

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA

DESENVOLVIMENTO E DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE  
BARRAS CHATAS DE AÇO SAE 5160 PARA LÂMINAS DE MOLA.

TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

Autor: João Paulo Sarmiento Porto

Porto Alegre, Dezembro de 1993

## AGRADECIMENTOS

Ao professor do DEMET, Dr. Telmo Strohaecker pela orientação do trabalho prática e técnica. Aos colegas do LAMEF pelo auxílio às atividades envolvidas com este.

À todos os colegas da Siderúrgica Riograndense que se envolveram com o desenvolvimento das barras chatas para molas, e em especial os colegas Antônio Abbud (chefe da área de proc/prod GI) e Marco A.G. Luchsinger (chefe dos laboratórios) pelo apoio a execução deste trabalho.

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	01
2. Revisão Bibliográfica	
2.1. Aço Mola .....	03
2.2. Fabricação e Composição Química .....	05
2.3. Molas de Lâminas ou Semi-Elípticas .....	07
2.4. Tipos de Aço para Laminas de Mola .....	09
2.5. Têmpera e Revenido .....	11
2.6. Austêmpera .....	14
2.7. Mecânica da Fratura .....	17
3. Produção de Barras Chatas de Aço SAE 5160 na SR	
3.1. Produção do Aço SAE 5160 .....	23
3.2. Laminação da Bitola 1 3/4x3/16" .....	28
3.3. Laminação da Bitola 2 1/4x1/4" .....	33
4. Análise das Barras Laminadas .....	36
5. Teste em uma Indústria de Molas .....	41
6. Determinação das Propriedades do Aço SAE 5160	
6.1. Objetivo .....	45
6.2. Preparação dos Corpos de Prova .....	46
6.3. Tratamentos Térmico Realizados .....	48
6.4. Ensaios Realizados .....	49
7. Resultados e Discussão	
7.1. Tabela de Resultados .....	62
7.2. Discussão .....	63
8. Conclusão .....	66
9. Bibliografia .....	68

## 1. INTRODUÇÃO

Molas de aço são produzidas em diferentes tipos, formas e tamanhos, desde delicados fios para instrumentos de medição até pesados absorvedores de impacto para equipamentos ferroviários. As molas geralmente trabalham sob severas condições, inspirando cuidados especiais tanto no que se refere ao projeto, como em relação aos materiais de que são fabricadas.

As barra chatas de aço destinadas a fabricação de molas e feixes de mola, constituem uma nova linha de produtos que a Gerdau Aço para Indústria (GI) pretende fabricar na Siderúrgica Riograndense S.A.

O presente trabalho trata, basicamente, de dois tópicos principais:

- O desenvolvimento de duas bitolas experimentais de barras chatas de aço SAE 5160 laminadas a quente para molas de suspensão de veículos. Os estudos e produção deste material, desde a elaboração do aço, laminação das bitolas e análise frente as condições de fornecimento para a indústria, foram realizados na Empresa Siderúrgica Riograndense S.A.. Ainda dentro desta fase foi realizado um teste prático do desempenho do material em um produtor de molas.

- A determinação das propriedades mecânicas convencionais e das propriedades relativas à mecânica da fratura desenvolvidas pelo aço SAE 5160 produzido na Siderúrgica Riograndense. Esta fase teve suas atividades centradas no Laboratório de Metalurgia-Física do DEMET/UFRGS. O material sofreu tratamentos térmicos de têmpera mais revenido e austêmpera, sendo, então, submetido a ensaios de tração, dureza e determinação da tenacidade a fratura ( $K_{IC}$ ).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Aço Mola

A composição química, propriedades mecânicas, qualidade superficial, disponibilidade e custos são os principais fatores a serem considerados na seleção de aços para molas. Aços carbono e aços de baixa liga são utilizados extensivamente em molas.

De um modo geral há dois tipos de molas: molas helicoidais ou em espiral e molas semi-elípticas ou de lâminas. As molas helicoidais podem ser classificadas da seguinte maneira:

- molas de extensão; bobinas fechadas, destinadas a esforços de tração;

- molas de compressão; bobinas abertas, destinadas a suportar esforços de compressão e choque;

- molas de torção; bobinas fechadas destinado a suportar esforços de torção.

As molas helicoidais são fabricadas a partir de barras ou fios e as semi-elípticas a partir de tiras ou lâminas de aço.

Os materiais de molas devem apresentar-se isentos de imperfeições, as quais em certos tipos de molas, sujeitas a elevadas tensões e à fadiga interna, podem trazer grandes prejuízos. As imperfeições ou defeitos que devem ser

evitadas são as seguintes: marcas de ferramentas, riscos das matrizes de trefilação, inclusões, rugosidade superficial e descarbonetação superficial, dentre outros. Essas condições são críticas, principalmente quando as molas são sujeitas a condições severas de carregamento em fadiga. Pesquisa feitas na indústria automobilística revelaram que praticamente todas as ruptura por fadiga em molas de válvulas começaram em uma imperfeição ou defeito interno ou superficial.

Para molas de extensão e compressão, os cálculos das tensões são baseados nas propriedades de torção e módulo de elasticidade sob torção, ao passo que nas molas de torção os cálculos são baseados nas propriedades de tensão e no módulo de elasticidade sob tração. Nas molas semi-elípticas, sujeitas a esforços de tensão e dobramento, os cálculos são baseados também nas propriedades de tensão e no módulo de elasticidade sob tração.

Exige-se, então, que uma mola apresente as seguintes características físicas:

- Altos valores de limite de elasticidade ou proporcionalidade sob tração ou limite de proporcionalidade sob torção, para que suporte cargas apreciáveis sem deformação permanente.

- Alto limite de fadiga, pois praticamente todas as molas falham por fadiga.

- Elevada resistência ao choque, principalmente em molas de automóveis, aviões e aplicações similares.

## 2.2.Fabricação e Composição Química

Os aços carbono, com teor de carbono variando de 0,50% a 1,20%, satisfazem quase que completamente os requisitos exigidos das molas. Existem aplicações, contudo, que exigem aços ligados. De qualquer modo, a escolha do material depende das propriedades desejadas, das aplicações, do custo e da técnica de fabricação. Em princípio, as molas são produzidas de duas maneiras:

- As molas são obtidas a partir de tiras ou fios de aço carbono ou aço ligados; estes materiais depois de conformados são temperados e revenidos.

- As molas são fabricadas a partir de tiras ou fios de aço já endurecidos (temperado e revenido ou patenteados ou encruados); estes materiais são conformados e depois sofrem um tratamento térmico de alívio de tensões.

Os aços ligados apresentam melhores propriedades de fadiga e limites elásticos mais elevados do que os aços carbono, sendo preferidos em algumas aplicações. São, contudo, mais suscetíveis a certas imperfeições superficiais.

Verificou-se que as molas de aço-carbono com diâmetro até 5/8" podem ser utilizadas com suficiente segurança até temperaturas da ordem de 175°C desde que não sejam carregados além de 56Kgf/mm<sup>2</sup>. Já os aços liga Si-Mn, Cr-V e outros típicos para molas, possibilitam o emprego destas em diâmetro de até 5/8", até temperaturas de 200°C se a carga de serviço não for superior a 56Kgf/mm<sup>2</sup>. Acima de

230°C, pode-se recorrer às ligas Cr-Ni ou aos aços ferramenta.

Na tabela 1, são mostrados os tipos mais comuns de aços utilizados em molas, segundo a ASTM.

Tabela 1 - Aços utilizados em molas.

Especificação e Qualidade	Composição nominal (%)	Limite de resistência à tração, min. kgf/mm <sup>2</sup>	Módulo de elasticidade E kgf/mm <sup>2</sup>	Dureza Rockwell C	Temperatura máxima de utilização °C	Principais aplicações
<b>FIO TREFILADO A FRIO</b>						
ASTM - A 228 Fio de música	0.70-1.00C 0.20-0.60Mn	161-279	21.000	41-60	120	Para molas de alta qualidade.
ASTM - A 227 Trefilado duro	0.45-0.85C 0.30-1.30Mn	103-227	21.000	31-52	120	Para aplicações de tensões médias; molas de baixo custo.
ASTM - A 679 Trefilado duro - alta tração	0.65-1.00C 0.20-1.30Mn	167-245	21.000	41-60	120	Para molas de alta qualidade.
ASTM - A 229 Revenidas em óleo	0.55-0.85C 0.30-1.20Mn	115-227	21.000	42-55	120	Tratadas antes da conformação. Molas para fins gerais.
ASTM - A 230 Mola de válvula	0.60-0.75C 0.60-0.90Mn	150-168	21.000	45-49	120	Tratadas antes da conformação. Boa condição superficial.
<b>TIRA LAMINADA A FRIO</b>						
ASTM - A231 A232 Cr-V	0.48-0.53C 0.80-1.10Cr 0.15V min.	133-210	21.000	41-55	220	Tratadas antes da conformação. Para cargas de choque e temperat. mais altas.
ASTM - A401 Cr-Si	0.51-0.59C 0.60-0.80Cr 1.20-1.60Si	164-210	21.000	48-55	245	Idem
ASTM - A682 C médio (1050)	0.47-0.55C 0.60-0.90Mn	Revenida 112-196	21.000	38-50	120	Fins gerais.
ASTM - A682 C alto (1074)	0.69-0.80C 0.50-0.80Mn	Revenida 112-224	21.000	38-50	120	Aço mais popular para molas chatas.
ASTM - A682 C alto (1095)	0.90-1.04C 0.30-0.50Mn	Revenida 126-238	21.000	40-52	120	Molas chatas para altas tensões.
AMS 6455 Cr-V	0.48-0.53C 0.80-1.10Cr 0.15V min.	140-175	21.000	42-48	220	Tratada termicamente após conformação. Para cargas de choque e temper. mais altas.
AISI 9254 Cr-Si	0.51-0.59C 0.60-0.80Cr 1.20-1.60Si	175-227	21.000	47-51	245	Tratada termicamente após conformação. Para cargas de choque e temper. mais altas.

