distintos estados estruturais do aço em estudo. Em outras palavras, tratava-se de calcular a dispersão dos resultados de cada tipo de ensaio. Devido ao

pequeno número de corpos de prova disponíveis fomos obrigados a tomar como base apenas duas amostragens, estendendo os resultados ao resto dos ensaios, procedimento este justificado no item 1.1 abaixo. A primeira constou de 5 corpos de prova fragilizados que foram ensaiados à temperatura ambiente e à velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$, e a segunda, de 5 corpos de prova regenerados e que foram ensaiados a 200°C à mesma velocidade de deformação. Esta segunda amostragem, foi realizada com o intuito de verificarmos os parâmetros estatísticos nos ensaios a quente e compará-los com os que foram levantados a 25°C.

1.1 - Pequena Revisão da Estatística.

O valor central de uma distribuição estatística é um número que indica a região central desta distribuição, e a dispersão é um número que indica como as observações se afastam desta região.

A medida mais comum e mais importante do valor central de uma série de dados é a média aritmética ou, simplesmente, a média. A média de X_1, X_2, \dots, X_n observações é denominada de \bar{X} e é dada por :

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad (1)$$

Da mesma maneira, a medida mais importante da dispersão de um determinado universo estatístico é a variância s^2 , dada por :

$$s^2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (2)$$

O termo $X_i - \bar{X}$ representa o desvio de cada observação X_i da média aritmética \bar{X} das n observações. A quantidade $n - 1$ do denominador é o número de graus de liberdade e é igual ao número das observações menos o número de relações lineares que existem entre elas. Uma vez que a média representa uma relação linear entre as observações, o número de graus de liberdade para a variância em torno da média é de $n - 1$.

O desvio padrão é outra medida muito importante da dispersão, é representado por s e é definido como a raiz quadrada positiva da variância. Seu valor é dado por :

$$s = \left(\frac{\sum [(x_i - \bar{x})^2]}{n - 1} \right)^{1/2} \quad (3)$$

É de muita utilidade o conhecimento do coeficiente de variação v , pois este número serve para descrever a variabilidade relativa da média aritmética de uma amostragem. Seu valor é :

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (4)$$

A média de uma amostragem representa uma estimativa da média da população ou universo de onde ela foi retirada. No entanto, se tomarmos várias amostragens de uma mesma população, elas, geralmente, apresentarão valores diferentes para a média e o desvio padrão. Contudo, estes valores da média das diferentes amostragens poderão estar distribuídos normalmente (isto é, de acordo com uma distribuição normal, segundo a curva de Gauss) em torno do médio da população, que chamaremos de μ . O Teorema do Limite Central fornece um método que permite estimar μ e o desvio padrão do universo, σ . De acordo com ele, se \bar{x} é o valor médio de uma

amostragem de n observações retirada de um universo de N observações, \bar{X} está distribuído normalmente em torno da média da população μ com um desvio padrão que é igual a

$$\frac{S}{\sqrt{n}}$$

Desta maneira, é possível determinar os limites de confiança dentro dos quais a média de uma amostragem se aproxima da média do universo (população) até um certo nível de certeza .

Para amostragens com grande número de observações , mais do que 30, ou no caso em que a variância do universo é conhecida (o que é raro), a determinação dos limites de confiança é baseada no desvio padrão, Z . Entretanto, para amostragens nas quais o número de observações é muito pequeno, não se pode substituir a variância de amostragem s^2 , pela variância da população S^2 ; é necessário basear os cálculos em uma constante estatística conhecida pelo nome de coeficiente de Student , t . Esta constante depende do número de observações da amostragem, n , de acôrdo com a tabela 2 da página seguinte . Para um dado nível de confiança

(ou seja, para um dado nível de certeza), a média da população está situada no intervalo

$$\bar{X} \pm t \cdot s / \sqrt{n}$$

onde os valores de t são obtidos da tabela 2.

Tabela 2 - Valores de t para a determinação dos níveis de confiança da média e do desvio padrão da amostragem.

Nível de Confiança = (%)	Nº de Observações n da amostragem					
	3	5	7	10	12	∞
90	2,35	2,01	1,89	1,81	1,78	1,64
95	3,18	2,57	2,36	2,23	2,18	1,96
99	5,84	4,03	3,50	3,17	3,05	2,58

1.2 - Critérios de Significabilidade para os
Ensaios Realizados à Temperatura Ambien
te .

Para a escolha deste critério realizamos 5 ensaios a

25°C, nas mesmas condições, com uma velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$, uma vez que a esta velocidade encontramos resultados razoavelmente diferentes. Usamos corpos de prova fragilizados. A tabela 3 mostra os resultados obtidos. A simbologia adotada segue abaixo.

Tabela 3 - Resultados dos testes realizados a fim de se determinar as diferenças significativas entre os valores das características mecânicas do aço AISI 4340 .

Amostras	Límite de Escoamento (kg/mm ²)	Límite de Resistência (kg/mm ²)	Alongamento (%)	Estricção (%)
F ₁	90,09	100,90	16,10	64,26
F ₁ ^o	91,19	101,24	14,91	65,34
F ₂ ^o	89,31	99,41	14,72	62,20
F ₃ ^o	86,98	97,08	15,40	62,50
F ₄ ^o	86,54	96,60	14,88	65,92
\bar{X}	88,82	99,05	15,20	64,04
s	2,00	2,13	0,56	1,66

Na tabela acima \bar{X} é a média e s o desvio padrão.

Na tabela 3 inserimos dois valores que medem o valor central e a dispersão, respectivamente a média e o desvio padrão. No entanto, estas grandezas são representativas apenas da amostragem através da qual foram calculadas. O desvio padrão do universo se aproxima do desvio padrão da amostragem com um determinado nível de certeza, como já foi explicado. Assim, se escolhermos um nível de confiança de 90%, isto significa que existe 90% de probabilidade de que o desvio padrão do universo seja representado pelo da amostragem. Por esta razão adotamos a seguinte nomenclatura :

- s_{90} - Desvio padrão com um nível de certeza de 90%.
- D_{95} - Diferença mínima entre os valores das características mecânicas para que possamos considerá-los realmente distintos, com um nível de confiança de 95%.

Evidentemente,

$$D_{90} = 2 \cdot s_{90} ; D_{95} = 2 \cdot s_{95} \text{ e } D_{99} = 2 \cdot s_{99}$$

A tabela 4 da página seguinte contém o desvio padrão da amostragem e os do universo que ela representa, assim co

mo os diversos níveis de certeza a que estão submetidos estes valores e também os valores mínimos necessários para que as diferenças possam ser consideradas como significativas.

Tabela 4 - Desvio padrão e diferença significativa e entre os valores das características mecânicas determinados pelos ensaios a 25°C.

Parâmetro	Límite de Escoamento (kg/mm ²)	Límite de Resistência (kg/mm ²)	Alongamento (%)	Estricção (%)
s	2,00	2,13	0,56	1,66
s ₉₀	1,80	1,92	0,51	1,49
s ₉₅	2,30	2,45	0,65	1,91
s ₉₉	3,35	3,85	1,01	2,99
D ₉₀	3,60	3,84	1,02	2,98
D ₉₅	4,61	4,90	1,30	3,82
D ₉₉	7,22	7,70	2,02	5,98

Como um exemplo de utilização da tabela 4. suponhamos que a diferença entre os limites de escoamento de um aço fragilizado e de um não frágil foi de 8 kg/mm². O ban-

do a referida tabela podemos observar que esta diferença poderá ser considerada significativa pois é maior do que D_{99} da tabela 4 (99% de confiança).

1.3 - Determinação dos Critérios de Significabilidade para Altas Temperaturas.

Foram realizados, 5 ensaios a 200°C com a mesma velocidade de deformação usada nos testes anteriores. Usamos amostras regeneradas. As tabelas 5 e 6 mostram os resultados obtidos.

Tabela 5 - Resultados dos testes realizados a 200°C.

Amostras	Límite de Escoamento (kg/mm ²)	Límite de Resistência (kg/mm ²)	Alongamento (%)	Estricção (%)
R ₁₂	75,31	95,53	14,21	61,28
R ₁₂	72,98	92,42	14,18	60,98
R ₁	78,05	97,56	15,15	62,01
R ₂	76,89	95,53	15,00	60,50
R ₃	76,11	95,53	15,49	63,70
Média	75,86	95,39	14,88	61,63

Tabela 6 - Desvio padrão e diferença significativa entre os valores das características mecânicas determinados pelos ensaios a 200°C.

Parâmetro	Limite de Escoamento (kg/mm ²)	Limite de Resistência (kg/mm ²)	Alongamento (%)	Estricção (%)
s	1,91	1,86	0,60	0,96
s ₉₀	1,71	1,67	0,54	0,86
s ₉₅	2,19	2,13	0,69	1,11
s ₉₉	3,43	3,35	1,08	1,74
D ₉₀	3,42	3,34	1,08	1,72
D ₉₅	4,38	4,26	1,38	2,22
D ₉₉	6,87	6,69	2,16	3,47

1.4 - Coeficiente de Variabilidade em Relação à Média .

Como pudemos observar em outra parte deste trabalho, este coeficiente serve para descrever a variação relativa da média de uma amostragem, ou seja, é a relação entre a medida da dispersão e a média desta amostragem. Definiremos agora outro coeficiente v' como a relação entre o dô-

bro do desvio padrão e a média de uma amostragem, portanto:

$$v' = \frac{2s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (5)$$

A tabela 7 apresenta os coeficientes de variabilidade de v' para os ensaios realizados à temperatura ambiente, enquanto a tabela 8 apresenta para os testes a 200°C.

Tabela 7 - Valores de v' à temperatura ambiente.

Parâmetro (%)	Limite de Escoamento	Limite Resistência	Alongamento	Estricção
v'_{90}	4,05	10,82	6,71	4,65
v'_{95}	5,19	11,95	8,55	5,97
v'_{99}	8,13	17,77	13,29	9,34

Tabela 8 - Valores de v' a 200°C .

Parâmetro (%)	Limite de Escoamento	Limite Resistência	Alongamento	Estricção
v'_{90}	4,51	11,50	7,26	2,79
v'_{95}	5,77	14,47	9,27	3,60
v'_{99}	9,06	21,01	14,52	5,63

IV.B.2 - Limite de Escoamento

Neste ítem será feita uma exposição minuciosa dos efeitos da velocidade de deformação e da temperatura sobre o limite de escoamento do aço 4340 nos seus três estados estruturais. O objetivo fundamental é verificar-se existem diferenças significativas entre esta característica no material fragilizado e a mesma propriedade nos materiais não frá-gil e regenerado. Por esta razão só serão apresentados gráficos onde tais diferenças apareçam. As tabelas, no entanto, mostrarão todos os resultados, sem exceções.

Em primeiro lugar estudaremos o efeito da velocidade de deformação e em segundo o efeito da temperatura nas velocidades onde apareçam quaisquer resultados interessantes.

2.1 - Efeito da Velocidade de Deformação.

2.1.1 - Temperatura do Ensaio : 25°C.

A tabela 9 apresenta os limites de escoamento do aço

em estudo (valores médios de duas ou três medidas). Os valores considerados importantes estão sublinhados. As curvas correspondentes encontram-se no gráfico de figura 6, na sua parte superior. A nomenclatura adotada é a mesma, sendo que as letras N (não frágil), F (frágil) e R (regenerado) aparecem acompanhadas de dois índices numéricos, o primeiro dos quais está relacionado com a velocidade de deformação do ensaio e o segundo com a temperatura em que o mesmo foi realizado. Os números e a explicação seguem abaixo:

1º índice	Velocidade de deformação
1 -	$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$
2 -	$2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$
3 -	$1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$

2º índice	Temperatura
0 -	25°C
1 -	200°C
2 -	250°C
3 -	300°C

Tabela 9 - Limites de escoamento do aço AISI 4340 a 25°C nas três velocidades de deformação escolhidas.

Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm ²)
N ₁₀	<u>97,00</u>	N ₂₀	<u>95,21</u>	N ₃₀	94,28
F ₁₀	<u>88,82</u>	F ₂₀	91,19	F ₃₀	88,54
R ₁₀	<u>87,76</u>	R ₂₀	<u>86,20</u>	R ₃₀	88,54

Como podemos observar, à velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$, kg/mm^2 há uma diferença significativa entre o limite de escoamento do material no estado frágil e o do material não frágil, assim como entre o deste úl

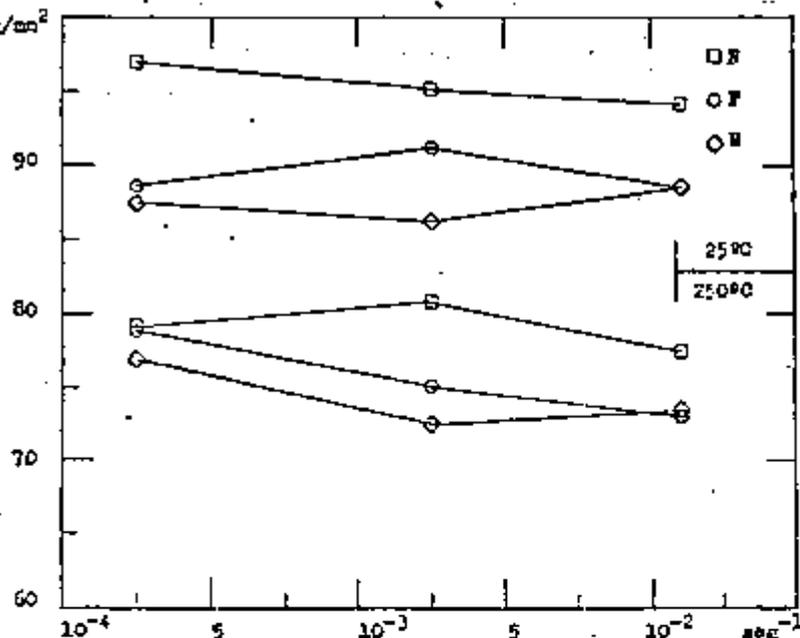


Fig. 6 - Limites de escoamento versus velocidade de deformação. A parte superior corresponde aos ensaios a 25°C e a inferior a 250°C.

timo e o do material regenerado; contudo, entre este e o aço fragilizado não há diferença alguma.

A velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ a diferença entre o valor do limite de escoamento do material frágil e do material não frágil é de cerca de 4 kg/mm^2 , o que acarreta um nível de confiança de apenas 90%, não sendo portanto muito significativa. Entre o material regenerado e o frágil o nível de confiança é um pouco maior (95%) enquanto entre o primeiro e o não frágil a diferença é tão significativa quanto à velocidade de deformação anterior, ou seja, é maior do que $7,22 \text{ kg/mm}^2$, o que nos dá um nível de confiança de 99% .

A velocidade de deformação de $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ os materiais frágil e regenerado apresentam o mesmo valor para o limite de escoamento o qual difere em cerca de 6 kg/mm^2 do valor achado para o do material não fragilizado.

Como se pode observar pela figura 6 da página anterior os limites de escoamento dos materiais frágil e regenerado são praticamente iguais a $2,5 \cdot 10^{-4}$ e a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ e, ao mesmo tempo, guardam uma diferença significativa do limite de escoamento do material não fragilizado. Como a $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$

acontece a mesma coisa entre o material regenerado e não frágil, podemos concluir que a regeneração não restaura os valores do limite de escoamento nos ensaios realizados a 25°C.

2.1.2 - Temperatura do Ensaio : 200°C

Os resultados destes ensaios são apresentados na tabela 10. De acordo com o convencionalizado os índices agora serão 11, 21 e 31 para a temperatura de 200°C e para as velocidades de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4}$, $2,5 \cdot 10^{-3}$ e $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 10 - Resultados experimentais do limite de escoamento nos ensaios de tração a 200°C.

Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm ²)
N ₁₁	79,06	N ₂₁	79,96	N ₃₁	78,82
F ₁₁	76,74	F ₂₁	77,64	F ₃₁	79,19
R ₁₁	74,67	R ₂₁	76,08	R ₃₁	80,66

A tabela 10 mostra que não há diferenças que possam ser consideradas significativas entre os limites de escoamento do aço em estudo a esta temperatura (200°C), exceto entre as amostras N_{11} e R_{11} que apresentam valores que diferem em cerca de 4 kg/mm^2 o que nos dá um nível de confiança de 90%. Por esta razão não será apresentado o gráfico correspondente uma vez que não há nada de interessante a mostrar.