Os aços para molas são, de certo modo, semelhantes aos aços comerciais comuns, com a diferença que geralmente apresentam maiores teores de carbono e manganês e exigirem maior cuidado e maior número de operações para a sua fabricação.

### 2.3.Molas de Lâminas ou Semi-elípticas

Similar a todas as outras molas, servem para absorver e armazenar energia. Durante o ciclo de carregamentos, a tensão da mola não pode exceder a certo valor máximo para não falhar prematuramente.

Via de regra as molas de lâminas são menos eficientes que as molas helicoidais, em termos de energia absorvida por unidade massa. Entretanto são largamente utilizadas em aplicações automotivas devido a sua funcionalidade estrutural.

A energia acumulada nas partes ativas de lâminas de molas projetadas para máxima tensão de 1100MPa (112,2Kgf/mm<sup>2</sup>), de desenho retangular simples, é mostrada abaixo:

-projeto simples	43J/ton
-Multiplas lâminas	43J/ton

Se considerarmos que as partes inativas da mola, fixação do eixo e olho da mola, também devem ser incluídas na energia por peso da mola, estes valores serão ainda mais baixos. Por comparação, a energia absorvida pelo material ativo de uma mola helicoidal é 510J/ton para 1100MPa, e para uma mola de torção é de 390J/ton para 965MPa. Esta comparação mostra que a mola de lâminas é inerentemente mais pesada que os outros tipos de molas. Em ordem econômica, molas de lâminas apresentam como vantagem a maior utilização.

Molas de lâminas são muito frequentemente utilizadas em suspensão de veículos. As características do sistema de suspensão são afetadas pelo coeficiente e pela deflexão estática da mola.

O coeficiente, ou mais precisamente o coeficiente de carga da mola, é a alteração de carga por polegada de deflexão. Este não é o mesmo para todas as posições da mola, e é diferente também para uma mola somente e para um feixe de molas.

A deflexão estática de uma mola equivale a carga estática dividida pelo coeficiente de carga estática; Isto determina a rigidez (dureza) da suspensão e a frequência de rodagem do veículo.

Um andar suave geralmente requer uma grande deflexão estática da suspensão. Há entretanto outras considerações e limites, como os seguintes:

- Uma mola mais flexível pode ter uma grande deflexão total e ser robusta.

- Em muitos casos, uma mola mais flexível pode causar trancamento (o movimento da mola em um veículo em viagem pode causar um contato metal-metal) devido a problemas com as borrachas de absorção.

- A mudança de altura do veículo com a variação de carregamento é grande com molas mais flexíveis.

Adicionalmente, a deflexão estática permissível

depende do tamanho do veículo, por causa das considerações de estabilidade em frenagem, acelerações, curvas e assim por diante.

A tabela 2, a seguir lista defleções estáticas típicas e o curso de molas para vários tipos de veículos. Estes valores aproximados são usados como indicadores gerais para a prática de projetos de sistemas de suspensão.

Tabela 2 - Deflexões estáticas e curso de molas.

Type of vehicle and load	Static deflection		Ride clearance	
	mm	in.	mm	in.
Passenger automobiles, at design load .....	100-300	4-12	75-125	3-5
Motor coaches, at maximum load .....	100-200	4-8	50-125	2-5
Trucks, at rated load				
For highway operation ..	75-200	3-8	75-125	3-5
For off-road operation ..	25-175	1-7	50-125	2-5

#### 2.4. Tipos de Aços para Lâminas de Molas

O requisito básico para um aço de lâmina de molas é que este apresente uma temperabilidade suficiente para espessura da lâmina, para que forneça estrutura totalmente

martensítica. Os produtos de transformação não martensítica prejudicam as propriedades à fadiga.

As lâminas de molas automotivas são produzidas a partir de aços ligados de grão fino, como as qualidades 9260, 4068, 4161, 6150, 8660, 5160 e 51B60.

Nos EUA, quase todas as lâminas de molas são produzidas a partir de aços ao cromo, como o 5160, 51B60 e seus equivalentes "H".

No aço 5160, a composição química é especificada como uma variável independente (dureza é uma variável dependente da composição química). No 5160H, a variável independente é a dureza (a composição química é a variável dependente, sendo ajustada de acordo com a dureza requerida).

Aços de mesma dureza em condições de temperatura martensítica tem aproximadamente o mesmo rendimento e limite de resistência a tração. A ductilidade é medida pelo alongamento e redução de área e é inversamente proporcional a dureza. Baseado em experiências, as propriedades mecânicas ótimas para lâminas de mola são mostradas a seguir:

lim resistência -	1310-1690MPa
lim elasticidade-	1170-1550MPa
alongamento(min)-	7%
red. área(min)-	25%
dureza-	42-49 HRC

## 2.5. Têmpera e Revenido

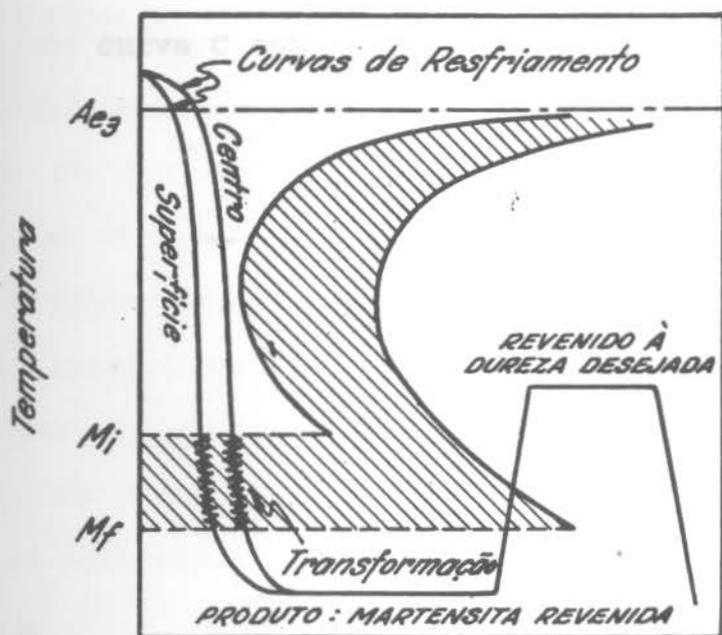
Tratamentos térmicos são um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades e conferir-lhes determinadas características.

As propriedades dos aços dependem, em princípio, de sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços resultando alterações em suas propriedades.

A têmpera consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior a sua temperatura crítica em água, óleo, salmoura ou ar. A figura 1 esquematiza a operação de têmpera.

resfriamento.

Figura 1 - Tratamento de têmpera e revenido.



Tempo, esc. log.

O objetivo principal da têmpera é a obtenção da estrutura martensítica, para o que se deve, portanto, fazer com que a curva de esfriamento passe a esquerda da curva "C", evitando-se assim a transformação da austenita. A velocidade de resfriamento, nestas condições, dependerá do tipo de aço, da forma e das dimensões das peças.

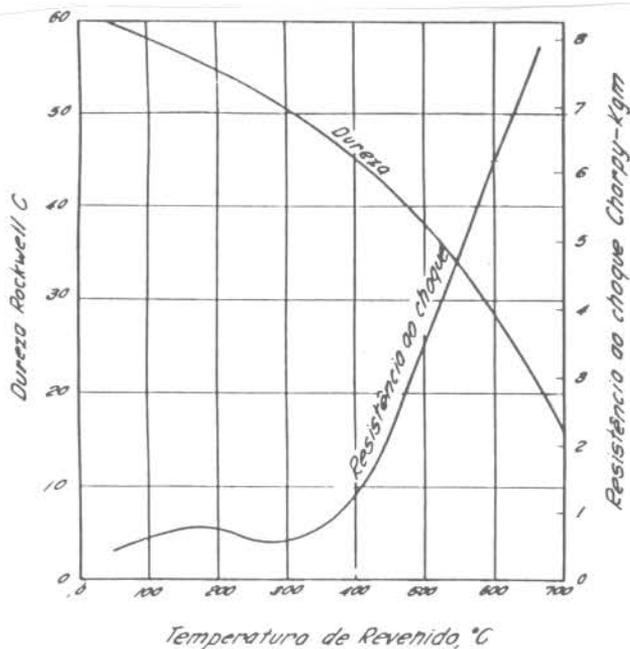
Como na têmpera o constituinte final desejado é a martensita, o objetivo desta operação sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, é o aumento do limite de resistência a tração do aço e também da sua dureza.

Resultam também da têmpera a redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas. Tais inconvenientes são atenuados ou eliminados pelo revenimento.

O revenido é o tratamento térmico que normalmente sempre acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta; além de aliviar ou remover as tensões internas, corrige a excessiva dureza e fragilidade do material, aumentando a sua ductilidade e resistência ao choque. Isto pode ser visto na figura 2.

O aquecimento da martensita permite a reversão do reticulado instável ao reticulado estável cúbico centrado, produz reajustamentos internos que aliviam as tensões e, além disso, uma precipitação de partículas de carbonetos que crescem e se aglomeram, de acordo com a temperatura e tempo.

Figura 2 - Efeitos do revenido.



Conforme a temperatura de revenido, verificam-se as seguintes transformações:

- 25-100°C, ocorre segregação ou redistribuição do carbono em direção as discordâncias; esta pequena precipitação localizada pouco afeta a dureza.

- 100-250°C , 1º estágio do revenido, ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo épsilon, de reticulado hexagonal. A dureza começa a cair.

- 200-300°C, 2º estágio do revenido, ocorre transformação da austenita em bainita. A dureza continua a cair.

- 250-350°C, 3º estágio do revenido, forma-se um carboneto metaestável. A dureza continua caindo.

- 400-600°C, ocorre uma recuperação da subestrutura de discordâncias, resulta uma estrutura de

ferrita fina acicular. A dureza cai para 45 a 25 HRC.

- 500-600°C, somente aços ligados.

- 600-700°C, recristalização e crescimento de grão.

## 2.6. Austêmpera

A austêmpera tem substituído, em diversas aplicações, a têmpera e o revenido. Baseia-se no conhecimento das curvas em "C" e aproveita as transformações da austenita que podem ocorrer a temperatura constante. Por este motivo a austêmpera é considerada um tratamento isotérmico.

O constituinte que origina da austêmpera, pelo esfriamento da austenita, a uma temperatura constante é a bainita, que tem propriedades idênticas, senão mesmo superiores, às das estruturas martensíticas revenidas. Como neste tratamento evita-se a formação direta da martensita, elimina-se os inconvenientes que esta estrutura apresenta quando obtida pela têmpera direta e que são somente eliminados pelo revenido posterior.

O aço é austemperado mediante a seguinte seqüência de operações e transformações:

- aquecimento a uma temperatura dentro da faixa de austenitização - geralmente de 785 a 870°C;

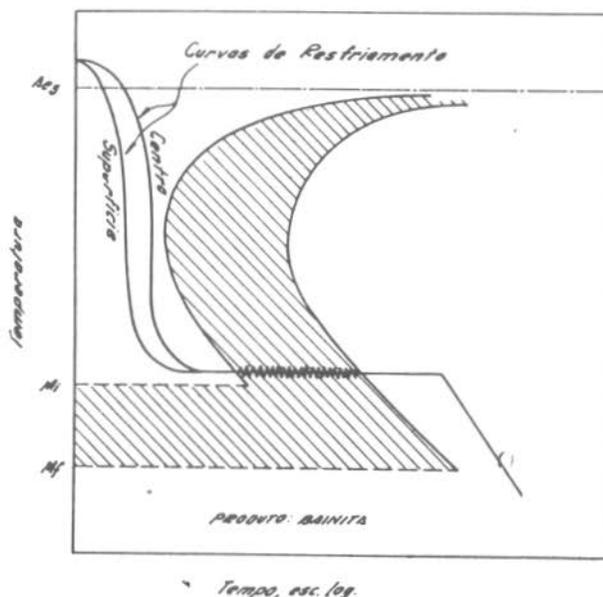
- resfriamento em um banho mantido a uma temperatura constante, geralmente entre 260 e 400°C;

permanência no banho a essa temperatura, para ter-se, isotermicamente, a transformação da austenita em bainita;

resfriamento até a temperatura ambiente, geralmente em ar tranqüilo.

A austêmpera está representada esquematicamente no diagrama de transformação exotérmica mostrado na figura 3, a seguir.

Figura 3 - Tratamento de austêmpera.



As estruturas bainíticas obtidas na austêmpera, sobretudo nas partes mais baixas do diagrama TTT, caracterizam-se pela excelente ductilidade e resistência ao choque, com durezas elevadas, acima de 50HRC. Estas

características são superiores às da martensita revenida normal, com aproximadamente a mesma dureza.

**Importante:** Para assegurar uma completa transformação da austenita em bainita, o material deve ser resfriado desde a temperatura de austenitização até a temperatura do banho de austêmpera muito rapidamente para evitar que outra transformação da austenita ocorra durante este resfriamento e, por outro lado, deve ser mantido no banho de austêmpera o tempo necessário para promover a completa transformação da austenita em bainita, esse tempo é geralmente duas vezes maior que o teoricamente previsto.

**convenção:** A grande vantagem da austêmpera sobre a têmpera e revenido comuns reside no fato de que, devido a estrutura bainítica formar-se diretamente da austenita a temperatura bem mais alta que a martensita, as tensões internas resultantes são muito menores; conseqüentemente, não há praticamente distorções ou empenamento e do mesmo modo o aparecimento de fissuras de têmpera é quase que completamente eliminado.

**modo:** O banho de austêmpera mais indicado e usado é o sal fundido, constituído essencialmente de nitratos de sódio e de potássio e eventualmente nitreto de sódio porque transfere calor rapidamente.

A aplicação do tratamento de austêmpera é feita em peças fabricadas a partir de barras de pequeno diâmetro ou de tiras e chapas de pequena espessura. Aplica-se em particular em peças de pequena seção de aço carbono exigindo

uma tenacidade excepcional e uma dureza próxima de 50HRc. Entretanto, deve-se entender que, muitas vezes, é mais importante que a austêmpera produza as propriedades mecânica desejadas do que uma estrutura totalmente bainítica.

## 2.7.Mecânica da Fratura

O projeto de engenharia convencional baseia-se em evitar fraturas por colapso plástico. As propriedades normalmente especificadas para projetos são o limite de escoamento e a dureza do material. Em projetos convencionais, então, se utiliza a tensão máxima que o material resiste dividido por um fator de segurança para assegurar que não ocorra fratura frágil. Contudo, a presença de defeitos do tipo trincas pode levar a fraturas não previstas.

O objetivo da mecânica da fratura é determinar se um defeito tipo trinca irá ou não levar a uma fratura catastrófica para tensões nominais de serviço. O grande mérito é a possibilidade de determinar valores quantitativos de tenacidade do material ( $K_{IC}$ ), permitindo a elaboração de projetos que aliem segurança e viabilidade econômica.

Os defeitos tipo trincas mais comuns são:

- trincas de solidificação;
- trincas de hidrogênio;
- decoesão lamelar e trincas nucleadas por fadiga.

O uso dos conceitos de Mecânica da Fratura provou ser adequado para a previsão das condições de falhas em estruturas. A Mecânica da Fratura pode ser dividida em dois ramos:

- Linear Elástica (MFLE);
- Elasto-Plástica (MFEP).

A MFLE é uma metodologia a ser empregada em situações onde existe possibilidade de ocorrer fratura sem ser precedida de extensa deformação plástica. Esta restrição à deformação plástica pode ser decorrência das próprias propriedades do material (aços de altíssima resistência mecânica) ou de fatores geométricos, por exemplo, as dimensões da estrutura (aço de média resistência mecânica podem atingir estado de deformação plana na prática - se houver espessura suficiente ou temperatura bastante baixa).

O sucesso da MFLE em estabelecer um tamanho de trinca crítico, desenvolvida teoricamente e comprovada na prática, fica restrita a casos em que não há deformação plástica apreciável acompanhando a fratura.

No caso de aços estruturais de baixa para média resistência mecânica, podemos pensar em termos da tradicional curva de transição dúctil-frágil com a mudança de temperatura. Estes materiais apresentam a bem conhecida transição de fratura dúctil para frágil com o aumento da temperatura. Para materiais relativamente frágeis, no patamar inferior da curva de transição, ou para estruturas

submetidas a tensões essencialmente elásticas, a Mecânica da Fratura Linear Elástica é aplicável e a tenacidade pode ser expressa em termos de  $K_{IC}$ .

Por ser uma propriedade intrínseca do material, este valor de  $K_{IC}$  pode ser utilizado na análise de qualquer geometria, possibilitando o cálculo do tamanho crítico de trincas no projeto de estruturas.

O Ensaio de Tenacidade em Deformação Plana e Determinação de  $K_{IC}$  são ensaios onde a abordagem da mecânica da fratura pode ser utilizada para medir propriedades significativas do material.

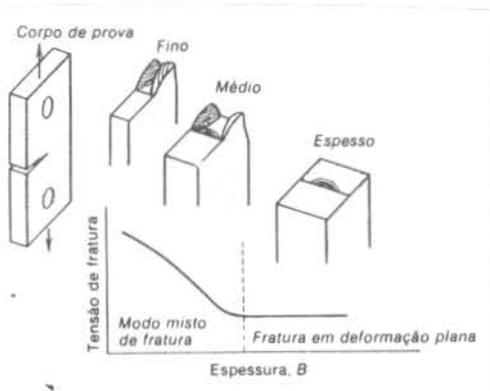
O campo elástico próximo à extremidade de uma trinca pode ser descrito por um único parâmetro denominado **fator de intensidade de tensão, K**. Uma vez que as tensões na ponta da trinca podem ser descritas por K, pode-se utilizar um valor crítico de K para definir as condições de fratura frágil. Como o teste usual envolve o tipo de carregamento que promove a abertura da trinca (modo I), o valor crítico de K é denominado  $K_{IC}$ , a tenacidade a fratura em condições de deformação plana. O  $K_{IC}$  pode ser considerado uma propriedade do material, que descreve a resistência inerente do material à fratura em presença de um defeito semelhante a uma trinca.

Conhecendo o  $K_{IC}$  é possível determinar a máxima tensão permitida para um dado tamanho de trinca. Uma vez que o  $K_{IC}$  é uma propriedade básica do material, no mesmo sentido que a tensão de escoamento, este parâmetro varia com

temperatura e taxa de deformação. Para uma certa liga, o  $K_{IC}$  possui grande dependência de variáveis metalúrgicas, tais como tratamento térmico, textura, procedimento de fusão, impurezas e inclusões.

A tenacidade à fratura medida em condições de deformação plana é obtida para um máximo de fragilidade do material. A tenacidade à fratura em deformação plana,  $K_{IC}$  é uma propriedade real do material. A tensão de fratura medida varia com a espessura do corpo de prova, para amostras finas se obtém um modo de fratura misto frágil-dúctil. Quando o corpo de prova possui a espessura crítica para a tenacidade do material, a tensão de fratura torna-se constante com o aumento da espessura, como pode ser visto na figura 4.

Figura 4 - Efeito da espessura na tensão de fratura.