2.1.3 - Temperatura do Ensaio : 250°C

A tabela 11 mostra os resultados dos ensaios realizados a 250°C. A nomenclatura agora exige que os índices sejam 12, 22 e 32 para as velocidades de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4}$, $2,5 \cdot 10^{-3}$ e $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ e para a temperatura de 250°C.

Tabela 11 - Limites de escoamento a 250°C.

Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm^2)	Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm^2)	Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm^2)
N_{12}	79,01	N_{22}	<u>80,75</u>	N_{32}	<u>77,64</u>
F_{12}	78,80	F_{22}	74,53	F_{32}	<u>72,53</u>
R_{12}	76,87	R_{22}	<u>72,42</u>	R_{32}	73,38

A figura 6 (página 39) mostra, na sua metade inferior, o gráfico correspondente à tabela 11. A velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ ocorre uma diferença razoavelmente significativa entre as amostras N_{22} e F_{22} , com um nível de confiança superior a 95% enquanto que entre a primeira e a R_{22} (cêrca de 8 kg/mm^2) a diferença admite um grau de confiabilidade de 99%.

A velocidade de deformação de $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-2}$ pode-se admitir uma diferença entre as amostras N_{32} e F_{32} com um nível de confiança de 95%, o que nos parece razoável.

É interessante notar que o limite de escoamento do material regenerado é praticamente igual ao do material fragilizado em tôdas as velocidades de deformação.

2.1.4 - Temperatura do Ensaio : 300°C

Os limites de escoamento obtidos nos ensaios de tração a 300°C estão tabulados na tabela 12. Os índices 13, 23 e 33 indicam as velocidades de deformação de $2,5 \cdot 10^{-3}$, $2,5 \cdot 10^{-3}$ e $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$, respectivamente, e a temperatura de 300°C.

Tabela 12 - Limites de escoamento a 300°C.

Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm ²)
N ₁₃	<u>74,72</u>	N ₂₃	74,57	N ₃₃	<u>77,09</u>
F ₁₃	70,42	F ₂₃	72,46	F ₃₃	<u>72,62</u>
R ₁₃	<u>69,95</u>	R ₂₃	76,88	R ₃₃	<u>63,94</u>

A figura 7 ilustra os resultados dos ensaios realizados à temperatura de 300°C. Notemos que à velocidade de deformação mais baixa ocorre uma diferença significativa e apenas razoável en-

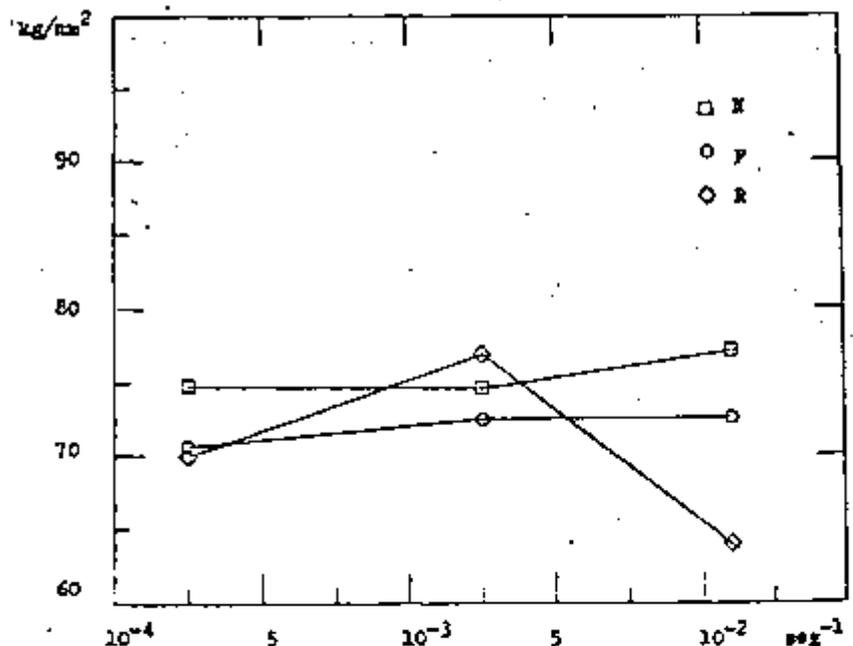


Fig. 7 - Limite de escoamento x velocidade de deformação a 300°C.

tre o limite de escoamento dos materiais não frágil e regenerado (nível de confiança de 95%), e que na velocidade intermediária existe uma diferença ainda menos sensível entre os materiais nos estados estruturais frágil e regenerado, uma vez que o nível de confiança admissível é de somente 90%. No entanto, à mais alta velocidade de deformação ocorre uma diferença bastante expressiva entre as amostras N_{33} e R_{33} , a mais significativa que podemos anotar (cêrca de 13 kg/mm^2), em relação ao limite de escoamento, embora a diferença entre as amostras N_{33} e F_{33} admita um nível de confiança de apenas 90%. Note-se ainda que a diferença entre o material regenerado e fragilizado admite um grau de certeza de mais de 99%.

2.2 - Efeito da Temperatura .

Nêste ítem apresentaremos alguns gráficos interessantes relacionando o limite de escoamento com a temperatura. As tabelas de números 9, 10, 11 e 12 contêm todos os dados que utilizamos para o levantamento das curvas. Escolhemos as velocidades de $2,5 \cdot 10^{-4}$ e $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ por apresentarem as di

ferenças mais significativas, embora tenhamos incluído a velocidade intermediária.

2.2.1 - Velocidade de Deformação :

$$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$$

A figura 8 mostra a variação do limite de escoamento com a temperatura à velocidade de deformação mais baixa que escolhemos para o nosso trabalho. A figura 6 da página 39 serve para nos dar uma idéia dessa variação.

Pela figura ao lado podemos observar que as diferenças mais signi-

ficativas ocorreram a 25°C .

A 300°C também pode-se constatar a ocorrência das mesmas, embora o nível de confiança seja sensivelmente menor.

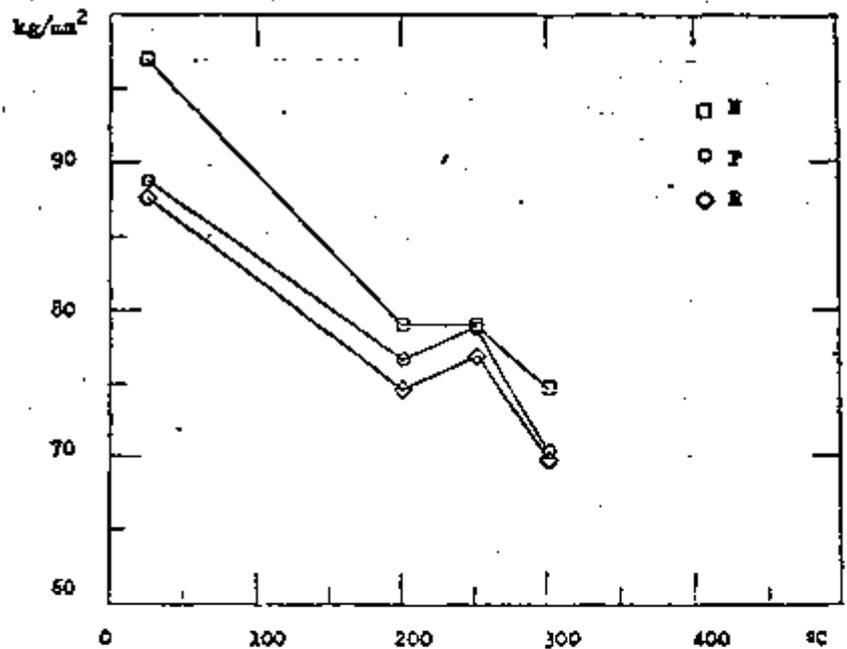


Fig. 8 - Limite de escoamento x temperatura a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$.

2.2.2 - Velocidade de Deformação :

$$2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1} .$$

A esta velocidade de deformação não obtivemos diferenças bastante significativas à temperatura ambiente entre o material nos estados não frágil e frágil embora entre o não frágil e o regenerado tenhamos esta diferença com um nível de certeza de 99%. Note-se a ocorrência de valores a 250°C bastante diferenciados.

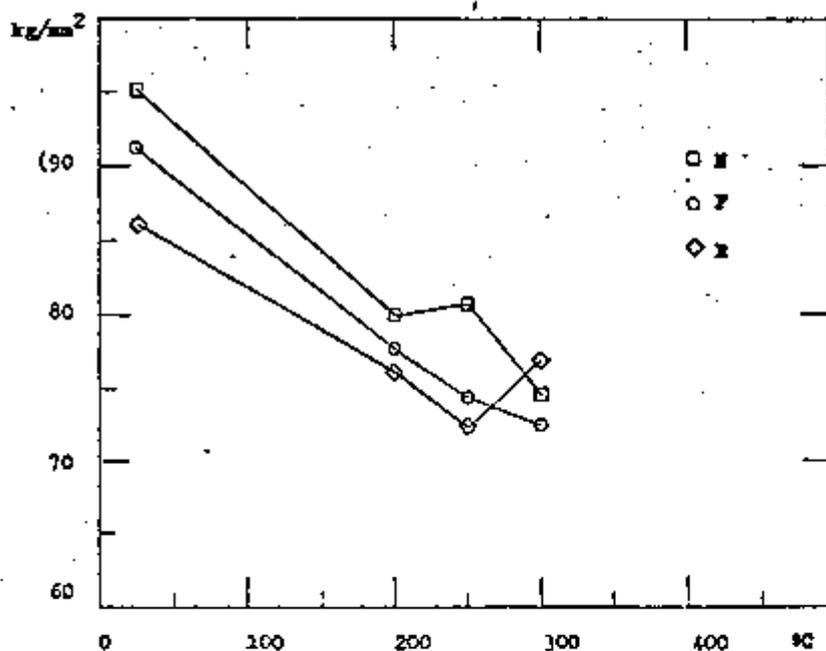


Fig. 9 - Limite de escoamento x temperatura a $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$.

2.2.3 - Velocidade de Deformação :

$$1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$$

Notemos que a esta velocidade e à temperatura ambiente os valores do limite de escoamento do material frágil e regenerado coincidem e diferem significativamente do valor do limite de escoamento do material fragilizado em cerca de 6 kg/mm^2 , quantidade esta que admite um nível de confiança de mais de 95%. A 250°C , embora também ocorra uma diferença razoável en-

tre as amostras frágeis e não frágeis, não há um nível de confiança bastante satisfatório. Note-se que o limite de escoamento do material regenerado é prá-

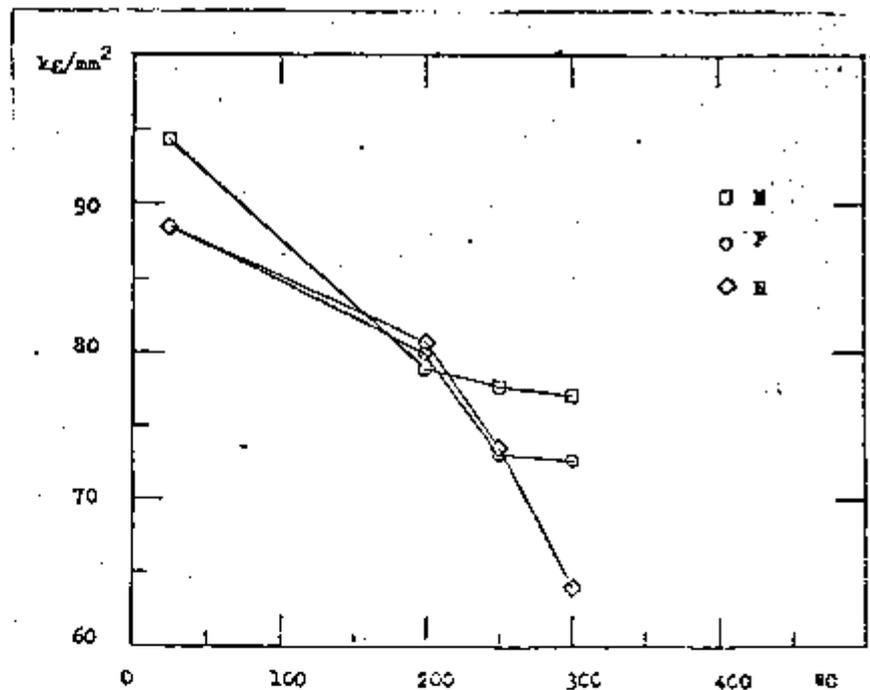


Fig. 10 - Limite de escoamento x temperatura a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$.

ticamente igual ao do material fragilizado. A 300°C embora o limite de escoamento do material fragilizado apresente uma certa diferença com o do material não frágil, admite um nível de confiança de apenas 90%, o que não nos parece suficiente. Entretanto, as amostras regeneradas mostram uma diferença altamente significativa tanto em relação às amostras não frágeis quanto às frágeis.

IV.B.3 - Limite de Resistência .

3.1 - Efeito da Velocidade de Deformação .

3.1.1 - Temperatura de Ensaio : 25°C .

Os limites de resistência obtidos a 25°C estão catalogados na tabela 13. Os índices são os mesmos dos itens anteriores, ou seja, 10, 20 e 30 para as velocidades de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4}$, $2,5 \cdot 10^{-3}$ e $1,0 \cdot 10^{-2}$, respectivamente, e para a temperatura de 25°C. Os valores que mostram diferenças significativas entre si estão sublinhados.

Tabela 13 - Limites de resistência a 25°C .

Amostra	Limite de Resistência (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Resistência (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Resistência (kg/mm ²)
N ₁₀	<u>107,10</u>	N ₂₀	<u>104,60</u>	N ₃₀	<u>103,80</u>
F ₁₀	<u>100,90</u>	F ₂₀	102,00	F ₃₀	99,41
R ₁₀	<u>97,85</u>	R ₂₀	<u>97,07</u>	R ₃₀	<u>98,53</u>

Como podemos observar só existe uma diferença significativa entre as amostras frágeis e não frágeis a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$, enquanto entre estas e as regeneradas há diferenças em tôdas as velocidades estudadas, sendo que à velocidade mais alta o nível de confiança é de 95%. Note-se que entre o material frágil e o não frágil o maior nível de confiança admitido é de 95%, e à maior velocidade de deformação êste nível é de apenas 90%, o que nos parece pouco.

A figura 11 da página seguinte ilustra as curvas levantadas com os dados da tabela 13. É interessante notar que o limite de escoamento parece mais sensível à fragilidade do revenido reversível do que o limite de resistência.

Pela figura 11 podemos observar que o limite de resistência não varia como o limite de escoamento em relação à velocidade de deformação. Ao mesmo tempo, podemos constatar que à temperatura ambiente as diferenças mais significativas são encontradas à velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$.

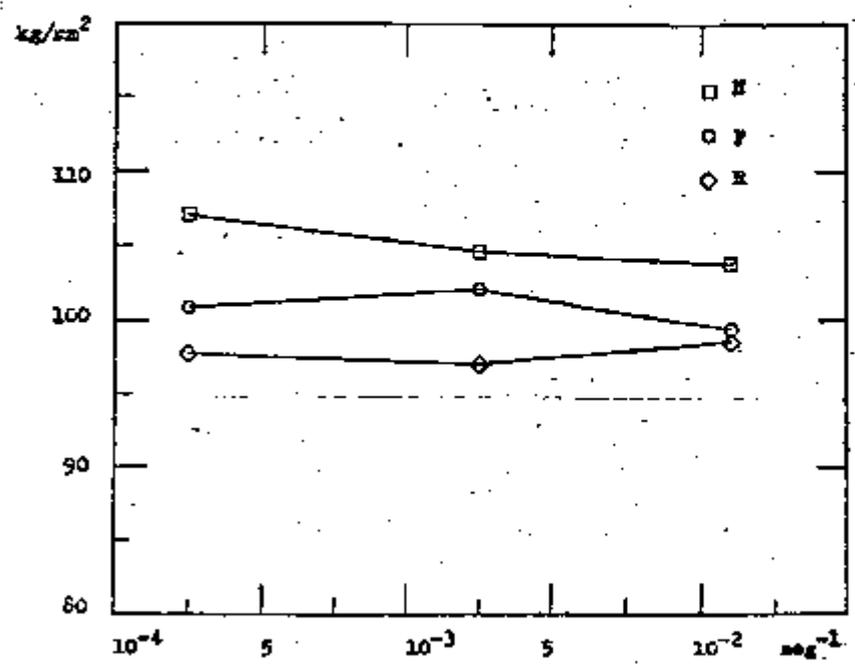


Fig. 11 - Limite de resistência x velocidade de deformação a 25°C.