A espessura mínima para que se obtenham condições de deformação plana e medidas válidas de  $K_{IC}$  é:

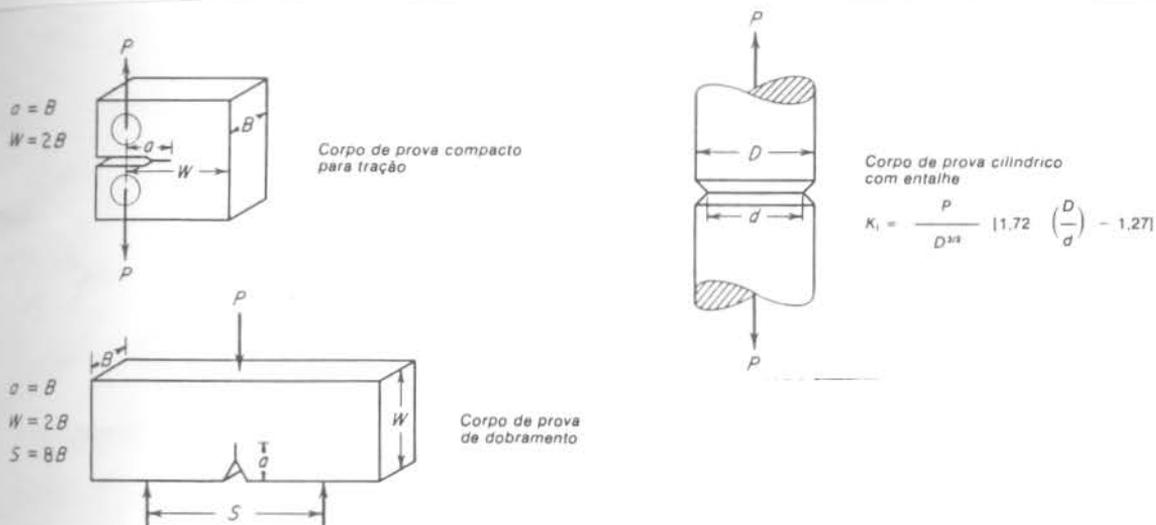
$$B = 2,5(K_{IC}/s_0)^2,$$

onde  $s_0$  é a tensão limite de escoamento, medida a 0,2 por

cento de deformação plástica.

Vários corpos de prova foram propostos para a medida de  $K_{IC}$ . Na figura 5 são mostrados os tipos mais comuns.

Figura 5 - Corpos de prova para ensaio de  $K_{IC}$ .



Após usinado o entalhe no corpo de prova, produz-se uma trinca (a mais aguda possível) na raiz do entalhe, submetendo o material a fadiga de baixo ciclo e elevada deformação. O comprimento inicial da trinca " $a_1$ " inclui a profundidade do entalhe e o comprimento da trinca de fadiga e é aproximadamente igual à espessura do corpo de prova.

O ensaio de  $K_{IC}$  deve ser realizado em uma máquina que forneça um registro contínuo de carga e deslocamento

relativo através da extremidade aberta do entalhe (proporcional ao deslocamento da trinca).

O valor da carga máxima registrada ( $P_Q$ ) é utilizado para calcular um valor condicional da tenacidade à fratura, designado por  $K_Q$ . Para o corpo de prova de dobramento,

$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^{3/2}} \left[ 2,9 \left( \frac{a}{W} \right)^{1/2} - 4,6 \left( \frac{a}{W} \right)^{3/2} + 21,8 \left( \frac{a}{W} \right)^{5/2} - 37,6 \left( \frac{a}{W} \right)^{7/2} + 38,7 \left( \frac{a}{W} \right)^{9/2} \right]$$

O comprimento da trinca ( $a$ ) utilizado na equação é medido após a fratura. Em seguida calcula-se o fator  $B$ , sendo que, se esta quantia for menor que a espessura do corpo de prova e o comprimento da trinca, então  $K_Q$  será igual a  $K_{IC}$ , e o teste será válido. Em caso contrário é necessário utilizar um corpo de prova mais espesso.

### 3. PRODUÇÃO DE BARRAS CHATAS DE AÇO SAE 5160 NA SR

o tempo

#### 3.1. Produção do aço SAE 5160

Em fevereiro de 1993 foi produzida na aciaria da Siderúrgica Riograndense a corrida número 45302 do aço SAE 5160. A Siderúrgica Riograndense produz normalmente aços ao carbono e aços ao carbono com alto teor de manganês, como o aço SAE 5160 é um aço ligado com Cr (0,80%), a sua fabricação exigiu cuidados especiais durante o processo.

A Aciaria da SR possui dois fornos elétricos a arco com capacidade para 24 toneladas cada, dois fornos-panela para refino secundário e duas máquinas de lingotamento contínuo de dois veios cada, produzindo tarugos de aço com seções de 100x100mm ou 120x120mm.

A produção do aço SAE 5160 teve início com a fusão da matéria prima (ferro gusa, sucata e cal) em forno elétrico a arco, no caso o forno 3 da Siderúrgica Riograndense. Após o aço passou pelo refino secundário no forno-panela 3 e produção dos tarugos no lingotamento contínuo.

O objetivo básico do processo no forno elétrico, além da fusão da matéria-prima, é a realização do refino primário, ou oxidante, buscando diminuir o teor de C e P da carga. O refino oxidante é realizado pela injeção de oxigênio durante a fusão e pela injeção de carvão em pó ao

final da fusão, formando a chamada "escória espumante", e assim eliminando ou diminuindo o teor de certos elementos.

No caso da produção experimental do aço SAE 5160, o tempo total de forno foi de 52 minutos e o aço foi vazado a temperatura de 1650°C, com a seguinte composição química:

%C	-	0,105
%Mn	-	0,091
%Si	-	0,092
%S	-	0,022
%P	-	0,005
%Cu	-	0,067
%Cr	-	0,018
%Ni	-	0,028

A etapa seguinte é o refino secundário em forno-panela, onde as principais atividades são:

- acerto e homogeneização de temperatura e composição química;
- realização do refino redutor, diminuindo o teor de S do aço;
- desoxidação do aço pela adição de elementos desoxidantes (Si, Al, Ca);

O processo de forno-panela inicia com o borbulhamento de Argônio na panela logo após o vazamento do aço processado no forno de fusão, o borbulhamento é mantido durante todo o processo. Em seguida a panela é levada por ponte rolante até a estação de tratamento secundário, onde são adicionadas as ligas(FeSiMn, FeSi, FeCr - 55% Cr), os elementos desoxidantes (Al, CaSi) e a escória redutora.

O processo de forno-panela teve um tempo total de 103 minutos (muito acima do tempo normal para os aços da SR) devido a problemas de acerto de temperatura de saída. Ocorreu uma queda acentuada de temperatura devido a grande quantidade de ligas adicionado a temperatura ambiente. O aço obtido apresentou a seguinte composição química de panela:

%C	-	0,630
%Mn	-	0,890
%Si	-	0,180
%S	-	0,007
%P	-	0,018
%Cu	-	0,068
%Cr	-	0,855
%Ni	-	0,035

Obtendo-se um rendimento de Cr adicionado da ordem de 95%.

O teor de gases foi medido ao final do processo de forno panela, apresentando os seguintes valores:

Nitrogênio - 55 ppm;

Oxigênio - 15 ppm.

Após a classificação da corrida, a panela foi conduzida até a máquina de lingotamento contínuo para solidificação do aço em tarugos de 120x120mm. Nesta fase os cuidados foram ainda maiores, utilizando-se um distribuidor novo, proteção de jato panela/distribuidor por válvula longa e proteção de jato distribuidor/molde por gás inerte (Ar) para evitar reoxidação do aço pelo contato com o oxigênio da atmosfera. Também se fez a injeção de alumínio em fio diretamente no molde, visando uma maior desoxidação do aço.

O tempo total de lingotamento foi de 55 minutos, produzindo 38 tarugos de 515Kg e comprimento de 4,76m. Os tarugos foram inspecionados 100%, nas quatro faces. Três peças foram desclassificadas por gota fria (primeiras peças lingotadas, devido a colocação da proteção de jato). Adicionalmente, foram retiradas amostras de tarugos do início, meio e final do processo de lingotamento em cada um dos dois veios. As amostras passaram por uma análise de limpidez do material, por observação em lupa. Esta análise mostrou a ocorrência de um pequeno número de macroinclusões próximas a face superior das primeiras peças de cada veio, e a ausência total destas nas demais amostras retiradas. Se levarmos em conta que as primeiras e últimas peças produzidas em cada veio são descartadas, os tarugos que serão utilizados não apresentam problemas de macroinclusões.

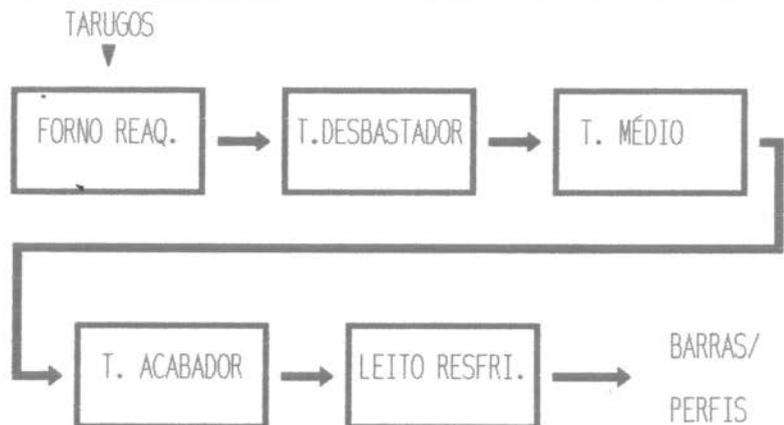


### 3.2.Laminação da Bitola 1 3/4 x 3/16"

Dentre as bitolas de barras chatas planejadas para serem produzidas na Siderúrgica Riograndense, a bitola 1 3/4 x 3/16" foi escolhida para ser a primeira por ser a menos espessa, e conseqüentemente ser mais suscetível a problemas de velocidade de resfriamento no leito da laminação. Uma alta velocidade de resfriamento pode provocar um tratamento de têmpera no material, deixando-o fora das condições de fornecimento para a indústria (dureza muito elevada).

O material foi processado na Laminação 2 da SR, composta por um trem laminador em linha com velocidade no ultimo passe de 10m/s. Este equipamento é bastante atual e apresenta altos índices de produtividade, sendo utilizado na produção de barras, perfis e vergalhões.

Figura 7 - Esquema do laminador utilizado.

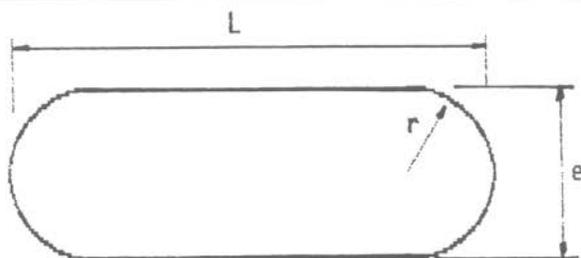


As barras chatas de aço para mola devem ser fornecidas com um raio de canto igual a espessura dividido por dois, diferente das demais bitolas produzidas na SR. Para atender esta necessidade foi necessário estudar uma nova calibração dos últimos passes de laminação.

As especificações dimensionais desta bitola segundo as normas ABNT EB-2165 e DIN 59145, são mostradas na tabela 3, abaixo:

Tabela 3 - Especificações dimensionais.

VALORES	largura (mm)	espes. (mm)	raio canto (mm)
Mínimo	44,15	4,61	2,40
Máximo	44,65	5,01	3,60



As barras devem ter um comprimento de 6,00 a 6,10 metros e um empenamento máximo de 2,0mm/m.

Em junho de 93 foi realizada a laminação de 5 tarugos da corrida 45302 do aço SAE 5160 para produção da bitola de barra chata 1 3/4 x 3/16".

Como a bitola 1 3/4 x 3/16" é produzida normalmente na Siderúrgica Riograndense, o processo convencional foi mantido, somente com alterações nos dois

últimos passes para adequação do raio de canto.

O processo inicia com o reaquecimento dos tarugos em forno tipo soleira móvel e teto radiante, onde o tarugo sai a cerca 1150°C. O tarugo passa, então, pelo trem desbastador, reduzindo a seção de um quadrado 120x120mm (tarugo) para um redondo de 48mm de diâmetro. O material segue em linha pelos trens médio e acabador, saindo no leito de resfriamento, de onde vai ser transportado até a tesoura para o corte final no comprimento especificado.

Deste material foram retiradas amostras para ensaios físicos, químicos e dimensionais a serem realizadas nos laboratórios do DQ, o restante foi para o setor de acabamento para ser endireitado e estocado em feixes para testes posteriores.

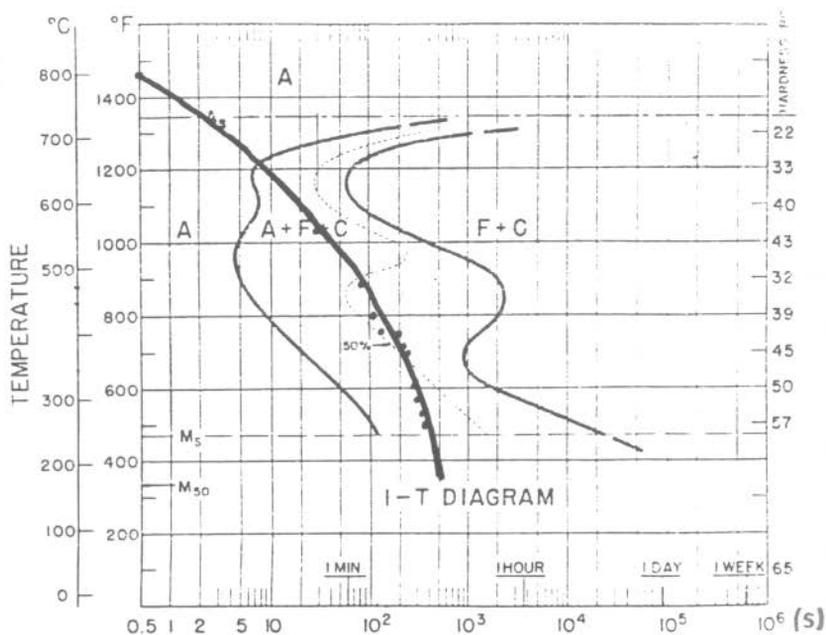
As temperaturas do material no último passe e na chegada no leito de resfriamento foram registradas para os cinco tarugos laminados. Os valores médios encontrados para a cabeça, meio e final de cada barra são os seguintes:

LOCAL	ultimo passe (°C)	leito (°C)
cabeça da barra	1008	975
meio da barra	1028	982
fim da barra	1017	935

Com o auxílio de um pirômetro de radiação, foi feito o levantamento da velocidade de resfriamento de uma barra no leito da laminação 2, através do registro de

temperaturas da barra a cada 30 segundos. Estes valores foram plotados no diagrama de transformação isotérmica do aço SAE 5160, verificando-se as condições do leito de resfriamento. Estes resultados são mostrados abaixo, na figura 8.

Figura 8 - Perfil de resfriamento no leito.



Observamos que, mesmo para esta bitola mais fina o material não temperou, a curva de resfriamento passou dentro da região de formação de perlita e ferrita, não ocorrendo têmpera do material.

As condições do leito de resfriamento da L2 permitem a produção de aços ligados sem problemas de estrutura final. Na figura 9, é mostrada uma foto do leito de resfriamento com o material em questão.

Figura 9 - Fotografia do material no leito de resfriamento.



O processo de laminação desta bitola não apresentou problemas, obtendo-se barras sem defeitos superficiais e dentro das medidas especificadas. A figura 10 mostra a fotografia do material em estoque.

Figura 10 - Material em estoque.



### 3.2.Laminação da Bitola 2 1/4 x 1/4"

Da mesma forma que a bitola anterior, esta foi processada na Laminação 2 da Siderúrgica Riograndense (L2). Esta bitola apresenta um agravante para a sua fabricação, ela não é um produto normal de linha da L2. Foi necessário, então, uma adaptação da calibração de uma bitola próxima que seja produzida normalmente pela L2. Para tal foi escolhida a bitola 2 x 1/4", retirando o penúltimo passe (refilador) e alterando o último, com a intensão de alargar mais o material e ainda produzir o raio de canto e/2.

Esta bitola possui as seguintes tolerância dimensionais, segundo as normas ABNT EB-2165 e DIN 59145:

Tabela 4 - Especificações dimensionais.

VALORES	largura (mm)	espes. (mm)	raio canto (mm)
Mínimo	56,65	6,20	3,20
Máximo	57,65	6,60	4,80

OBS: As barras devem ter um comprimento de 6,00 a 6,10 metros e um empenamento máximo de 2,0m/mm.

Nesta campanha foram laminados 6 tarugos da corrida 45302 do aço SAE 5160. Este material seguiu o fluxo normal da bitola 2 x 1/4, com as devidas alterações já mencionas. Os últimos perfis da calibração desenvolvida para a laminação desta bitola são os seguintes:

- chato 49x14mm;
- chato 52x9,35mm, retirada de barras para testes em laboratório;
- chato 54x7,25mm;
- chato 56,9x6,4mm.

A exemplo da bitola anterior, foram controladas as temperaturas do último passe de laminação, de chegada ao leito de resfriamento, e ainda de desenformamento dos tarugos. Estes valores são mostrados na tabela 5.

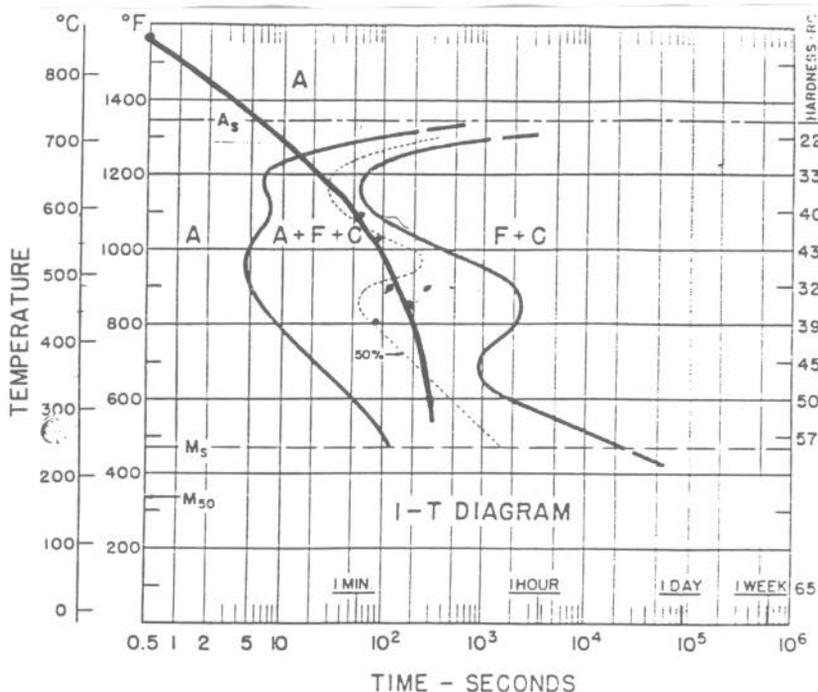
Tabela 5 - Temperaturas durante o processo de laminação.

	desenf. (°C)	ultimo passe (°C)	leito (°C)
cabeça da barra	--	1030	834
meio da barra	1132	1025	830
fim da barra	--	1017	--

OBS: -- = dados não registrados.

As temperaturas registradas durante o resfriamento de uma barra no leito foram plotadas na curva TTT do aço 5160, verificando-se, assim, as condições de resfriamento do material (figura 11)

Figura 11 - Perfil de resfriamento no leito.



Destas barras retiradas amostras para ensaios no DQ, e o restante foi estocado para testes futuros.

Conclui-se, que para esta bitola deve-se estudar mais um pouco a calibração do laminador, pois não atingimos o alargamento esperado. A bitola obtida foi 53,00 x 6,4mm, quando o desejado era 56,9 x 6,4mm. Quanto ao aço, este se comportou muito bem, não apresentando problemas operacionais nem defeitos superficiais durante o processo de laminação.

#### 4. ANÁLISE DAS BARRAS LAMINADAS

As duas bitolas de barras chatas produzidas foram amostradas e analisadas em laboratório no Desenvolvimento da Qualidade (DQ) da SR. O objetivo destas análises é a verificação do desempenho do material frente as normas de fornecimento para as indústrias produtoras de molas.

No laboratório de análises químicas foi determinada a composição química dos produtos, tendo em vista que esta sofre uma pequena variação da análise de panela para o produto final. Estes resultados podem ser observados na tabela 6.