3.1.2 - Temperatura do Ensaio : 200°C.

A esta temperatura os limites de resistência não apresentam diferenças consideráveis a nenhuma das velocidades de deformação escolhidas. A tabela 14 contém os resultados alcançados.

Tabela 14 - Limites de resistência a 200°C.

Amostra	Limite de Resistência (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Resistência (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Resistência (kg/mm ²)
N ₁₁	98,57	N ₂₁	97,47	N ₃₁	94,28
F ₁₁	95,39	F ₂₁	94,36	F ₃₁	94,75
R ₁₁	94,59	R ₂₁	92,81	R ₃₁	94,01

Como pode-se notar, apenas as amostras N₁₁ e R₁₁ e as amostras N₂₁ e R₂₁ guardam alguma diferença entre si, e assim mesmo, com um nível de certeza de no máximo 95%, o que deixa muito a desejar. É interessante registrar a pequena variação do limite de resistência do material, nos seus três estados estruturais, com a velocidade de deformação e esta temperatura.

3.1.3 - Temperatura do Ensaio : 250°C.

Como se pode observar na figura 6 (página 39), o limite de escoamento do material nos estados N, F e R guardam di

ferenças razoavelmente significativas entre si às velocidades de $2,5 \cdot 10^{-3}$ e de $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$. O mesmo acontece com o limite de resistência a esta temperatura. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 15 abaixo e na figura 12 da página seguinte .

Tabela 15 - Limites de resistência a 250°C.

Amostra	Limite de Resistência (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Resistência (kg/mm ²)	Amostra	Limite de Resistência (kg/mm ²)
N ₁₂	102,46	N ₂₂	<u>100,18</u>	N ₃₂	<u>96,30</u>
F ₁₂	99,41	F ₂₂	<u>92,61</u>	F ₃₂	<u>91,64</u>
R ₁₂	99,99	R ₂₂	<u>92,97</u>	R ₃₂	<u>90,55</u>

Pela tabela 6 da página 35 vê-se que o desvio padrão para o limite de resistência com um nível de confiança de 99% é da ordem de 6,70 kg/mm². Isto nos dá a certeza de que as diferenças que aparecem na tabela 15 para a velocidade de deformação intermediária são altamente significativas .

A figura ao lado ilustra os dados da tabela 15. Note-se que à mais alta velocidade de deformação o limite de resistência do material no estado estrutural frágil é cerca de

5 kg/mm^2 menor que o do material não fragilizado, o mesmo acontecendo com o do material regenerado.

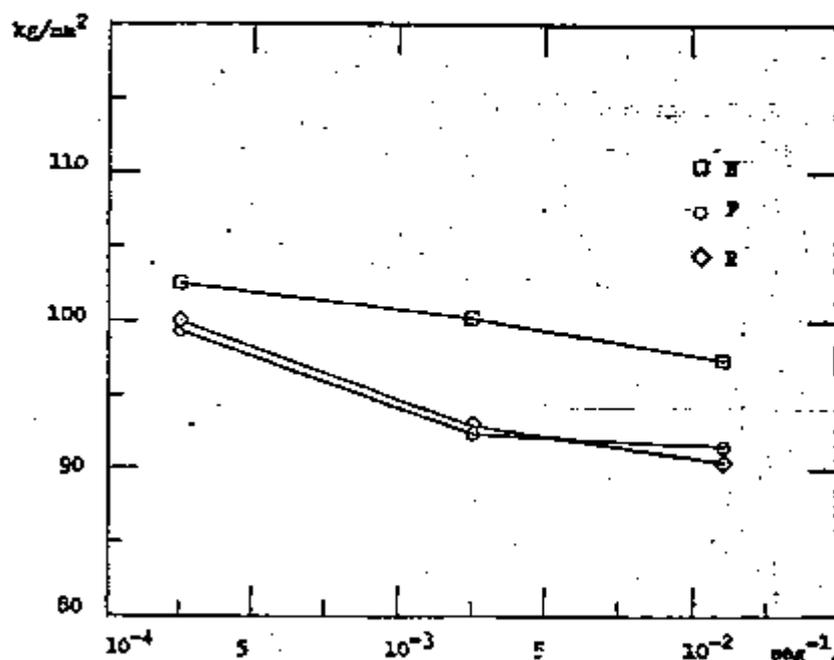


Fig. 12 - Limite de resistência x velocidade de deformação a 250°C.

3.1.4 - Temperatura do Ensaio : 300°C.

A tabela 16 da página seguinte apresenta os resultados dos ensaios a 300°C. O limite de resistência das amostras F₁₃ guardam uma diferença de cerca de 7 kg/mm^2 em relação ao das amostras N₁₃, enquanto as amostras R₁₃ mostram uma diferença

de apenas de cerca de 5 kg/mm^2 , medidas estas que permitem um nível de confiança de 99% e de 95%, respectivamente.

Tabela 16 - Limites de resistência a 300°C .

Amostra	Limite de Resistência (kg/mm^2)	Amostra	Limite de Resistência (kg/mm^2)	Amostra	Limite de Resistência (kg/mm^2)
N_{13}	99,26	N_{23}	98,04	N_{33}	96,75
F_{13}	92,53	F_{23}	97,53	F_{33}	94,36
R_{13}	94,43	R_{23}	93,20	R_{33}	93,62

É importante notar que as amostras N_{23} e F_{23} possuem os mesmos limites de resistência à velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ enquanto as amostras R_{23} mostram uma diferença razoavelmente significativa com as primeiras.

A velocidade de $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ os limites de resistência são praticamente iguais.

Pelo gráfico da figura 13 (página seguinte) verifica-se facilmente que o limite de resistência do material não fra-

gilizado é o único que sofre uma influência algo pronunciada da velocidade de deformação a esta temperatura de ensaio.

O autor chama a atenção para estes resultados a 300°C pela importância que eles irão assumir na discussão, no próximo capítulo.

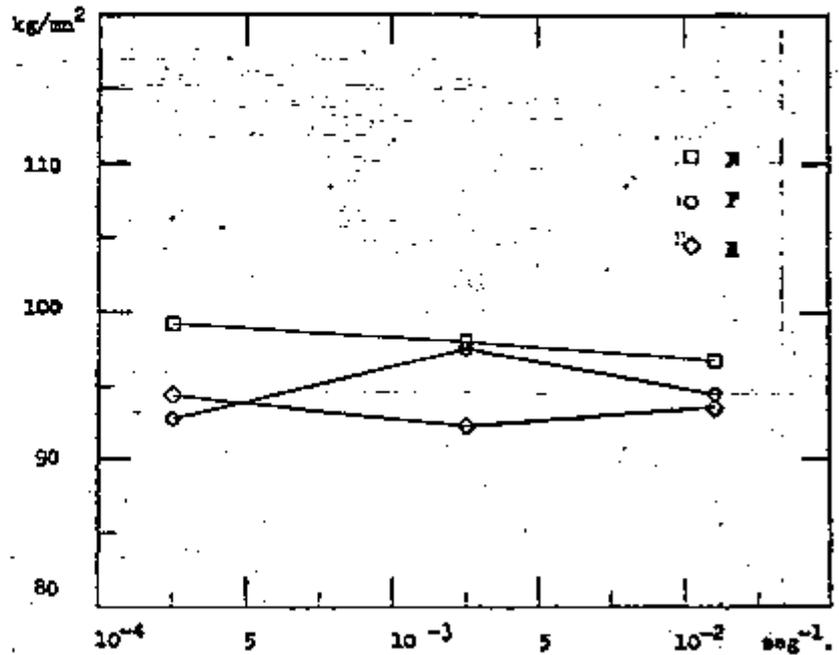


Fig. 13 - Índice de resistência x velocidade de deformação a 300°C.

3.2 - Efeito da Temperatura

3.2.1 - Velocidade de Deformação :

$$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1} .$$

O gráfico da figura 14 mostra o efeito da temperatura

sobre o limite de resistência à velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$.

Como podemos observar as diferenças mais significativas aparecem a 25°C . A 300°C também notamos uma diferença bastante razoável entre os corpos de

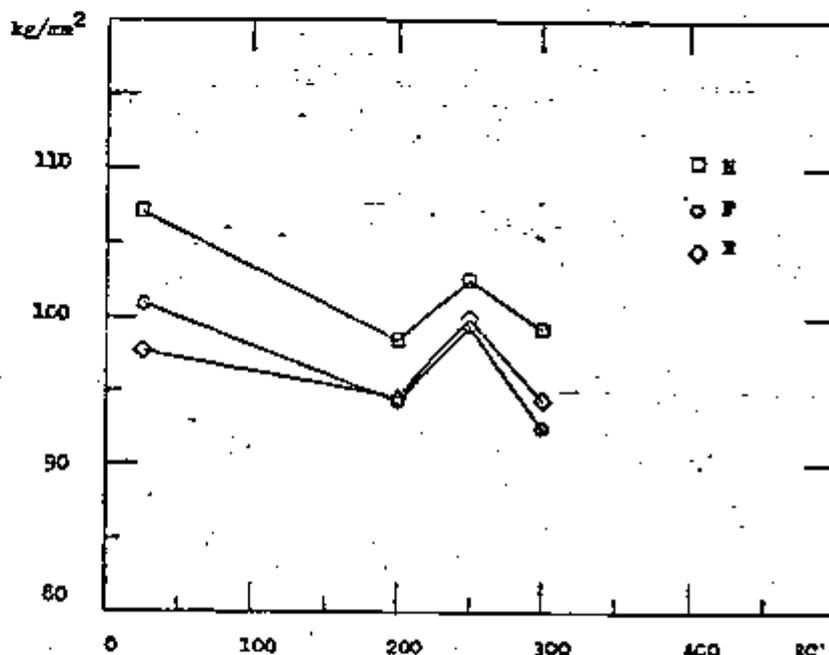


Fig. 14 - Limite de resistência x temperatura a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$.

prova fragili-

zados e não fragilizados. A 200°C e a 250°C os resultados são praticamente iguais.

3.2.2 - Velocidade de Deformação :

$$2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$$

Os efeitos da temperatura sobre o limite de resistência estão mostrados no gráfico da figura 15, na página seguinte.

Verifica

mos que a esta

velocidade de

deformação não

há diferença al

guma entre as a

mostras fragili

zadas e não frá

geis, embora en

tre estas e as

regeneradas pos

samos notar uma

diferença que podemos considerar significativa, a 250°C.

A única diferença significativa notável aparece à temperatura de 250°C, onde o limite de resistência do material regenerado é igual ao do fragilizado.

Notemos que a 300°C as amostras fragilizadas têm o mesmo limite de resistência.

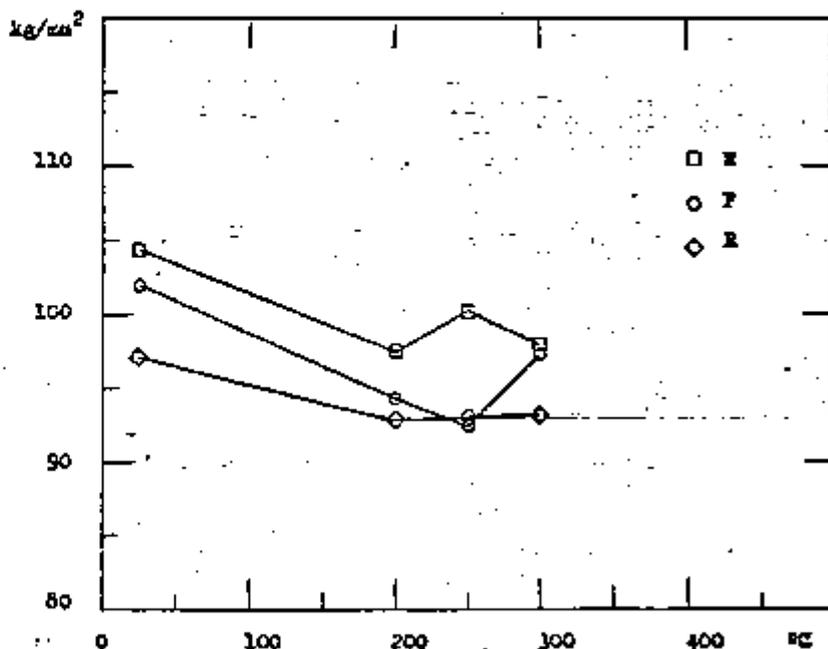


Fig. 15 - Limite de resistência x temperatura a $2,5 \cdot 10^{-3} \text{seg}^{-1}$.

3.2.3 - Velocidade de Deformação :

$$1,0 \cdot 10^{-2} \text{seg}^{-1}$$

O gráfico

da figura ao lado mostra que a esta velocidade o limite de resistência das amostras frágeis e regeneradas são iguais em todas as temperaturas estudadas.

Podemos no

ter, entretanto, que a 25°C e a 250°C existem pequenas porém sensíveis diferenças entre estas e as não frágeis.

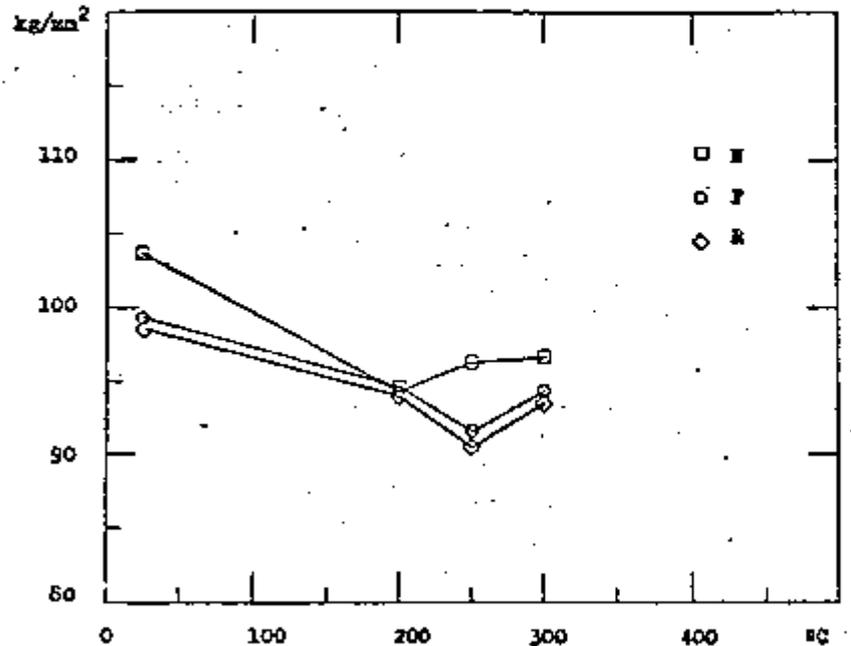


Fig. 16 - Limite de resistência x temperatura a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{seg}^{-1}$.

IV.B.4 - Alongamento .

4.1 - Efeito da Velocidade de Deformação .

4.1.1 - Temperatura do Ensaio : 25°C .

A tabela 17 mostra o alongamento a 25°C do aço 4340 nas três velocidades de deformação selecionadas. De acordo com a convenção estabelecida os índices 10, 20 e 30 designam as velocidades de $2,5 \cdot 10^{-4}$, $2,5 \cdot 10^{-3}$ e $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$, respectivamente, e a temperatura de 25°C.

Tabela 17 - Alongamentos a 25°C.

Amostra	Alongamento (%)	Amostra	Alongamento (%)	Amostra	Alongamento (%)
N ₁₀	<u>18,81</u>	N ₂₀	<u>15,17</u>	N ₃₀	14,42
F ₁₀	<u>15,10</u>	F ₂₀	<u>16,96</u>	F ₃₀	15,53
R ₁₀	<u>17,87</u>	R ₂₀	<u>18,81</u>	R ₃₀	14,96

À velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ os corpos de prova não frágeis e regenerados apresentam o mesmo alongamento praticamente. Entre as amostras N₁₀ e F₁₀ há uma diferença altamente significativa de cerca de 3,60%, o que nos dá um nível de confiança de mais de 99%. No entanto, em relação ao material regenerado esta diferença é menor

embora admita um nível de confiança de mais de 99% .Notemos que a esta velocidade de deformação o valor do alongamento do material fragilizado é menor do que os do não frágil e do regenerado .

A velocidade de deformação intermediária a diferença entre o alongamento do material fragilizado e o do material não frágil é de

cêrca de 1,80%

admitindo um nível de confiança de mais de 95%, sendo que desta vez, o valor do primeiro é maior do que o do segundo. Entre aquêle e o material regenerado há também uma diferença significativa com um nível de certeza de mais de 95%, enquanto entre o último e o não frágil êste nível é maior do que 99% . É importante observar-se que o alongamento do material não fragilizado assume o menor valor .

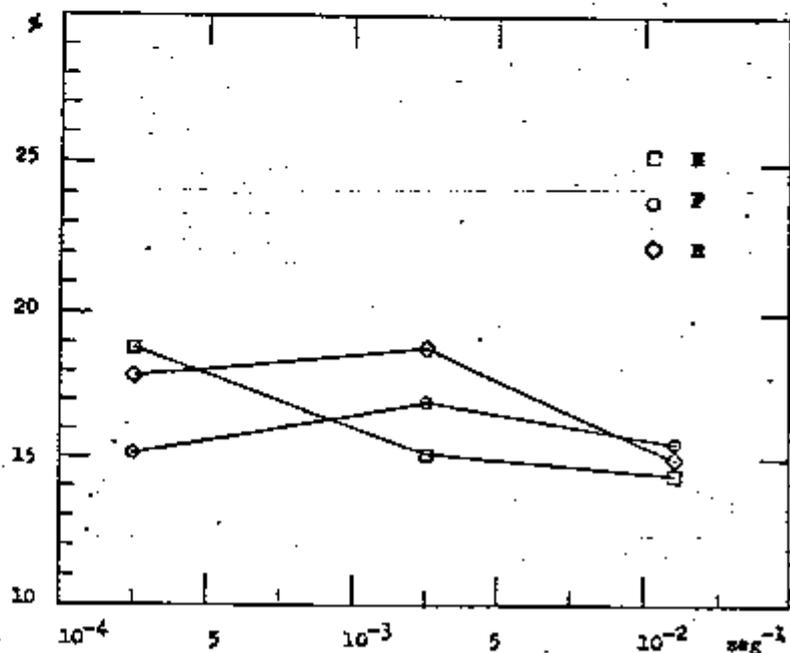


Fig. 17 - Alongamento x velocidade de deformação a 25°C.

4.1.2 - Temperatura do Ensaio : 200°C.

A esta temperatura apenas à menor velocidade de de -
formação aparecem algumas diferenças significativas. A ta -
bela abaixo mostra os resultados alcançados .

Tabela 18 - Alongamentos a 200°C.

Amostra	Alongamento (%)	Amostra	Alongamento (%)	Amostra	Alongamento (%)
N ₁₁	<u>13.69</u>	N ₂₁	13,82	R ₃₁	13,80
F ₁₁	<u>16.37</u>	F ₂₁	14,97	F ₃₁	<u>14.25</u>
R ₁₁	<u>14.51</u>	R ₂₁	14,52	R ₃₁	<u>12.79</u>

Como podemos observar, entre as amostras N₁₁ e F₁₁ existe uma diferença altamente significativa. Entre as primeiras e as regeneradas o nível de confiança é de 95%. O fato mais importante é que os valores de alongamento do material fragilizado em todas as velocidades de deformação actu

dadas são maiores do que os do material regenerado e do material não frágil, o que pode ser visto facilmente pela figura 20 ao lado. Note-se também que

a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$

o material regenerado apresenta um alongamento de cerca de 1,85% menor do que o do material fragilizado.

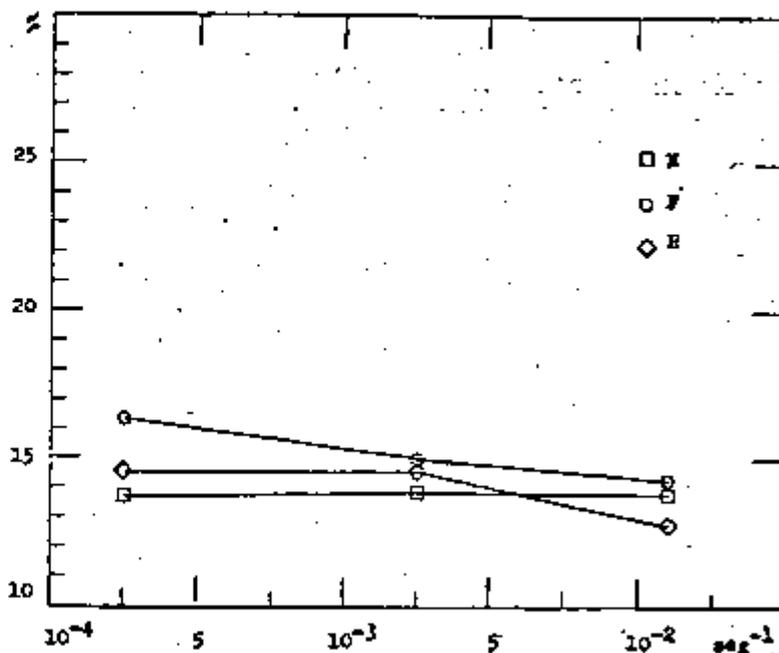


Fig. 18 - Alongamento x velocidade de deformação a 200°C.

4.1.3 - Temperatura do Ensaio : 250°C .

A tabela 19 mostra os alongamentos a 250°C . A nomenclatura das amostras é a adotada até aqui, ou seja, os índices 12, 22 e 32 representam as velocidades de $2,5 \cdot 10^{-4}$, $2,5 \cdot 10^{-3}$ e $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ à temperatura de 250°C.

Tabela 19 - Alongamentos a 250°C .

Amostra	Alongamento (%)	Amostra	Alongamento (%)	Amostra	Alongamento (%)
N ₁₂	<u>16,30</u>	N ₂₂	15,25	N ₃₂	<u>12,74</u>
F ₁₂	<u>13,86</u>	F ₂₂	15,08	F ₃₂	<u>13,35</u>
R ₁₂	<u>15,33</u>	R ₂₂	14,87	R ₃₂	<u>16,46</u>

A velocidade de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ as amostras N₁₂ e F₁₂ guardam diferença bastante significativa, de mais de 2,50%, o que dá um nível de confiança de mais de 99%. Entre o material frágil e o regenerado esta diferença admite um nível de certeza de 95%. Não há diferenças entre o último e o material não fragilizado.

A velocidade de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ os alongamentos dos corpos de prova não fragilizados e fragilizados são praticamente iguais (mais ou menos 13%) enquanto o do material regenerado é de 16,50%, aproximadamente, o que nos garante um

nível de certeza de mais de 99% .

A figura
ao lado mostra o
gráfico dos ensa-
ios a 250°C. No-
te-se que à ve-
locidade de de-
formação inter-
mediária os along-
amentos do aço
AISI 4340 nos
três estados es-

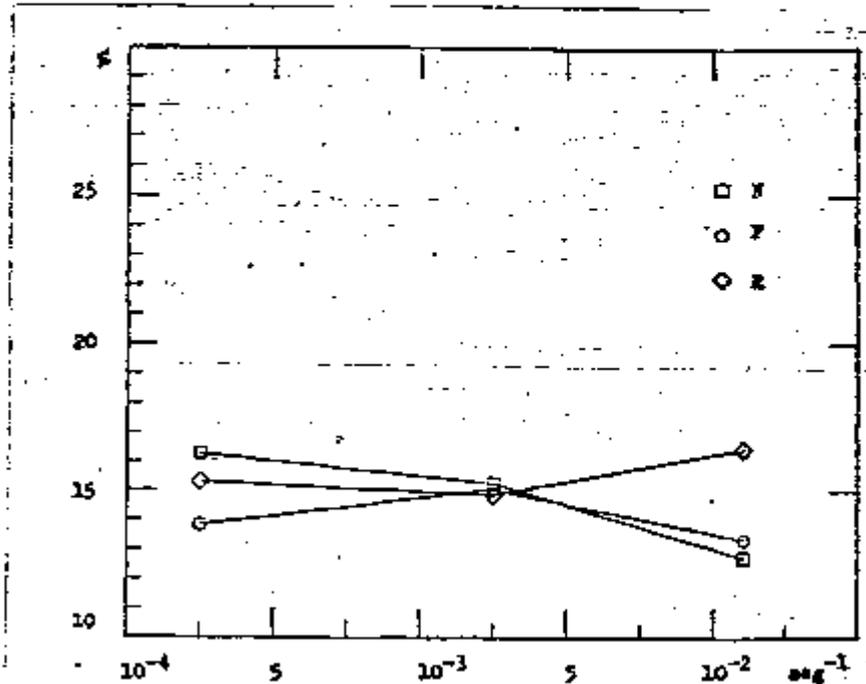


Fig. 19 - Alongamento x velocidade de deformação a 250°C.

truturais redu-
zem-se a um ponto de entôrno bastante pequeno.

4.1.4 - Temperatura do Ensaio : 300°C.

Os alongamentos obtidos nos ensaios realizados a esta temperatura estão apresentados na tabela 20. Aqui, ao contrário do que acontece a 200°C (figura 18), o material fragilizado possui os menores valores em tôdas as velocidades .

Tabela 20 - Alongamentos a 300°C.

Amostra	Alongamento (%)	Amostra	Alongamento (%)	Amostra	Alongamento (%)
N ₁₃	<u>16,97</u>	N ₂₃	<u>22,75</u>	N ₃₃	<u>15,30</u>
F ₁₃	<u>14,76</u>	F ₂₃	<u>14,90</u>	F ₃₃	<u>13,32</u>
R ₁₃	<u>17,63</u>	R ₂₃	<u>20,10</u>	R ₃₃	<u>16,39</u>

Como podemos observar, à velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ os alongamentos dos materiais não fragilizados e regenerados são praticamente iguais e guardam uma diferença significativa com o do material frágil de mais de 2,20% , o que nos garante um nível de certeza de mais de 99% .

À velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ encontramos diferenças altíssimas entre as amostras F₂₃ e as N₂₃ e R₂₃ , sendo que entre as duas primeiras obtivemos uma discrepância de quase 8% e entre as primeiras e as últimas é de 5% .

As diferenças entre o material no estado frágil e nos dois outros estados aparecer também a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ com um ní

vel de confiança
mínimo de 99% .

A figura
nº 20, ao lado ,
mostra o gráfico
dos alongamentos
obtidos a 300°C.
Note-se a grande
diferença que a-
parece à veloci-
dade de deforma-
ção intermediária .

Note-se também que a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ e a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ esta di-
ferença é bastante visível, embora seja menor.

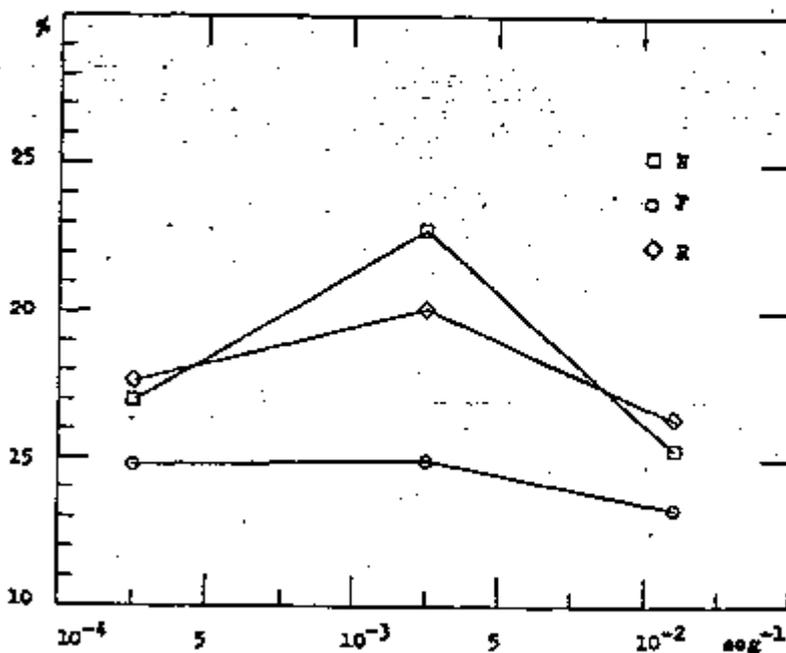


Fig. 20 - Alongamento x velocidade de deformação a 300°C.

4.2 - Efeito da Temperatura

4.2.1 - Velocidade de Deformação :

$$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1} .$$

A figura 21 mostra a influência da temperatura sobre

o alongamento à velocidade de de formação de menor valor, isto é, $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$. Observe-se que a 25°C existe uma diferença significativa entre as amostras frágeis e as regeneradas e não frá-

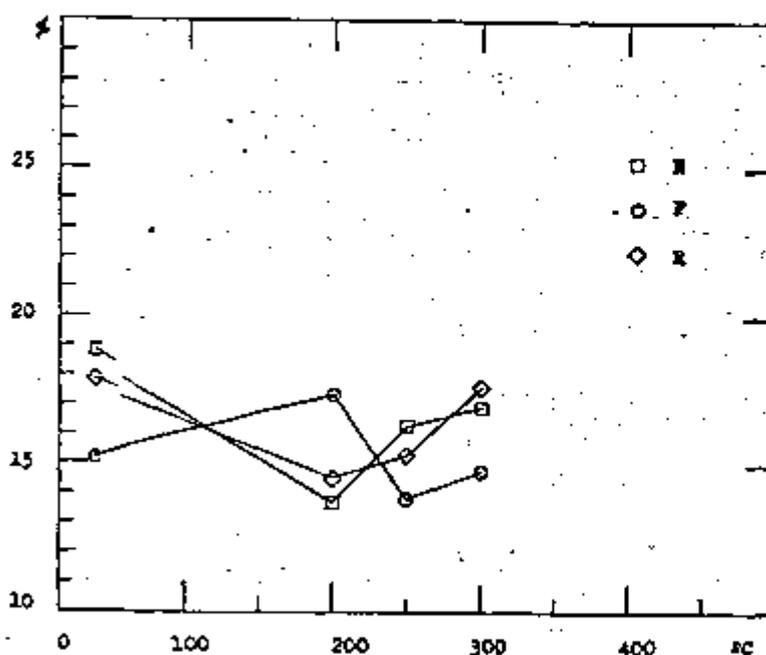


Fig. 21 - Alongamento x temperatura a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$.

geis, as quais possuem praticamente o mesmo valor que é maior do que o das amostras fragilizadas. A 200°C ocorre o que poderíamos chamar de uma inversão, isto é, continuam a haver diferenças significativas, sendo que, agora, o maior alongamento pertence aos corpos a prova fragilizado. A partir desta temperatura o alongamento do material frágil começa a decrescer enquanto o dos outros dois principiam a aumentar. A 250°C ocorre outra inversão, mas, desta vez, a diferença entre as amostras fragilizadas e as regeneradas admitem um ní-

vel de confiança de apenas 95%, enquanto entre aquelas e as não frágeis este nível é maior do que 99%.

A 300°C, temperatura para a qual chamamos atenção, não ocorre mais nenhuma inversão e as diferenças entre as amostras frágeis e regeneradas e não frágeis admitem um nível de confiança de 99%.

4.2.2 - Velocidade de Deformação :

$$2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}.$$

A figura ao lado apresenta o efeito da temperatura sobre o alongamento à velocidade de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$. A diferença entre o material frágil e o não frágil a 25°C,

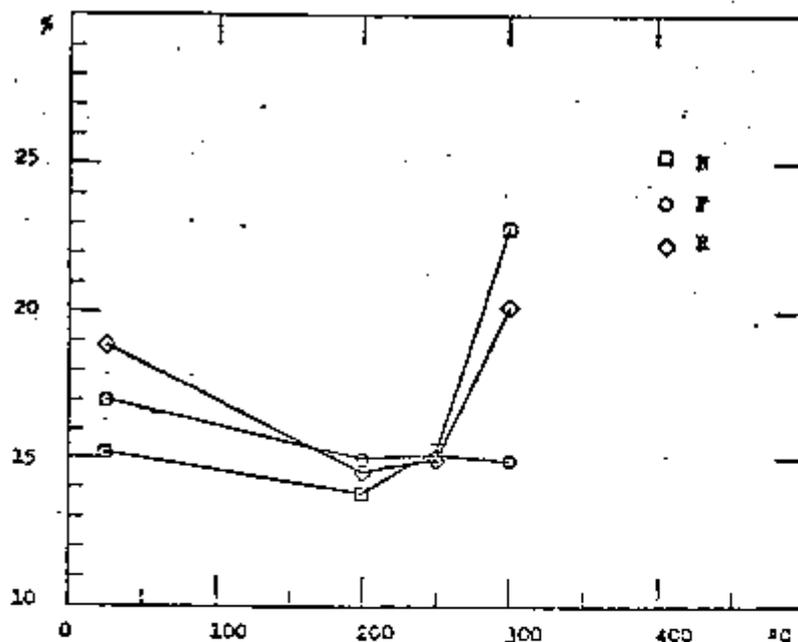


Fig. 22 - Alongamento x temperatura a $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$.

admite um nível de certeza de mais de 95%, o mesmo acontecendo em relação ao material regenerado. Entre este e o não frágil a diferença admite um nível bem maior do que 99%.