Tabela 6 - Análise química das barras laminadas.

bitolas	elementos (% x 10 <sup>-2</sup> )							
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni
1 3/4 x 3/16	64	90	18	1,0	2,1	6,7	87	3,6
2 1/4 x 1/4	64	92	18	1,2	2,1	6,7	87	3,9

Estes valores são bastante parecidos com a composição de panela, estando dentro da faixa especificada para o aço SAE 5160.

A análise de gases via Lecò, indicou valores da ordem de 61 ppm de nitrogênio e 50 ppm de oxigênio nas

barras laminadas.

Os ensaios de tração e dureza, realizados no laboratório de ensaios físicos do DQ, mostraram os seguintes valores:

- para as barras de 1 3/4 x 3/16:

tensão de escoamento	- 928 N/mm <sup>2</sup>
tensão de ruptura	- 1213 N/mm <sup>2</sup>
alongamento	- 6 %
dureza	- 32 HRC

- para as barras de 2 1/4 x 1/4:

tensão de escoamento	- 747 N/mm <sup>2</sup>
tensão de ruptura	- 1106 N/mm <sup>2</sup>
alongamento	- 9,5 %
dureza	- 30 HRC

Os valores de tensão de ruptura, escoamento e alongamento mostram-se um pouco diferentes para o mesmo aço, isto se deve a bitola maior apresentar uma velocidade de resfriamento no leito mais baixa, e em consequência se obtém uma estrutura menos resistente e mais dúctil.

A norma ABNT EB-2165, referente a barras chatas de aço laminadas a quente para fabricação de molas e feixes de mola, indica, além das características dimensionais do material, a dureza máxima permitida de 341HB (36,6 HRC), para espessuras até 6mm e 320HB ( 34 HRC) para espessuras maiores que 6mm. Como pode ser visto, estas condições foram perfeitamente atendidas pelas duas bitolas produzidas na Siderúrgica Riograndense.

A análise metalográfica indicou uma estrutura perlítica com uma pequena camada descarbonetada. Na norma ABNT é indicado um valor máximo de descarbonetação de 0,20mm para barras com espessura menor que 7mm ( $3/16" = 4,76\text{mm}$  e  $1/4" = 6,35\text{mm}$ ). A análise metalográfica indicou 0,15mm para a bitola  $1\ 3/4 \times 3/16"$  e 0,10mm para a bitola  $2\ 1/4 \times 1/4"$ . O tamanho de grão nas barras laminadas se manteve em 8 a menor que 8.

Figura 12 - Fotografia da estrutura das barras de  $1\ 3/4 \times 3/16"$ , com ampliação de 100X e ataque com nital. Periferia.

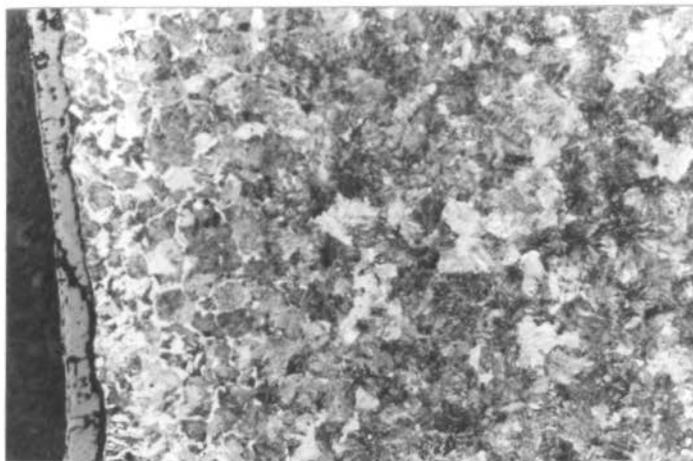
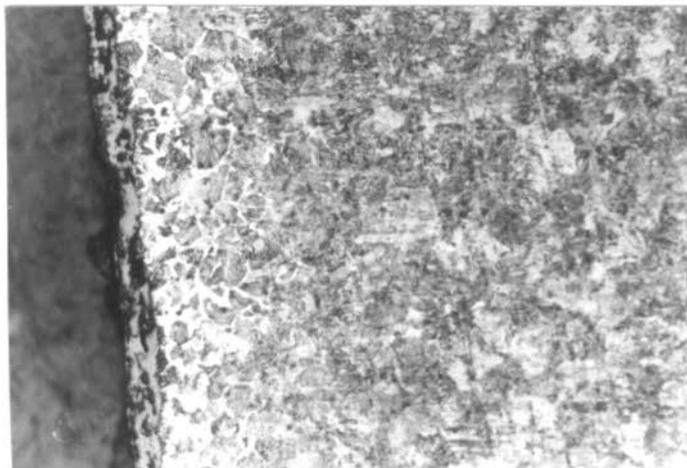


Figura 13 - Fotografia da estrutura das barras de 2 1/4 x 1/4", com ampliação de 100X e ataque com nital. Periferia.



Em relação a limpidez do aço, foi realizada um análise de inclusões de sulfeto de manganês em uma secção longitudinal do material laminado. Foi observado um índice de inclusões muito pequeno, caracterizando um material bastante limpo. A figura 14 mostra a imagem observada em uma das amostras e que representa perfeitamente o material produzido na SR.

Figura 14 - Fotografia de uma seção longitudinal do laminado. Ampliação de 500 X, sem ataque.

---



## 5. TESTE EM UMA INDÚSTRIA DE MOLAS

Com o objetivo de realizar um teste prático do desempenho do material em uma indústria produtora de molas, a SR enviou 400Kg de barra chata 1 3/4 x 3/16" e 400Kg de barras de 2 1/4 x 1/4" com um comprimento de 6m para o cliente Molas Carlon em Erechim, RS. Com este teste procuramos confirmar as boas condições do material observadas nos ensaios de laboratório.

O processo de produção dos feixes de molas inicia com o corte a frio das barras no tamanho especificado para a lâmina, confecção de furos para montagem dos feixes (a quente) e confecção do olhal nas pontas da mola (a quente).

Depois a mola segue para o forno de aquecimento para austenitização. Na saída do forno a mola semipronta recebe a forma final (curvatura) em uma prensa e em seguida é jogada em um tanque de óleo para a realização da têmpera. Após é feito um revenimento a cerca de 300°C. Obtém-se, assim, a lâmina de mola pronta para ser montada em feixes.

O aquecimento para confecção do olhal é feito em pequenos fornos a óleo, sem controle de temperatura ou atmosfera. A austenitização é realizada em um forno de soleira móvel, aquecido por queimador de óleo e sem controle de temperatura ou atmosfera.

No caso específico dos testes, as temperaturas de

conformação e saída do forno de austenitização foram medidas com o auxílio de um pirômetro de radiação (levado por nós). As temperaturas médias encontradas são as seguintes: aquecimento para conformação, de 1050 a 1150°C; saída do forno de austenitização, de 790 a 810°C.

Foram coletadas amostras do material em três etapas distintas do processo de produção de molas:

- material após confecção do olho;
- material temperado;
- material temperado/revenido.

As amostras do material testado e uma barra bruta podem ser observadas na figura 15.

Figura 15 - Fotografia das amostras retiradas durante a produção de molas; barra bruta, mola conformada e mola temperada/revenida.



O desempenho do material frente ao processo da empresa foi muito bom, não houve nenhum problema operacional com as máquinas da indústria ou com a qualidade superficial do produto.

A análise metalográfica das amostras coletadas durante o processo de produção das lâminas de mola revelou maiores dados sobre o desempenho o material. Estes resultados podem ser resumidos no quadro a seguir.

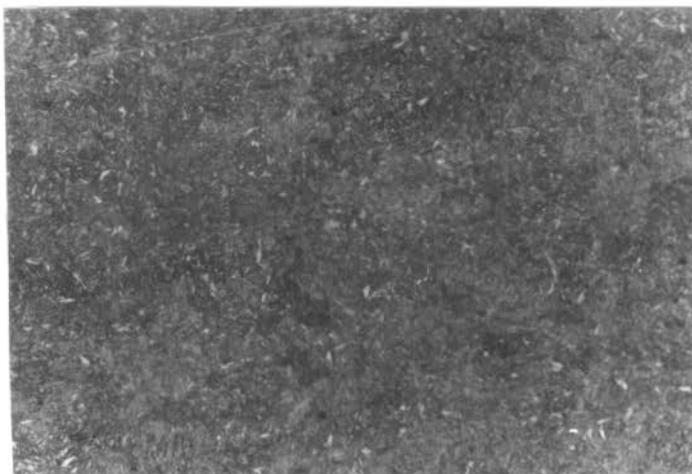
processo	1 3/4 x 3/16"	2 1/4 x 1/4"
conformado	granulação grosseira, algumas linhas de segregação. estrut. perlítica	granulação grosseira, algumas linhas de segregação. estrut. perlítica
temperado	estrutura totalmente martensítica, dureza de 64 HRC.	estrutura totalmente martensítica, dureza de 58 HRC.
temperado/ revenido	martensita reven., granulação fina, dureza 41 HRC.	martensita reven, granulação fina, dureza 38 HRC.

A estrutura do produto final (mola pronta) pode ser vista na figura 16, que representa as duas bitolas testadas.

Como pode ser observado, o tratamento térmico realizado na Molas Carlon não foi muito efetivo devido a um revenimento a temperatura muito elevada, onde se perdeu as

propriedades adquiridas com a têmpera.

Figura 16 - Fotografia da microestrutura de uma mola.



O ensaio de tração nas molas prontas (temperadas/revenidas), mostrou uma tensão de ruptura de  $1.327\text{N/mm}^2$  para a barra  $1\ 3/4 \times 3/16$ " e  $1.231\text{N/mm}^2$  para a barra de  $2\ 1/4 \times 1/4$ ".

No geral o material se comportou bem, atingido a dureza de 64HRC em uma das amostras, o que comprova a boa temperabilidade do material. Quanto as amostras finais (mola pronta), pode-se atribuir os resultados de dureza (abaixo do mínimo) à falta de controle de temperaturas e tempos do revenido realizado na fábrica de molas visitada.