As diferenças mais significativas aparecem a 300°C, fato este já bastante comentado anteriormente.

4.2.3 - Velocidade de Deformação :

$$1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}.$$

O gráfico da figura 23 dá uma idéia do efeito da temperatura sobre o alongamento à mais alta velocidade de deformação estudada. Note-se que apenas a 250 e 300°C existem diferen-

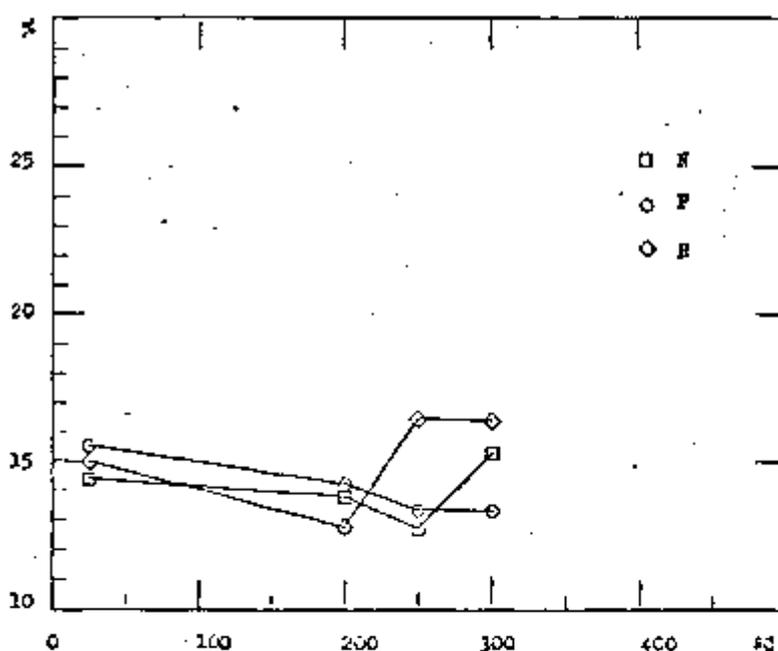


Fig. 23 - Alongamento x temperatura a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$.

ças significativas, sendo que a 250°C os alongamentos do material frágil e não frágil são praticamente iguais e à temperatura de 300°C o mesmo acontece com o último e o regenerado.

IV.B.5 - Estricção .

5.1 - Efeito da Velocidade de Deformação .

5.1.1 - Temperatura do Ensaio : 25°C.

A tabela 21 mostra os resultados obtidos a 25°C.

Tabela 21 - Estricção a 25°C

Amostra	Estricção (%)	Amostra	Estricção (%)	Amostra	Estricção (%)
N ₁₀	63,70	N ₂₀	67,59	N ₃₀	66,74
F ₁₀	64,26	F ₂₀	65,06	F ₃₀	65,76
R ₁₀	67,19	R ₂₀	68,31	R ₃₀	64,33

Pela ta-
 bela 21 e pela
 figura 24 ve-
 mos que apenas
 à mais baixa ve-
 locidade de de-
 formação existe
 uma pequena di-
 ferença entre a
 estricção do ma-
 terial fragili-
 zado e o regene-

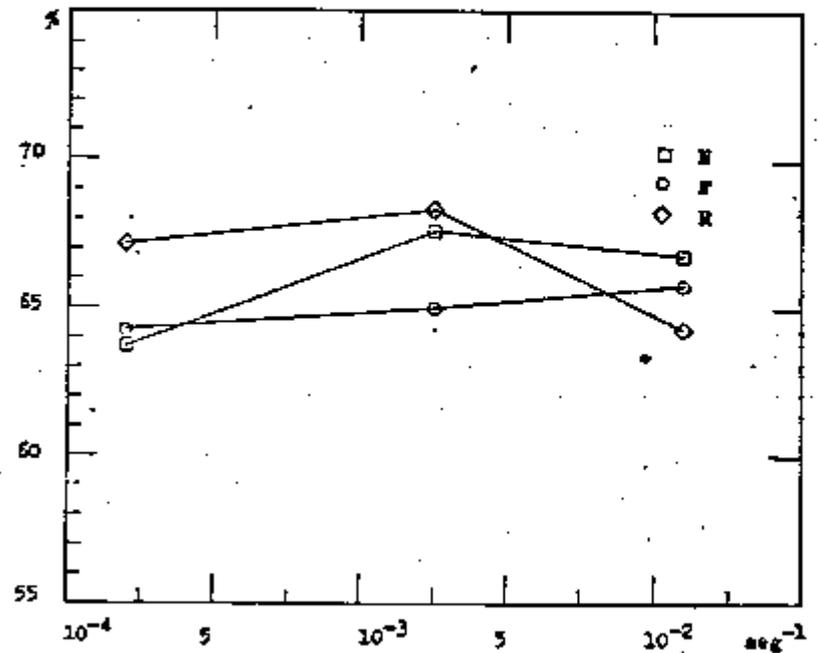


Fig. 24 - Estricção x velocidade de deformação a 25°C.

nerado, de cerca de 3%, o que nos dá um nível de confiança de somente 90%, e que tendo em vista as outras propriedades mecânicas, nos parece muito pouco. Nas outras velocidades de deformação esta diferença é ainda menor, embora à velocidade intermediária possamos aceitar um nível de certeza de 90% entre o material frágil e o material nos outros dois estados estruturais. Note-se, entretanto, que entre a estricção do material não frágil a $2,5 \cdot 10^{-4}$ e $2,5 \cdot 10^{-3}$ seg^{-1} há uma diferença que admite o mesmo nível de confiança, o mesmo aconte-

cendo com o material regenerado entre $2,5 \cdot 10^{-3}$ e $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$.
O material fracionado praticamente não varia com a velocidade de deformação.

5.1.2 - Temperatura do Ensaio : 200°C .

A tabela 22 apresenta as estirções do aço AISI 4340 que foram obtidas nos ensaios realizados a 200°C.

Tabela 22 - Estirção a 200°C.

Amostra	Estirção (%)	Amostra	Estirção (%)	Amostra	Estirção (%)
N ₁₁	61,53	N ₂₁	65,19	N ₃₁	62,19
F ₁₁	61,22	F ₂₁	63,10	F ₃₁	62,20
R ₁₁	61,63	R ₂₁	63,98	R ₃₁	65,14

A esta temperatura não aparecem diferenças notáveis, a não ser à mais alta velocidade de deformação, onde as amostras R₃₁ apresentam uma estirção cerca de 3% maior do que as ou -

tras duas (que são iguais) , o que nos dá um nível de confiança de 95% .

A figura

25 ilustra os resultados da tabela 22. Note-se que o material regenerado varia crescentemente com a velocidade de deformação e, a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ sua estricção é cerca de 3,50%

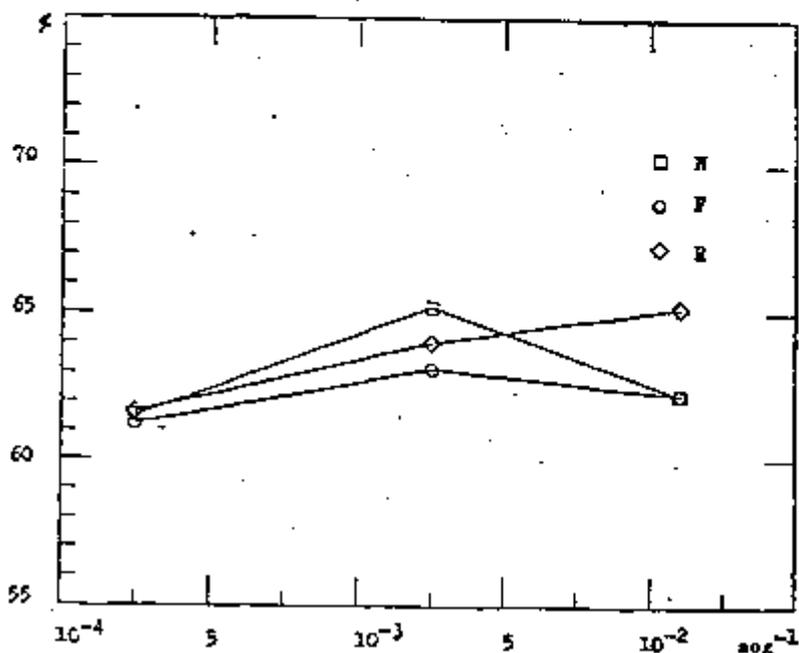


Fig. 25 - Estricção x velocidade de deformação a 200°C .

maior que esta propriedade a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$, o que nos fornece um nível de certeza de 99%. O material não fragilizado também se comporta semelhantemente em relação à velocidade intermediária e menor.

5.1.3 - Temperatura do Ensaio : 250°C.

Estes resultados são encontrados na tabela 23.

Tabela 23 - Estricção a 250°C .

Amostra	Estricção (%)	Amostra	Estricção (%)	Amostra	Estricção (%)
N ₁₂	<u>56,50</u>	N ₂₂	61,28	N ₃₂	<u>65,47</u>
F ₁₂	<u>62,06</u>	F ₂₂	62,49	F ₃₂	<u>59,73</u>
R ₁₂	<u>61,74</u>	R ₂₂	62,72	R ₃₂	<u>63,52</u>

Como podemos observar, a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ existe uma diferença de cerca de 5,5% entre as amostras N₁₂ e F₁₂ e de cerca de 5% entre as primeiras e as R₁₂, o que nos faz admitir um nível de certeza de mais de 95%. É importante observar que a menor estricção pertence ao material não frágil e que a do material regenerado é praticamente igual à do material fragilizado.

A velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ não apresenta diferença significativa alguma.

A velocidade de deformação de $1, \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ apresenta di-

ferenças significativas entre as amostras fragilizadas e as outras duas. A estrição das amostras frágeis é cerca de 6% menor do que a das não frágeis e cerca de 4%

menor do que

as regeneradas, o que dá um nível de confiança maior do que 99% .

A figura 26 ilustra o que acabamos de dizer . Note-se que a estrição do material fragilizado decresce com o aumento da velocidade de deformação , enquanto a do material não frágil aumenta com esta variável. O material regenerado não sofre uma variação detetável.

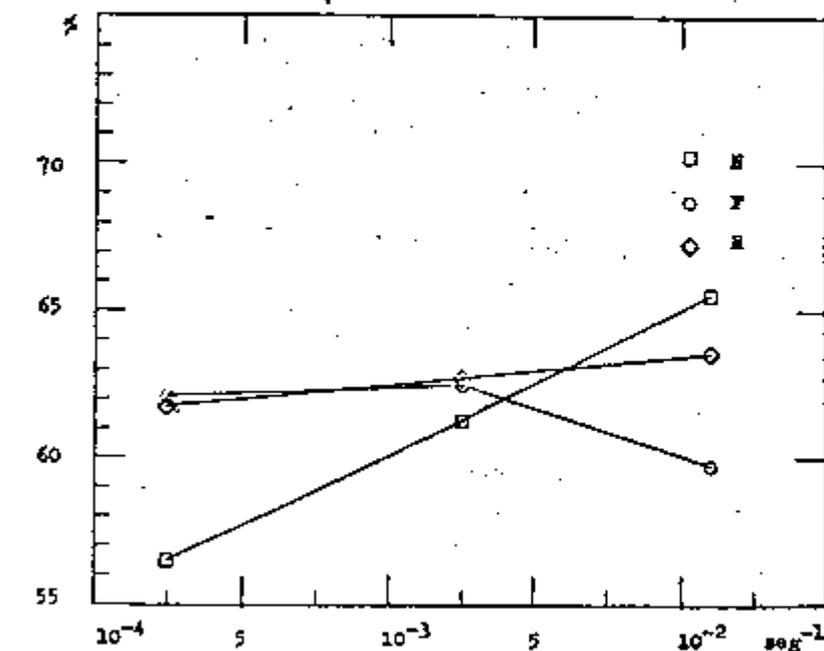


Fig. 26 - Estrição ϵ x velocidade de deformação a 250°C.

5.1.4 - Temperatura do Meio : 200°C.

O autor chama a atenção para os resultados obtidos a esta temperatura e que estão catalogados na tabela 24 .

Tabela 24 - Estricção a 300°C.

Amostra	Estricção (%)	Amostra	Estricção (%)	Amostra	Estricção (%)
N ₁₃	<u>54,40</u>	N ₂₃	<u>66,05</u>	N ₃₃	60,08
F ₁₃	<u>62,05</u>	F ₂₃	<u>61,42</u>	F ₃₃	59,37
R ₁₃	<u>70,02</u>	R ₂₃	<u>69,99</u>	R ₃₃	60,40

A $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ a diferença entre a estricção do material fragilizado e não frágil é de cerca de 2,35% , que admite um nível de certeza de apenas 95% . No entanto, entre o material regenerado e o frágil a diferença é de 2% e entre o não frágil e o primeiro é de 5,5% aproximadamente , admitindo um nível de certeza de no mínimo 99% .

A $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ nota-se que a estricção do material é a menor das três e que admite um nível de confiança de 99% em relação aos outros dois , sendo que em relação ao regenerado esta diferença é de 8,5% .

O material não fragilizado sofre um decréscimo bastante razoável com o aumento da velocidade de deformação, a partir da velocidade intermediária até a mais alta. O mesmo não acontece com os ma-

teriais frágeis e regenerados, os quais não sofrem com a variação da velocidade a esta temperatura.

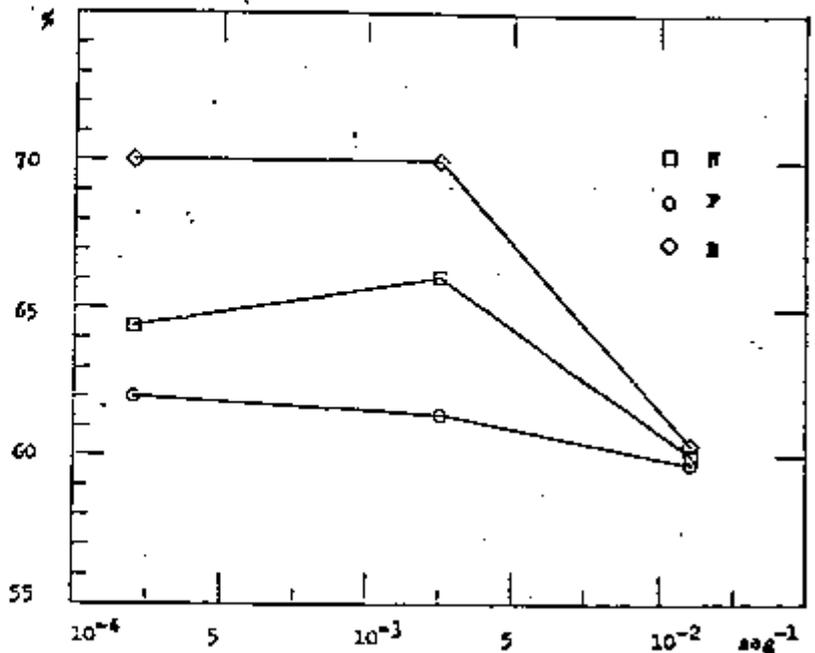


Fig. 27 - Estricção x velocidade de deformação a 300°C.

5.2 - Efeito da Temperatura

5.2.1 - Velocidade de Deformação :

$$2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$$

A figura 28 de número seguinte ilustra o efeito de tem

peratura sobre a estrição do aço AISI 4340 nos seus três estados estruturais em estudo, à velocidade mais baixa.

O gráfico nos mostra que, de acordo com o critério adotado, não existem diferenças significativas entre o material nos seus diversos estados estruturais nem a 25°C nem

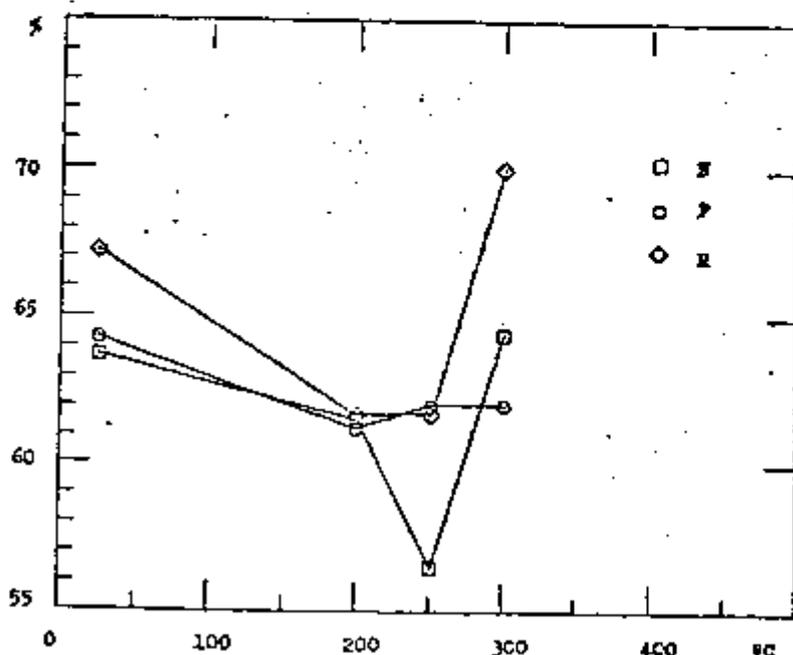


Fig. 23 - Estrição x temperatura a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{seg}^{-1}$.

a 200°C. No entanto, a 250°C a estrição do material não frágil é cerca de 5% menor do que a do material frágil e do que a do material regenerado, as quais são praticamente iguais, o que admite um nível de confiança de mais de 99%. A 300°C, é de se notar a grande diferença entre o material regenerado e o frágil, assim como entre o não frágil e o não fragilizado; observe-se também que o nível de confiança admi

tido pela diferença de valores da estrição entre o material frágil e o material não frágil é de apenas 95% .

5.2.2 - Velocidade de Deformação :

$$2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1} .$$

A figura

29 mostra a influência da temperatura sobre a estrição do material em estudo, nos seus três estados estruturais. A velocidade considerada podemos

notar que as ú-

nicas diferenças significativas aparecem apenas a 200°C. As amostras N_{33} guardam uma discrepância de cerca de 5% das amostras F_{33} , as quais possuem a menor estrição, e de cerca

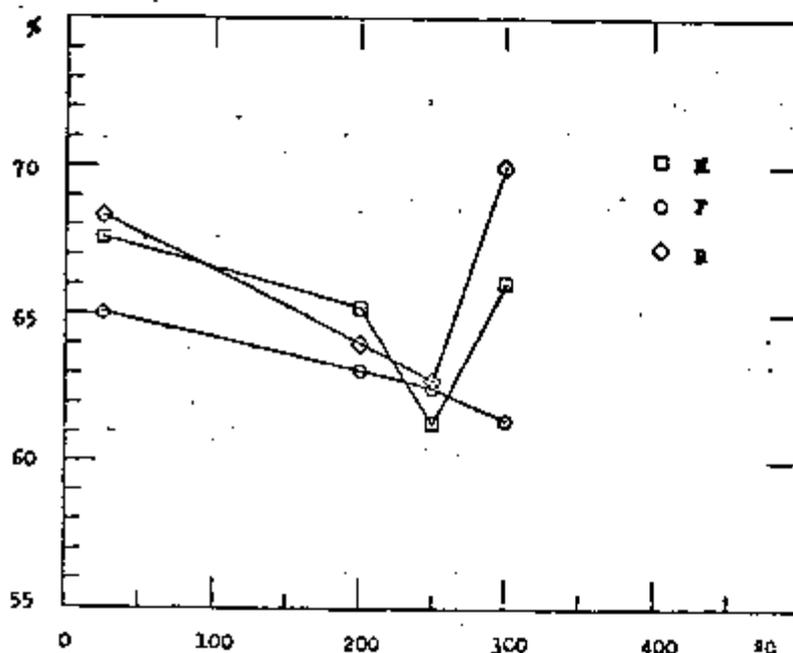


Fig. 29 - Estrição x temperatura a $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$.

de 5% das regeneradas, as quais possuem a maior estriçãoção .
 O autor chama a atenção para estes resultados a 300°C.

5.2.3 - Velocidade de Deformação :

$$1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}.$$

A figura 30 mostra as curvas levantadas à maior velocidade de deformação estudada. Como podemos observar, a 200°C aparece uma certa diferença entre a estriçãoção do material regenerado e as dos outros

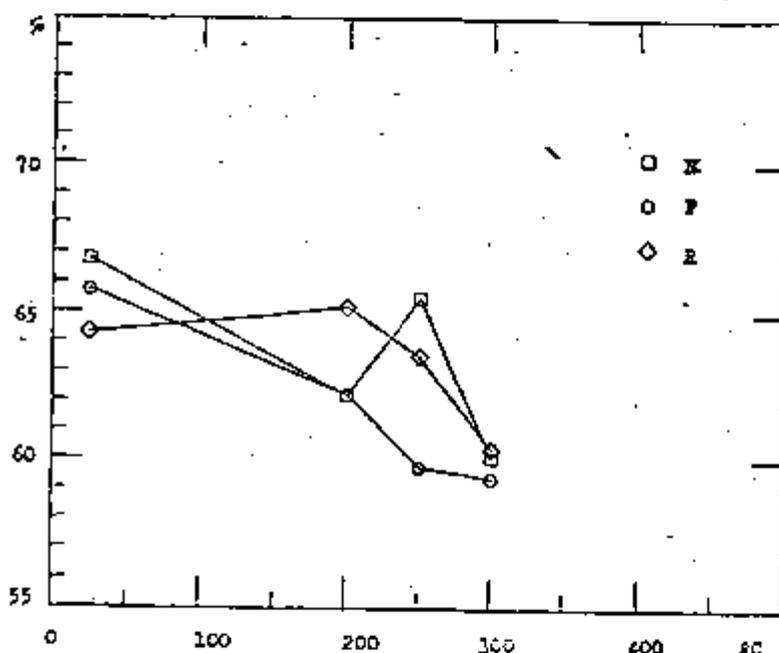


Fig. 30 - Estriçãoção x temperatura a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$.

dois, admitindo um nível de confiança de 95%. As diferenças realmente significativas só aparecem a 250°C.

IV.C - Ensaio de Dureza .

No ítem III.5, p. 17, já dissemos como haviam sido compilados os resultados dos testes de dureza. Estes resultados foram obtidos para os estados estruturais (não frágil, fragilizado e regenerado) em estudo do aço AISI 4340. Como os resultados alcançados tinham valores muito próximos, não achamos necessário realizar uma análise estatística dos mesmos, uma vez que só nos interessariam a existência de diferenças realmente significativas. A tabela 25 apresenta os valores alcançados nos testes referidos acima.

Tabela 25 - Durezas do aço 4340 nos estados estruturais não frágil, frágil e regenerado.

amostras	Dureza Rc
N	29
F	28
R	26

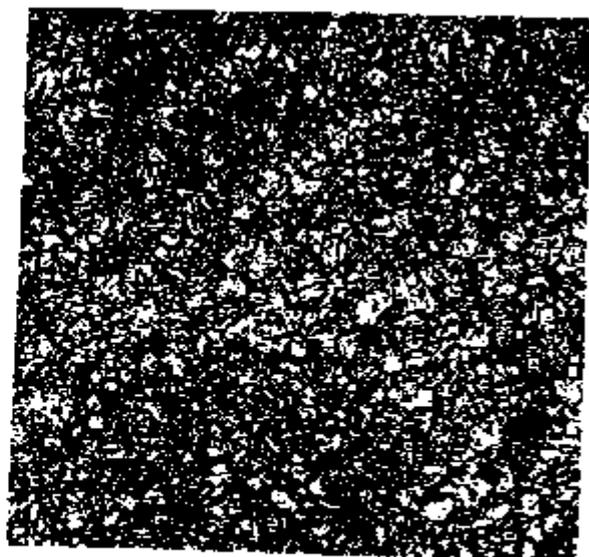
IV.D - Investigações Metalográficas.

O autor chama a atenção para o método de polimento diferencial utilizado. Como sabemos, havia um interêsse fundamental em revelar os contornos dos grãos da antiga austenita. O essencial era verificar se existiam diferenças na textura entre os três estados estruturais do aço em observação. Portanto, o que se impunha é que os ataques fossem realizados em tempos absolutamente iguais, e, além disso, que os polimentos posteriores ("light polishing") fossem efetuados com a mesma concentração de alumina no fêltro (evidentemente, a mesma alumina, isto é, com o mesmo tamanho de grão), a mesma pressão sobre a amostra e no mesmo intervalo de tempo. Este procedimento foi rigorosamente observado, tanto quanto possível. As figuras 31 (a), (b) e (c) foram dispostas na mesma página a fim de facilitar as comparações.

As figuras 32 e 33 da p. 85 mostram o aço AISI 4340 logo após o tratamento de têmpera (resfriamento ao óleo), com dois aumentos diferentes.

Fig. 31 - Aspectos metalográficos do aço em estudo: (a) Aço 4340 não frágil; (b) Aço 4340 fragilizado ; (c) Aço 4340 regenerado .
Aumento de 300x , para as três fotografias.

a)



b)



c)



Fig. 32 - Aço
AISI 4340 após t ê mpera.
ra. Aumento: 921 x .

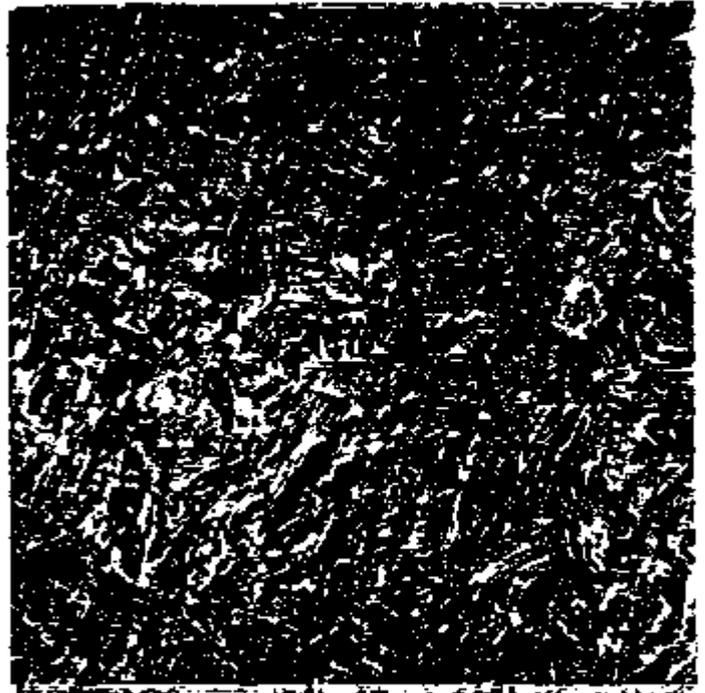


Fig. 33 - Aço AISI 4340
após t ê mpera. Aumento de
1840 x .

IV.E - Fratografia.

As fratografias da página 87 foram obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura a fim de mostrar um curioso tipo de fratura já conhecido e citado por Lea e Arnold e citado no trabalho de Hollomon¹⁴ em 1946. A grande diferença é que os autores citados mostraram que esta aparência (estrêla) seria típica do material fragilizado, o que não foi confirmado pelo presente trabalho. O tipo de fratura que constatamos é comum para os materiais não frágil, frágil e regenerado. Chamamos a atenção apenas para o fato de que à temperatura ambiente nem em tôdas as velocidades de deformação aparecem estas fraturas em estrêla. As condições do nosso ensaio foram: 25°C e $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$. Não conhecemos as condições em que foram realizados os ensaios daqueles pesquisadores nem a composição do aço utilizado.

As fratografias da página 88 mostram o aço em estudo nos estados não frágil e fragilizado ensaiados a -195°C e à mesma velocidade de deformação das amostras anteriores.

Fig. 34 - Fratografias do Aço AISI 4340 obtidas no Stereoscan (Microscópio Eletrônico de Varredura) .



b) Fragilizado. Aumento de 28 x .



a) Não fragilizado. Aumento de 24 x.

c) Regenerado. Aumento de 25 x .



Fig. 35 - Fratografias do aço AISI 4340 ensaiado a tração à temperatura de -196°C , à velocidade de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{seg}^{-1}$.

a) Material não frágil ;
aumento: 25X

b) Material frágil; aumento : 27 X

c) Material regenerado ;
aumento : 23X .

As fratógrafias foram obtidas em um ângulo de inclinação da amostra igual a 49° .



V - DISCUSSÃO

Como sabemos o grau de fragilização é dado pelo deslocamento da curva de transição do aço para a direita e é medido em graus Celsius ou Kelvin. O nível de referência adotado foi o de 5 kgm/cm^2 e a suscetibilidade encontrada foi de 50°C em relação ao material não frágil e de 40°C em relação ao material regenerado.

Pela fig. 5 observa-se que na zona dútil o material N e o material F apresentam praticamente a mesma tenacidade enquanto o material R apresenta um valor um pouco maior. Estes valores indicam uma energia e parecem evidenciar que nesta faixa entre -30°C e 20°C a tenacidade seria suscetível ao tempo e à temperatura de tratamento e que foram submetidas as amostras. Desta maneira o material R deveria se apresentar como o mais dútil, uma vez que sofreu o tratamento mais prolongado (embora descontínuos). No entanto o material N apresenta a mesma tenacidade que o material F embora o último tenha sofrido um revenido a 500°C durante 48 horas e mais que o primeiro. Isto poderia ser explicado pelo fato de que

na zona de fratura dútil as características energéticas reveladas por este tipo de ensaio seriam predominantemente determinadas pelo tratamento de temperatura mais alta. Assim, um aço submetido a um tratamento a 630°C durante 1 h teria a mesma tenacidade antes e depois de ser submetido a outro tratamento a 500°C durante 48 h. Não sabemos entretanto se poderia haver um tempo "crítico" além do qual esta energia de resistência ao choque se tornasse mais alta. Quanto ao material R sua maior tenacidade nesta região dever-se-ia ao terceiro revenido que sofreu, ou seja, ao tratamento de regeneração e não ao segundo (de fragilização).

As curvas da fig. 5 mostram o deslocamento da curva de transição do material F para a direita, o que indica uma estrutura diferente das outras duas (N e R). A tenacidade medida no ensaio de choque é uma energia e, talvez por esta razão, seja a característica mecânica do material mais afetada pelo FRR. Esta mudança (de um estado estrutural N para um estado estrutural F), segundo Sadovskii¹⁰, é devido a fatores estruturais internos e se dá quando existe uma variação na razão :

Resistências à Deformação Plástica

Resistência à Fratura Frágil

e, em consequência, o material teria passado de um estado não frágil para um estado frágil. No entanto esta análise só é válida para ensaios de tração. Se a quantidade do numerador diminuir teremos uma predominância de deformação plástica e, como definiu Cottrell²³, " a capacidade de um material deformar-se plásticamente quando submetido à tração é a ductilidade deste material " e teremos uma fratura dútil. Resta-nos relacionar o ensaio de tração com o ensaio de choque.

Adenis e Blanchard²⁴ mostram que o ensaio de choque mede uma superposição de dois efeitos: o efeito do entalhe e o efeito do impacto. Além disso, os ensaios de choque lidam com esforços triaxiais enquanto os de tração lidam com esforços uniaxiais. Woodfine¹⁶ assumiu os seguintes postulados :

a) A fratura frágil ocorre quando a maior tensão normal encontra um certo valor crítico;

b) A resistência à fratura frágil aumenta com o aumento da deformação.

Mostrou ainda que o limite de escoamento medido no ensaio de choque é maior do que o medido no ensaio de tração, devido a :

- 1) A triaxialidade dos esforços no ensaio de choque;
- 2) A alta velocidade de deformação deste ensaio.

Aplicando uma teoria desenvolvida por Orowan²⁵ mostrou também que o limite de escoamento no centro do entalhe é aproximadamente o dobro do limite de escoamento revelado no ensaio de tração.