## 6.DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO SAE 5160

### 6.1.Objetivo

Sabendo que o material produzido na Siderúrgica Riograndense atendeu plenamente as condições de fornecimento para as indústrias de molas, resta a determinação das propriedades desenvolvidas por este material após os tratamentos térmicos empregados na fabricação das molas. Como já foi comentado, as molas após conformadas são temperadas e revenidas com o objetivo de obter uma estrutura totalmente martensítica e, conseqüentemente, as propriedades especificadas para o componente.

O material produzido pela Siderúrgica Riograndense foi, então, submetido ao tratamento térmico de tempera mais revenido e, buscando um tratamento alternativo, foi submetido a austêmpera. Como já foi comentado, a austêmpera produz uma estrutura bainítica, com dureza e resistência semelhantes a martensita revenida, mas apresentando uma maior ductilidade.

Para a determinação das propriedades físicas do material, foi necessária a confecção de corpos de prova específicos para ensaios de tração e de tenacidade a fratura ( $K_{IC}$ ). Os tratamentos de têmpera mais revenido e austêmpera foram realizados diretamente nos corpos de prova usinados.

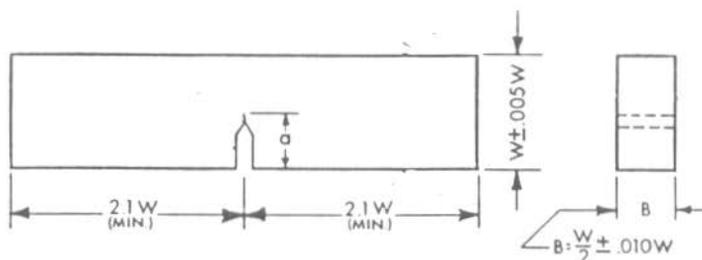
## 6.2.Preparação dos Corpos de Prova

A necessidade de corpos de prova com dimensões específicas exigiu a retirada de amostras durante a laminação das barras chatas. Estas amostras representam perfeitamente o aço SAE 5160 produzido na Siderúrgica Riograndense (corrida 45302).

Os corpos de prova para  $K_{IC}$  foram obtidos a partir de amostras retiradas durante a laminação da bitola de barra chata 2 1/4 x 1/4". Estas amostras foram retiradas antes do último passe de laminação, apresentando as dimensões 52 x 9,35mm. Este procedimento foi necessário pois nenhuma das duas bitolas produzidas atenderam a mínima espessura necessária para confecção dos corpos de prova para o ensaio de  $K_{IC}$  deste tipo de material.

Ao total foram confeccionados oito corpos de prova, sendo necessário um tratamento térmico prévio de esferoidização para facilitar a usinagem destes. Os corpos de prova são retangulares e apresentam as seguintes dimensões: espessura de 9mm, largura de 18mm e comprimento de 80mm. A figura 17 mostra um desenho esquemático do tipo de corpo de prova utilizado nos ensaios, mostrando as todas as dimensões em relação a altura (W).

Figura 17 - Desenho do corpo de prova de  $K_{IC}$



Após a usinagem, os corpos de prova foram lixados para a retirada da carepa e sofreram um corte transversal para confecção do entalhe necessário à abertura da trinca de fadiga, conforme norma referente ao ensaio. O entalhe foi realizado por uma serra com disco de corte diamantado com 35 mm de espessura. A profundidade do entalhe é de 4mm.

Os corpos de prova devidamente entalhados estão prontos para receberem os tratamentos térmicos de austêmpera e têmpera mais revenido.

Já os corpos de prova para ensaio de tração foram retirados diretamente das barras de  $2 \frac{1}{4} \times \frac{1}{4}$  ", apresentando um comprimento de 30cm. Após foram cortadas longitudinalmente ao meio para facilitar as operações de tratamento térmico e a execução dos ensaios. Ao todo foram preparados 4 corpos de prova, 2 para têmpera mais revenido e 2 para austêmpera.

### 6.3. Tratamentos Térmicos Realizados

Devido as dimensões dos corpos de prova de tração e  $K_{IC}$  serem bastante diferentes, os tratamentos térmicos foram realizados em lotes separados.

Para os corpos de  $K_{IC}$ , a austêmpera foi realizada na Escola Tupy em Joinville, SC. Foram tratados 4 corpos de prova que passaram basicamente pelas seguintes etapas:

- aquecimento de austenitização a  $840^{\circ}\text{C}$  durante 10 minutos;
- resfriamento em sal fundido a temperatura de  $290^{\circ}\text{C}$  e permanência neste por 60 minutos, para completar a transformação em bainita.

A têmpera e revenido foi realizada no próprio Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS nos 4 corpos de prova restantes, compreendendo as seguintes etapas:

- Aquecimento em forno de resistência elétrica a  $880^{\circ}\text{C}$  durante 45 minutos, com proteção contra descarbonetação por acondicionamento em caixa com carvão;
- Resfriamento em óleo com agitação manual das peças;
- Revenimento prévio em estufa à temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$  durante 60 minutos, para evitar a estabilização da austenita.
- Revenimento a  $400^{\circ}\text{C}$  durante 60 minutos para acertar a dureza na faixa especificada para molas.

O material para ensaio de tração teve os tratamentos principais realizados na Escola Técnica Tupy, restando somente o revenimento para acerto de dureza para ser realizado no LAMEF. O tratamento de têmpera e revenido teve as seguintes etapas:

- Aquecimento de austenitização;
- Resfriamento em óleo;
- Revenimento para evitar a estabilização da austenita a 200°C por 60 minutos;
- Revenimento para acerto de dureza a 400°C durante 60 minutos (LAMEF).

A austêmpera foi toda realizada na Escola Tupy seguindo os mesmos parâmetros do tratamento realizado nos corpos de prova para  $K_{IC}$ .

## **6.4. Ensaios Realizados**

### **6.4.1. Dureza**

O tipo de dureza escolhido para as medidas foi a Rockwell C (HRC), devido as características do material e a este tipo de medida estar bastante difundido no nosso meio.

A dureza foi medida no material para ensaio de tração e ensaio de tenacidade a fratura, observando para que as impressões fossem realizadas em regiões dos corpos de prova onde não acarretassem em problemas nos ensaios posteriores. Os ensaios de dureza foram realizados no

Laboratório de Ensaios Físicos (LEF) da Siderúrgica Riograndense, em um durômetro Reicherter modelo Briviscop. No material para  $K_{IC}$  foram feitas 3 impressões por corpo de prova, e no material para tração, 4 impressões em cada amostra. Os resultados encontrados são os seguintes:

- material austemperado:

	<u>média</u>	<u>d.padrão</u>
C.Prova $K_{IC}$	47,1 HRC	0,8
C.Prova tração	47,6 HRC	0,5

- material temperado/revenido:

	<u>média</u>	<u>d.padrão</u>
C.Prova $K_{IC}$	44,3 HRC	0,5
C.Prova tração	47,4 HRC	0,4

#### 6.4.2. Ensaio de Tração

Os testes foram realizados no Laboratório de Ensaaios Físicos da Siderúrgica Riograndense, em uma máquina universal de ensaios de materiais Wolpert, tipo 60 TUZ. Foram registradas as curvas força por deformação, de onde foram calculados os valores de tensão de escoamento(LE). O limite de ruptura(LR) foi obtido através da força de ruptura lida diretamente no registrador da máquina e o alongamento (Al) foi determinado por marcações feitas nos corpos de prova, medidas antes e após o ensaio. Os resultados obtidos são os seguintes:

- Temperado e revenido: LE -  $1475 \text{ N/mm}^2$ ;  
LR -  $1675 \text{ N/mm}^2$ ;  
Al - 7%.
  
- Austemperado: LE -  $1516 \text{ N/mm}^2$ ;  
LR -  $1705 \text{ N/mm}^2$ ;  
Al - 12%.

O tipo de fratura pelo qual o material rompeu e os valores de alongamento registrados nos ensaios de tração mostram a diferença entre a estrutura bainítica resultante da austêmpera e a estrutura de martensita revenida. O material austemperado apresentou uma fratura dúctil, enquanto o temperado e revenido uma fratura frágil, para valores semelhantes de limite de ruptura e escoamento. Isto

confirma a superioridade da estrutura bainítica para mesmos carregamentos mecânicos.

Figura 18 - Fratura do corpo de prova austemperado.



Figura 19 - Fratura do corpo de prova temperado e revenido.



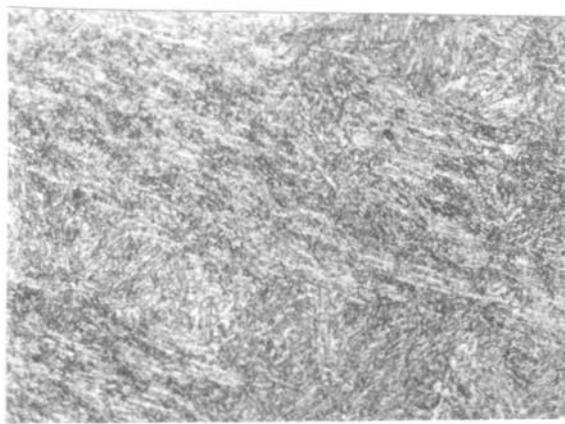
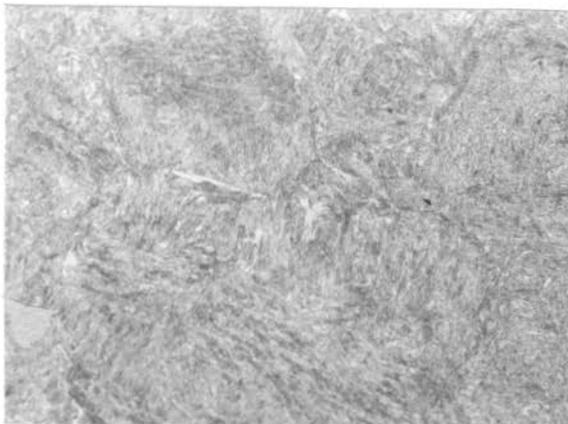
As análise metalográfica das amostras tracionadas mostram uma estrutura bainítica no corpo de prova austemperado e uma estrutura de martensita revenida no temperado e revenido. As fotografias das microestruturas

encontradas são mostradas nas figuras 20 e 21.