O que os autores citados não fazem é explicar porque a FRR não acusa variações do limite de escoamento em ensaios de tração à temperatura ambiente enquanto as curvas de transição acusam o efeito do fenômeno.

Em resumo, o efeito da FRR na tenacidade de um aço suscetível ao fenômeno é :

- 1) Aumentar a temperatura na qual as amostras fraturam de uma maneira frágil;
- 2) Decrescer a energia necessária para uma fratura frágil completa;

3) Não modificar a energia necessária à fratura dútil.

Passaremos agora à análise dos ensaios de tração. Low⁹ mostrou que até 1952 não existiam evidências experimentais sobre variações significativas das propriedades físicas ou mecânicas dos aços quando submetidos à FRR, a não ser em casos de fragilização muito severa, onde foram anotadas diferenças significativas entre o valor da estrição de um material frágil e outro não frágil, tendo havido uma pequena redução do primeiro em relação ao segundo.

Davidenkov²⁷ mostrou que testes de tração realizados a baixas temperaturas eram capazes de revelar uma redução bastante razoável do limite de resistência de um aço no estado fragilizado. Woodfine¹⁶ baseando-se na teoria dos ensaios de choque e nos seus resultados em relação à FRR concluiu que a fragilização deveria baixar a resistência à fratura frágil tornando este efeito visível em ensaios de tração realizados a baixas temperaturas. Fazendo experiências em um aço altamente suscetível ao fenômeno, em ensaios de tração a -196°C , encontrou uma redução na estrição do material fragilizado, (de 57% no material não frágil passou a 35% no frágil).

A fim de verificar êstes resultados, realizamos alguns testes a -196°C , cujos resultados seguem abaixo.

Tabela 25 - Resultados dos ensaios de tração realizados a -196°C e a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{seg}^{-1}$.

Amostra	Limite de Escoamento (kg/mm^2)	Limite de Resistência (kg/mm^2)	Alongamento (%)	Estricção (%)
N	134,63	144,87	17,09	<u>47,79</u>
F	131,00	143,95	16,62	<u>40,12</u>
R	129,45	139,53	17,33	44,61

Como pode-se observar, aparecem diferenças significativas apenas na estricção, e assim mesmo bem menor do que a obtida por Woodfine. Devemos levar em conta que o grau de fragilização do nosso aço é de apenas 50°C contra 137°C obtida pelo mesmo. Além disto não sabemos a velocidade de deformação usada por Woodfine.

Foram realizados ensaios a -196°C com elongação de

temperatura e de velocidade de deformação afim de determinar as energias de ativação postas em jôgo, contudo estas experiências não tiveram sucesso pois não encontramos uma equação que se adaptasse aos dados que dispúnhamos.

Como já observamos, inúmeros pesquisadores ^{9,12,14,18} aceitam que a FRR não tem efeitos mensuráveis sôbre as propriedades mecânicas normais de um aço quando ensaiado a tração à temperatura ambiente. No entanto, nossos testes a esta temperatura acusaram alguns resultados que vão de encontro a estas afirmações, de acordo com o critério de diferenciação que definimos no capítulo anterior. Evidentemente o critério adotado tem suas limitações, para as quais chamaremos atenção mais uma vez. As principais aproximações foram:

- 1 - O pequeno número de corpos de prova das amostragens.
- 2 - O pequeno número de amostragens (apenas duas).
- 3 - A grande extrapolação dos parâmetros estatísticos. Note-se que as amostragens possuíam apenas cinco observações e que a grande maioria dos resultados refletiam uma média de somente dois corpos de prova.

Isto posto, observemos que à mais baixa velocidade

de deformação existem diferenças significativas entre o limite de escoamento, o limite de resistência e o alongamento do material N, do F e do R. Pela figura 6 e 11 nota-se que os limites de escoamento e de resistência do material R são praticamente iguais aos do material F, mas em relação ao alongamento esta igualdade é verificada entre os materiais R e N. Pela figura 17 conclui-se que os dois últimos são mais dúcteis que o material fragilizado, enquanto que pela figura 6 este aparece como mais dútil (menor limite de escoamento que o material N).

Como se sabe o limite de escoamento é medido na curva tensão x deformação no início da deformação plástica. Portanto se os limites de escoamento dos materiais frágil e regenerado são menores que o do material N, isto significa que o último é menos dútil que os dois primeiros no momento em que se inicia a deformação plástica, o que estaria de acordo com o tempo de tratamento a que foi submetido o aço em estudo.

O limite de escoamento representa mais ou menos a tensão necessária para que as discordâncias iniciem seu movimento e o alongamento medirá a maior ou menor dificuldade imposta a este movimento até o momento da fratura. Então, podemos

concluir que o material F oferece menos resistência ao início do movimento das discordâncias, mas, uma vez iniciado este movimento passa a apresentar maiores obstáculos ao movimento das discordâncias que o material N. Isto parece indicar que a FRR é um fenômeno cujo mecanismo atua essencialmente na zona de deformação plástica de um material fragilizado quando submetido a ensaios de tração. A estrição não revela quaisquer diferenças que possam ser consideradas significativas (fig. 24). Era de se esperar que esta propriedade tivesse o mesmo comportamento que o alongamento, o que não aconteceu. Como se sabe, a estrição mede a redução de área que ocorre principalmente após a formação do pescoço, o qual se inicia quando o material está submetido ao nível máximo de tensões que pode suportar uniaxialmente e que é medido pelo limite de resistência; a partir deste momento (Ditter²¹, Reed-Hill²⁸, Honeycombe²⁹, etc) o material passa a suportar um estado triaxial de tensões. A estrição, portanto, mede a deformação plástica, em sua maior parte, causada por este estado triaxial de tensões.

As outras velocidades de deformação não se constatou diferenças entre as propriedades do material frágil do não

frágil.

A 200°C o alongamento do material F é bem maior que o dos materiais N e R (fig. 21) à velocidade de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ ao contrário do que a 25°C. Isto pode ser explicado pelo mecanismo de Cottrell^{24,23} da fragilidade azul (FA). Em outras palavras, devido a este fenômeno houve uma diminuição nos alongamentos dos materiais regenerado e não frágil. Como o mesmo não acontece com o material fragilizado pode-se concluir que o mecanismo da FRR interage com o da FA, mascarando os efeitos deste fenômeno sobre as amostras fragilizadas. Note-se que a velocidades mais altas estas diferenças não existem, o que indicaria não haver tempo suficiente para que esta interação se realizasse. (fig. 22 e 23).

A 250°C encontram-se diferenças significativas entre os limites de escoamento (fig. 6, parte inferior), os limites de resistência (fig. 12), o alongamento (fig. 19) e a estrição (fig. 26).

Pela fig. 19 observa-se que o limite de escoamento do material fragilizado diminui com a temperatura de uma forma contínua a $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$, não parecendo sentir os efeitos da FA, o mesmo acontecendo com o material R até 250°C. Isto significa que até esta temperatura o mecanismo da FA interage

com o da FRR, ficando impedida de atuar sobre estes materiais.

A fig. 21 mostra que o alongamento do material F, a esta temperatura e a mais alta velocidade de deformação, sofre os efeitos da FA em maior escala que os dos materiais N ou R, ou seja, como para o limite de resistência, devido à pequena velocidade do ensaio, houve tempo suficiente para que a influência inibidora da FRR fôsse superada pela FA.

Olhando ainda para a fig. 21, notamos que a temperatura onde a FA afeta em maior grau os alongamentos dos materiais N e R é 200°C. A esta temperatura o material N é praticamente insensível a este fenômeno. A 250°C, no entanto, há uma espécie de inversão, isto é: o material F sofre mais duramente o fenômeno que os outros dois materiais, que, por sua vez também o sofrem, porém em menor escala. Em outras palavras, parece-nos que a FA é inibida pela FRR no material fragilizado até a temperatura de 200°C e, a 250°C, a FA predomina sobre a FRR no material fragilizado, tanto que seu alongamento é significativamente menor que os materiais N e R (à menor velocidade de deformação).

Pela fig. 22 nota-se que o alongamento do material F permanece praticamente constante com o aumento da temperatura a velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$, o que

nos levamos a concluir que esta propriedade não depende muito da temperatura a esta velocidade, ou que não há tempo suficiente para que esta dependência apareça. O material R ainda apresenta um alongamento um pouco menor que a 25°C, o que denuncia a atuação da FA sobre o mesmo, enquanto o alongamento do material N tende a se libertar dos efeitos deste fenômeno.

A mais alta velocidade de deformação (fig. 23, p. 70) notamos mais uma vez que não há uma grande variação no alongamento do material fragilizado com a temperatura, o que vem a confirmar a importância do tempo sobre a influência da fragilidade azul no material no estado F. Quanto menor o tempo do ensaio maior o efeito deste fenômeno sobre o material fragilizado. O mais importante porém é que o material N também sofre o mesmo efeito que o material fragilizado à temperatura de 250°C, o que mostra que o efeito da fragilidade do revenido reversível é nulo neste ensaio. O comportamento do alongamento do material R, contudo, é um pouco surpreendente pois este material mostra que a esta temperatura não sofre a interferência da FA. Isto vem a demonstrar que o material não sofreu uma verdadeira regeneração de suas proprie

dades mecânicas .

A estrição, como pode-se observar pela fig. 26, p.76, mostra diferenças significativas a $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$ e à mais alta velocidade de deformação estudada. Note-se que os materiais F e R apresentam a mesma redução de área às duas primeiras velocidades de deformação consideradas. Isto mostra que à mais baixa velocidade o material N se apresenta com a menor ductilidade, ou seja, sofreu os efeitos da FA, enquanto , como pode ser verificado pela fig. 28, p. 79, o mesmo não acontece com o material nos outros dois estados. Observe-se que o material fragilizado praticamente não varia com o aumento da temperatura; o material regenerado, por sua vez, apresenta-se fragilizado (FA) em relação a sua estrição à temperatura ambiente.

Retornando à fig. 26 observemos que à medida que a velocidade de deformação aumenta o material N se mostra mais dútil enquanto o material regenerado praticamente não varia. O material fragilizado apresenta um comportamento oposto ao do material N, apresentando uma menor ductilidade à maior velocidade de deformação. Pela fig.29, p. 80, pode-se observar que o material F não se mostra muito sensível à FA.

A mais alta velocidade de deformação nota-se que o material que tem sua ductilidade mais afetada pela variação da temperatura é o frágil. O comportamento do material N é bastante estranho; a 200°C ele se mostra um pouco sensível à FA tendo sua ductilidade abaixada; a 250°C sua redução de área aumenta até quase o valor a 25°C para, logo mais, à temperatura de 300°C cair novamente até quase o valor da estricção do material fragilizado, o que nos parece de difícil explicação(ver fig. 30, p. 81).

O limite de escoamento a 300°C só apresenta interesse a $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ seg}^{-1}$ onde se constata uma diferença significativa entre esta propriedade do material regenerado e do frágil, e entre aquele e o não frágil. É interessante notar que o material R parece não haver sentido os efeitos da FA, uma vez que seu limite de escoamento diminuiu bastante com o aumento da temperatura, como pode ser observado pela fig. 10, p. 48. No entanto é de se notar também(fig. 7, p. 44) que a esta temperatura considerada os materiais N e F praticamente não variam com o aumento da velocidade de deformação, o que mostra que sofreram o efeito da FA, enquanto o material R só parece ser sensível ao fenômeno à velocidade de deformação in-

intermediária.

O limite de resistência do material P a 300°C apresenta uma diferença significativa em relação ao do material N à menor velocidade estudada. No entanto, como pode ser visto pela fig. 14, p. 57, ambos os materiais apresentam uma ductilidade maior que a 250°C, o mesmo acontecendo com o material R. Isto indica que a esta velocidade de deformação a influência do fenômeno da FA se dá no mesmo sentido para os três estados estruturais. À velocidade intermediária a FA parece atingir mais duramente o material frágil, aumentando o seu limite de resistência enquanto parece não atingir o material regenerado, pelo menos no mesmo grau de intensidade que no primeiro caso. Em outras palavras, enquanto o limite de resistência do material regenerado decresce com a temperatura o do material fragilizado aumenta com o crescimento da mesma. À mais alta velocidade de deformação, como já vimos, o maior efeito da FA se produz a 250°C sobre o material N e só a 300°C parece atingir o material nos outros dois estados estruturais.

O alongamento a 300°C praticamente não varia para o material fragilizado enquanto sofre grandes variações para

os outros dois materiais. Pela fig. 20, p. 67, pode-se observar que a qualquer velocidade de deformação o material fragilizado aparece como o menos dútil e também que tôdas as diferenças entre os alongamentos dêste e dos materiais N e R são significativas. Pode-se então concluir que esta propriedade mecânica é bastante sensível à fragilização a esta temperatura. Note-se que os materiais N e R também se encontram sob o efeito da FA tanto à mais baixa velocidade quanto à mais alta, enquanto a $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ tudo indica que o fenômeno não se manifesta sobre êstes dois materiais (ver fig. 22, p. 69).

A estrição do material regenerado a 300°C e à menor velocidade de deformação não sofre a influência da FA como pode-se constatar do exame da fig. 28, p. 79 enquanto o material N mostra uma redução de área um pouco abaixo do que seria de esperar, demonstrando assim que ainda se encontra sob a influência da FA. À velocidade intermediária encontramos as diferenças mais significativas entre as estrições e, olhando para a fig. 29, p. 80, podemos observar que a maior estrição a esta velocidade e a esta temperatura pertence ao material R, o qual, mesmo assim, ainda se encontra

sob os efeitos da FA.

Após havermos discutido todos os resultados dos ensaios de tração resta-nos agora discutir melhor o fenômeno da Fragilidade Azul e tentar ver como e porque seu mecanismo influi tão decisivamente nas manifestações da Fragilidade do Revenido Reversível.

Os defeitos de uma rede cristalina tais como vazios, intersticiais ou átomos em solução (solutos) podem interagir com as discordâncias de muitas maneiras. Uma delas é pela formação das " atmosferas de Cottrell ". O campo de tensões originado por uma discordância interage com estes defeitos de ponto de um modo tal que tende a redistribuí-los³⁰. O volume das células unitárias em torno das discordâncias fica alterado por este campo de tensões e, como resultado, para uma discordância em linha, positiva (a discordância estando no eixo dos z , e o vetor de Burger na direção do eixo dos x , por exemplo), teremos um volume maior do que o normal abaixo do plano de escorregamento (slip plane) e um volume menor do que este acima. Portanto, as células unitárias acima do plano de escorregamento atrairão os átomos substitucionais em solução menores que os átomos da rede, os vazios, e os á-

tomos intersticiais em solução cujos tamanhos sejam menores do que as "vagas" (lugares normalmente vazios na rede cristalina ou na célula unitária) intersticiais, ou ainda qualquer defeito que possa baixar sua energia ao penetrar em uma célula unitária menor do que o normal. Por outro lado, seguindo o mesmo raciocínio, C. M. Li³⁰ mostra que os átomos intersticiais maiores do que as "vagas" intersticiais, os átomos substitucionais maiores do que os átomos da rede (isto é, da célula unitária) não distorcida ou outro defeito qualquer que possa baixar sua energia ao penetrar numa célula unitária maior do que a normal, serão atraídos pelas células que estão abaixo do plano de escorregamento. Estas interações causam assim uma redistribuição dos defeitos de ponto que possam se mover (que tenham bastante energia para tal), e os mesmos procurarão, portanto, a posição de mais baixa energia em torno da discordância, constituindo-se assim em uma nuvem de átomos junto a esta e que foi chamada de "atmosfera de Cottrell". O efeito principal desta atmosfera é dificultar o movimento da discordância, pois esta deverá ou romper esta nuvem a fim de se mover (quando seus componentes não possuírem muita mobilidade) ou arras-

tá-la consigo, e, nos dois casos, a energia necessária para seu movimento ficará aumentada o que leva a um encruamento do material.

Em 1948 Cottrell propôs uma teoria sobre o mecanismo da Fragilidade Azul baseada numa ancoragem ou prisão das discordâncias por nuvens de intersticiais²⁴. Esta teoria também explicava o fenômeno do " serrilhado " logo após o limite elástico. Como ficou estabelecido, e comprovado por vários pesquisadores, o serrilhado desaparecia da curva tensão x deformação se ao atingir esta zona o material fôsse descarregado. No entanto, se se permitisse ao material sofrer um envelhecimento o serrilhado reapareceria. Isto foi explicado pelo rompimento das nuvens de intersticiais no primeiro caso e pela formação dessas nuvens durante o envelhecimento no segundo caso. Além disso foi estabelecido experimentalmente que o tempo de envelhecimento necessário para o reaparecimento do serrilhado era uma função exponencial do inverso da temperatura absoluta, e, portanto, a energia de ativação do fenômeno era igual à energia de difusão necessária para o movimento do C e do N no ferro- α . Então, à medida que a temperatura de um ensaio de tração aumenta

diminui o tempo gasto pelos intersticiais para reconstruir as nuvens em torno das discordâncias e, a uma temperatura suficientemente alta estas atmosferas seriam recriadas durante o próprio ensaio. A uma temperatura mais elevada a mobilidade dos intersticiais é tão grande quanto a das discordâncias e, portanto, estas atmosferas se deslocam em conjunto com as discordâncias o que aumentará consideravelmente a resistência oposta pelo material ao movimento destes defeitos. A temperatura na qual o material encontra o mínimo de ductilidade dependeria, pois, da velocidade de deformação em que o ensaio é conduzido.

Como vimos em parágrafos precedentes a Fragilidade do Revenido Reversível parece inibir o mecanismo proposto acima. Cabral¹¹ constatou diferenças significativas em alongamentos de aços ensaiados a 300°C quando houvessem sido submetidos a tratamentos de revenido, de fragilização e de regeneração, embora à temperatura ambiente não as houvesse constatado, como é o caso de outros autores^{2, 9, 15}. Segundo este, não haveriam diferenças significativas à temperatura ambiente porque as discordâncias romperiam as nuvens de intersticiais e, a medida que a temperatura se elevasse estes átomos se move-

riam com as discordâncias, o que diminuiria a sua ductilidade. Como o material não fragilizado e o material regenerado também estavam submetidos ao mesmo ensaio e apresentaram uma ductilidade significativamente maior o autor concluiu que o material fragilizado deveria apresentar alguns elementos que a 500°C (tratamento de fragilização) devido ao longo tempo do tratamento facilitariam uma maior segregação destes átomos (C e N) pelas discordâncias e pelas contornos dos grãos(o que explicaria as fraturas intergranulares apresentadas pelo material fragilizado, também comprovada pelo mesmo autor) .

Em 1957, Glenn³¹ mostrou que os elementos que formam carbonetos mais facilmente do que o Fe (Mn, Cr, W, Mo, V e Ti) podem suprimir a Fragilidade Azul desde que estejam presentes em solução em quantidades suficientes, o que seria explicado pela formação de nuvens de carbono (ou precipitados) em torno destes átomos e não mais em torno das discordâncias. Ao mesmo tempo mostrou que precipitados localizados em torno de discordâncias são mais estáveis que os que não estão associados a estas e ainda que, se a temperatura for bastante alta de modo a permitir o movimento de átomos substitucionais, estes se precipitarão arrastando consigo

suas próprias nuvens de C e de N. Através este raciocínio o autor prevê um segundo tipo de fragilidade onde o mecanismo seria o mesmo da Fragilidade Azul, sendo que a ligação entre o átomo intersticial e a discordância seria efetuada através do átomo substitucional e não mais diretamente. A temperatura em que este fenômeno apareceria dependeria do átomo substitucional responsável pela formação da nova nuvem de intersticiais (500°C para o Mn, 600°C para o W e mais de 700°C para o V e o Ti). Ainda no mesmo trabalho Glenn mostrou que os intersticiais C e N pareciam ter os átomos de Mn como seus vizinhos mais próximos em vez dos átomos de Fe.

Cabral¹¹ mostra ainda que através de técnicas utilizando radioisótopos foi constatada para um aço ao Ni-Cr uma maior concentração de Mn nos contornos dos grãos do material no estado fragilizado do que no estado não frágil.

Low Jr. em 1969 também constatou a presença de impurezas nos contornos dos grãos de materiais fragilizados em uma revisão sobre o problema³². Além disto o autor mostra que existem vários modelos para uma interface de transição e que eles estão de acordo em um ponto: a região onde as relações cristalográficas normais de distâncias interatômicas

não se realizam e onde o número de vizinhos mais próximos sofre distúrbios é da ordem de apenas alguns diâmetros atômicos; o autor mostra então uma micrografia de um Microscópio de Campo Iônico que evidencia uma zona de transição de um contorno de grão de grande ângulo (high - angle) onde a largura desta região é de cerca de dois ou três diâmetros atômicos.

Alem disto parece-nos possível ainda a presença de átomos de C e N ordenados em células unitárias em algumas direções, diferentes das preferenciais³⁰. Evidentemente uma atmosfera ordenada desta espécie (atmosfera de Snoek) em torno de uma discordância é muito provável, uma vez que sua energia de formação é menor do que a da atmosfera de Cottrell; também é evidente que esta atmosfera é uma barreira ao movimento das discordâncias. A sua característica fundamental é que pode ser formada e desaparecer muito mais rápido do que a atmosfera de Cottrell, pois sua velocidade crítica é menor que a da última. Esta velocidade crítica é tal que, quando uma discordância se move por solicitação de uma determinada tensão (tensão crítica, estimada por Schoeck e Seeger³⁰), haja o tempo necessário para que os átomos de C e N possam

pular para as novas posições.

A tensão necessária para mover uma discordância a uma velocidade maior ou menor que a crítica é sempre menor do que a tensão crítica; quando maior não há tempo suficiente para formar as atmosferas de Snoek; quando menor, a atmosfera de Snoek (não os átomos individualmente) segue com a discordância, sem contudo causar o efeito de arrasto (dragging effect). Por aí pode-se concluir que a velocidade de deformação é muito importante em relação ao aparecimento ou desaparecimento destas atmosferas durante o ensaio de tração.

Se a FRR depende da velocidade de deformação (isto é, a evidenciação da FRR a uma determinada temperatura) o autor acha muito provável que a formação destas atmosferas estejam atuando no seu mecanismo. Como atuam sobre o mecanismo é o grande problema.

Como se sabe, existem elementos tais como o Mn que formam verdadeiras atmosferas de C em torno de si²⁴. Acontece que átomos como este geralmente necessitam de uma energia de difusão bastante maior que a do C e do N ; então, a temperaturas onde o C e o N podem mover-se aqueles átomos permanecem imóveis .

As atmosferas de Cottrell e de Snoek são formadas por átomos solutos móveis em uma solução sólida³⁰. Se esta fosse constituída apenas daqueles teríamos sempre o encruamento do material, uma vez que êste efeito aparece da interação das discordâncias com aquelas atmosferas. Nêste caso a estrutura original da solução sólida seria imaterial uma vez que não impediria a formação das atmosferas. No caso em que a solução sólida fosse formada apenas por átomos solutos relativamente imóveis (ou com forte interação entre si) não haveria formação de atmosferas. No entanto, quando uma discordância se move, rearranja os átomos do plano de escorregamento, causando assim um efeito de encruamento. Um dos mecanismos mais importantes para explicar êste fenômeno é da ordenação de curto alcance e da aglomeração (short - range ordering and clustering)

Como o aço é composto de átomos solutos móveis e imóveis, é de se esperar que seus fenômenos relacionados com a deformação plástica englobem pelo menos êstes três mecanismos. E o mais importante é que todos três dependem da velocidade de deformação quando evidenciados em ensaios de tração. O último mecanismo citado, ao contrário dos outros dois , dependem fun

damentalmente da estrutura do material, ou seja, da distribuição dos átomos solutos imóveis na solução sólida.

Como já dissemos, Glenn³¹ mostrou que a 500°C o Mn tem bastante energia para se mover. Cabral¹¹ cita que foi constatada a presença de Mn em maior concentração nas vizinhanças dos contornos dos grãos. Low Jr³² confirmou a presença de impurezas nos contornos. Acontece que estas evidências acima foram confirmadas apenas para os aços fragilizados, e não para os que não sofreram o tratamento de fragilização. Podemos então afirmar que a estrutura do material frágil é diferente da do material não frágil.

Glenn³¹ também mostra que a temperatura em que o W pode se mover é mais ou menos 600°C e como sabemos⁹, este elemento, em determinadas quantidades, diminui a suscetibilidade do aço ao fenômeno da FRB. É possível que elementos deste tipo, embora imóveis a 500°C, possam sofrer rearranjos em relação aos átomos de C, N e Mn (que são mais móveis que ele). É importante levar em consideração que o W assim como o Mo, acima de determinadas quantidades, em vez de diminuir a sensibilidade, aumenta-a. Isto poderia ser explicado muito possivelmente por uma reversão no mecanismo citado em

terceiro lugar. Por exemplo, poderia haver uma saturação nos pares (vizinhos mais próximos) W-Mn, W-C, W-N, Mo-Mn, Mo-C, Mo-N, etc., e então êstes átomos que haviam sofrido uma ordenação de curto alcance passariam a formar pares W-W, Mo-Mo, Mn-Mn, N-N, etc., ou seja, passariam a sofrer uma aglomeração, o que modificaria , sem dúvida alguma, seus efeitos sôbre o movimento das discordâncias. O autor acha que seria importante uma confirmação de um mecanismo dêste tipo, o que não deve estar muito longe com o avanço que se verifica no campo da micro-sonda e da microscopia eletrônica³².

A confirmação experimental mais elementar sôbre diferenças de estrutura interna quanto ao movimento das discordâncias são os testes de atrito interno. Sadovskii¹⁰ em sua revisão sôbre a FRR de 1957 afirma ter conseguido diferenças significativas entre o atrito interno de um aço frágil e o de um não frágil.

Uma vez que evidenciação da FRR por ensaios de tração mostra-se sensível à velocidade de deformação e à temperatura em que se realizam os ensaios podemos concluir que o mecanismo dêste fenômeno pode ser uma soma dos três mecanismos citados. O que está fora de dúvida é que a distribuição dos

átomos solutos na rede cristalina do material fragilizado é diferente do que a distribuição destes átomos na do material não frágil.

Quanto à reversibilidade do fenômeno, isto seria explicado por uma redistribuição dos átomos solutos na rede cristalina do aço regenerado. Evidentemente esta redistribuição não deve ser completa, isto é, é pouco provável que todos os átomos em solução ocupem a mesma posição que possuíam antes do aço ser submetido ao tratamento de fragilização. Por este motivo o comportamento do aço regenerado não segue exatamente o do aço não frágil, como ficou evidenciado nos nossos testes de tração. Podemos concluir que sua estrutura é diferente da dos outros, embora se aproxime mais da estrutura do material não frágil.

Infelizmente não há na literatura informações sobre ensaios de atrito interno com o aço regenerado; achamos que um trabalho sobre este assunto seria de grande utilidade para um conhecimento mais profundo do mecanismo da FRR.

VI - CONCLUSÕES

- 1 - Os limites de escoamento e de resistência, o alongamento e a estrição, explicitados em ensaios de tração realizados entre 200°C e 300°C, permitem evidenciar o fenômeno da Fragilidade do Revenido Reversível.
- 2 - A evidenciação do fenômeno a uma determinada temperatura depende da velocidade de deformação do ensaio.
- 3 - À temperatura ambiente, à velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$, foram encontradas diferenças significativas entre os alongamentos do material frágil e dos materiais não fragilizado e regenerado, o que nos permite dizer que é possível evidenciar a Fragilidade do Revenido Reversível à temperatura ambiente em ensaios de tração com corpos de prova lisos.
- 4 - A dureza não é uma propriedade sensível à Fragilidade do Revenido Reversível. Não foram constatadas di-

ferências significativas desta propriedade nas amostras.

5 - Sugeriu-se uma hipótese na qual o mecanismo da Fragilidade do Revenido Reversível parece, pelo menos indiretamente, ligado à formação das atmosferas de Cottrell e de Snoek, bem como ao fenômeno da ordenação de curto alcance e aglomeração (short-range ordering and clustering).

APÊNDICE I

Coeficiente de encruamento.

As curvas tensão x deformação verdadeiras podem ser expressas analiticamente pela expressão:

$$T = K e_v^n ,$$

onde T é a tensão verdadeira e e_v é a deformação verdadeira. O expoente de e_v é chamado de coeficiente de encruamento e a constante K é denominada de coeficiente de resistência. O coeficiente de encruamento é muito importante pois mostra a maior ou menor dificuldade imposta pelo material, em um ensaio de tração, ao movimento das discordâncias.

Fizemos o cálculo deste coeficiente para os três estados estruturais para os ensaios de tração realizados à temperatura ambiente e à velocidade de deformação de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ seg}^{-1}$. Os resultados obtidos encontram-se na página seguinte.

$$n_F = 0,1165 ; n_N = 0,1090 ; n_R = 0,1098$$

Como pode-se observar, o maior coeficiente é o do material fragilizado, que é cêrca de 7% maior do que o do material não frágil. Não há uma diferença significativa entre os coeficientes dêstes dois e o do material regenerado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MACLEAN, D., e NORTHCOTT, L. : JISI, 1948, v. 158, p.169
2. WOODFINE, B.C. : JISI, 1953, v. 173, p.229
3. POWERS, A.E. : JISI, 1957, v. 186, p.323
4. MIKHAILOV-MIKHEEV, P.V. : Metal. i Obrab. Metallov,
1956, nº 2, p.23, in (10).
5. PROSVIRIN, V. e KVASHNINA, E. : Metal. i Obrab. Metallov,
1956, nº 2, p.34, in (10).
6. MESHKIN, V.S. : Metal. i Obrab. Metallov,
1956, nº 7, p.24, in (10).
7. BERNSHTEIN, M.L. : Metal. i Obrab. Metallov,
1956, nº 9, p.25, in (10).
8. YUREV, S.F. : Metal. i Obrab. Metallov,
1956, nº10, p. 37, in (10).
9. LOW, J.R., Jr. : G.E. Research Laboratory,
Report nº 59-RL-2290M, 1959.
10. SADOVSKII, V.D. : Henry Bratcher Translation
nº 4043 e nº 3980, Metal.
i Obrab. Metallov, 1957 ,
nº 6, p. 24.

11. CABRAL, U.Q. : Teses de Doutorado, em
1967, Faculdade des Sciences
de Paris.
12. GREAVES, R.H. e JONES, J.A. : JISI, 1920, nºII, p.171,
in (14)
13. JOLIVET, H. e VIDAL, G. : Rév. Mét., 1944, v. 41 ,
p. 387, in (11)
14. HOLLONON, J.H. : Trans. ASM, 1946, v. 36 ,
p. 473.
15. WOODFINE, B.C. : Trans. ASM, 1952, v.44 ,
p. 275
16. WOODFINE, B.C. : JISI, 1953, v. 173, p.229.
17. GREAVES, R.H. e JONES, J.A. : JISI, 1925, nºI, p.231.
18. HOLLONON, J.H. et al. : Trans. ASM, 1947, v. 38 ,
p. 801.
19. MALOOF, S.R. : Trans. ASM, 1952, v.44 ,
p. 264.
20. BASINSKY, : Notas de Aula do Prof. W.
A. Mannheimer.
21. DIETER, G.E., Jr. : Mechanical Metallurgy, 1961,
McGraw-Hill Book Company,
Inc., London.

- 22. WINE, R.L. : Statistics for Scientists and Engineers, Prentice - Hall, N.J., 1964.
23. COTTRELL, A.H. : An Introduction to Metallurgy, 1967, St. Martin's Press, New York.
24. ADENIS, D. e BLANCHARD, P. : Fragilité et Fragilisation des Métaux et Alliages , 1963, Dunod, Paris.
25. OROWAN, E., NYE, J. e CAIRNS, J. : Theo. Res. Rep. n° 16/45, Min. of Supply, London , in (21)
26. OROWAN, E. : Rep. on Prog. in Physics, 1948/49, v. 12, p. 185, in (21)
27. DAVIDENKOV, N.N. : Zhur. Tek. Fiziki, 1953 , v. 18, n° 3, p.3, in (20).
28. REED-HILL, R.E. : Physical Metallurgy Principles, 1964, D. Van Nostrand Company, Inc., New York.

29. HONEYCOMBE, R.W.K. : The Plastic Deformation of Metals, 1968, St. Martin's Press, New York.
30. PECKNER, D. : The Strengthening of Metals, Editor.
31. GLEN, J. : JISI, 1957, v.186, p. 21.
32. LOW, J.R., Jr. : Trans. ASM, 1969, v.245 , p. 2481.