Figura 20 - Material austemperado com ampliação de 500 e 1250 X. Ataque com nital.



Figura 21 - Material temperado e revenido com ampliação de 500 e 1250 X. Ataque com nital.



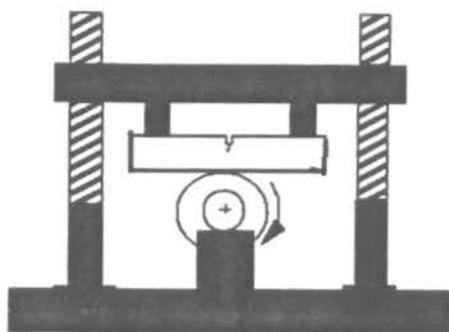
### 6.4.3. Tenacidade à Fratura ( $K_{IC}$ )

Este ensaio determina uma propriedade relacionada com a mecânica da fratura, a tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) do material. Com este ensaio se obtém um propriedade intrínseca do material de grande utilidade na determinação de parâmetros de projetos mais atuais, onde se necessita segurança com o mínimo peso do equipamento.

Após o tratamento térmico, os corpos de prova tiveram suas laterais lixadas para obtenção de uma superfície semipolida. Isto facilita a observação do crescimento da trinca de fadiga até a profundidade especificada.

A trinca de fadiga é aberta a partir do entalhe já confeccionado, devendo somar junto com o entalhe uma profundidade 9mm de defeito, metade da altura. A trinca é aberta com o auxílio de uma máquina de eixo excêntrico, onde o carregamento é alternado em ciclos. A máquina é acionada por um motor elétrico, realizando 850 ciclos por minuto com um deslocamento (flexa) de 0,21mm. Na figura 22 é mostrado um esquema desta máquina.

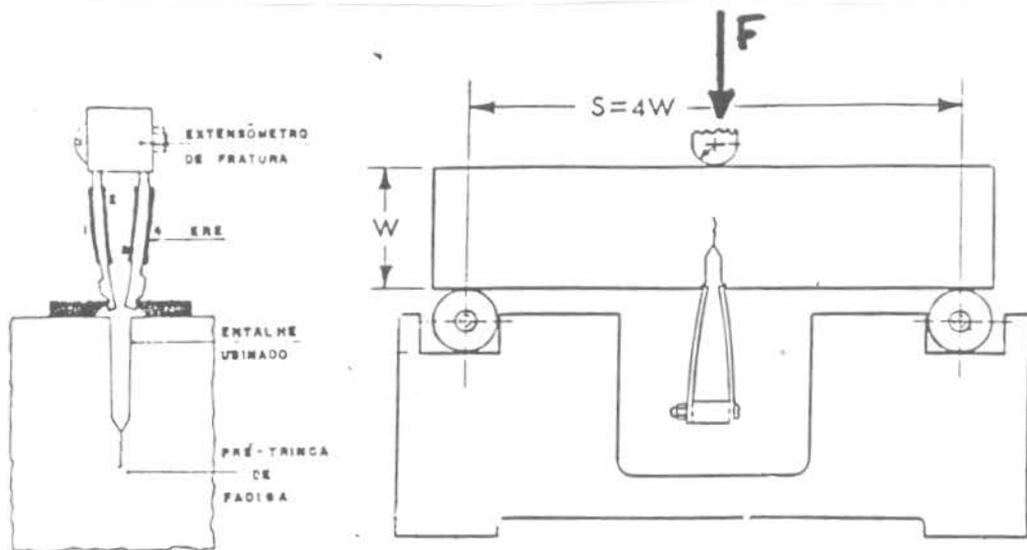
Figura 22 - Esquema da máquina utilizada para abrir a trinca de fadiga.



Após a abertura da trinca, são colados os suportes de acrílico para a fixação do extensômetro de fratura (Clip Gage) no corpo de prova.

Em seguida os 8 corpos de prova foram ensaiados em uma máquina de compressão do Laboratório de Ensaio Mecânicos da UFRGS. O material preparado para o ensaio com o encaixe do extensômetro e posicionamento do corpo de prova nos roletes de apoio, como mostra a figura 23.

Figura 23 - Colocação do extensômetro e posicionamento do corpo de prova.



O ensaio inicia com o acionamento da máquina, sendo a força aplicada lentamente até a ruptura do corpo de prova. A força máxima é lida no indicador da própria máquina. Todo o ensaio é documentado por um registrador "XY", onde o eixo X marca a deformação (lida pelo extensômetro) e o eixo Y indica a força (medida por uma célula de carga).

Se obtém, então, uma curva de força por deformação para cada teste. Desta curva são retirados os dados necessários para a determinação do  $K_{IC}$ .

Figura 24 - Curva do ensaio de  $K_{IC}$  para o material temperado e revenido.

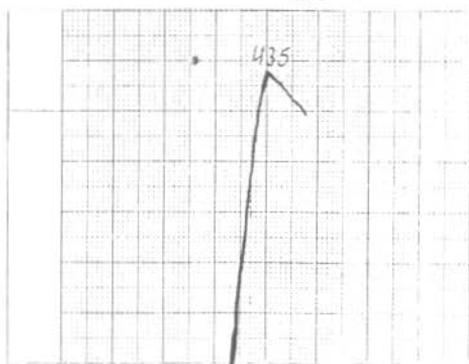
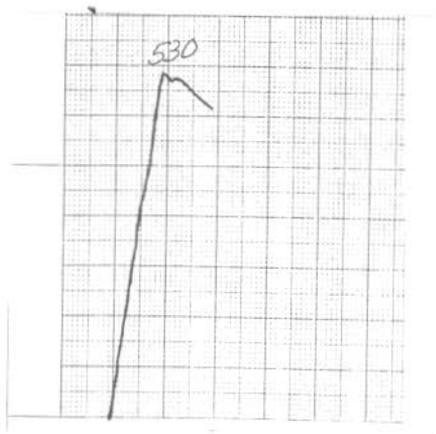


Figura 25 - Curva do ensaio de  $K_{IC}$  para o material austemperado.



O  $K_{IC}$  é calculado pela fórmula:

$$K_{IC} = P_Q \cdot s \cdot Y / B \cdot W^{1/2}, \text{ onde:}$$

- $P_Q$  = força máxima (ruptura), lida na máquina ou no gráfico do ensaio;
- $s$  = distância entre apoios;
- $Y$  = fator de forma, função da relação  $a/w$  (tamanho do defeito/altura do C.P.), pode ser calculado ou retirado de uma tabela;
- $B$  = espessura do C.P.;
- $W$  = altura do corpo.

Os valores de  $K_{IC}$  encontrados são os seguintes: material temperado e revenido  $54,7 \text{ MPa}/\text{m}^{1/2}$  e para o austemperado  $40,2 \text{ MPa}/\text{m}^{1/2}$ . As planilhas com os cálculos são mostradas a seguir. Os corpos de prova são identificados da seguinte forma: Ax indica C.P. austemperado número x e TRx C.P. temperado e revenido número x.

Estes resultados indicam um melhor comportamento em relação a tenacidade à fratura do aço SAE 5160 temperado e revenido. Isto pode ser devido a este apresentar uma dureza cerca de 3 pontos (HRC) mais baixa que a do material austemperado ou a características estruturais oriundas dos tratamentos térmicos (tamanho de grão, descarbonetação, etc).

PLANILHA DE CÁLCULO DO  $K_{IC}$

- Material austemperado:

OBS: o C.P. A2 foi desconsiderado para o cálculo do valor de  $K_{IC}$  do material austemperado.

**CP = A1**

**DADOS**

PQ = 3994 carga maxima(N)  
 S = 72 distancia apoios(m) 0,072 m  
 B = 8,83 espessura C.P.(mm) 0,00883 m  
 W = 17,17 altura C.P.(mm) 0,01717 m  
 a = 8,78 tamanho trinca(mm) 0,00878 m  
 a/W = 0,511357  
 f(a/W) = 2,765022

**CALCULOS**

KQ = 40,02423 MPa.m<sup>1/2</sup>

**TESTE DE VALIDADE**

T.escoa= 1516 MPa fator B= 0,001743  
 cond.: se fator B for menor q 0,00883 entao KQ = KIC.

**KIC = 40,02 MPa.m<sup>1/2</sup>**

---

**CP = A2**

**DADOS**

PQ = 2649 carga maxima(N)  
 S = 72 distancia apoios(m) 0,072 m  
 B = 8,91 espessura C.P.(mm) 0,00891 m  
 W = 17,75 altura C.P.(mm) 0,01775 m  
 a = 12,78 tamanho trinca(mm) 0,01278 m  
 a/W = 0,72  
 f(a/W) = 6,156222

**CALCULOS**

KQ = 55,72544 MPa.m<sup>1/2</sup>

**TESTE DE VALIDADE**

T.escoa= 1516 MPa fator B= 0,003378  
 cond.: se fator B for menor q 0,00891 entao KQ = KIC.

**KIC = 55,73 MPa.m<sup>1/2</sup>**

# CALCULO DE KIC:

$$CP = A3$$

## DADOS

PQ =	4415	carga maxima(N)	
S =	72	distancia apoios(m)	0,072 m
B =	8,95	espessura C.P.(mm)	0,00895 m
W =	17,68	altura C.P.(mm)	0,01768 m
a =	8,88	tamanho trinca(mm)	0,00888 m
a/W =	0,502262		
f(a/W) =	2,684405		

## CALCULOS

$$KQ = 40,5569 \text{ MPa.m}^{1/2}$$

## TESTE DE VALIDADE

T.escoa= 1516 MPa      fator B= 0,001789  
cond.: se fator B for menor q 0,00895 entao KQ = KIC.

$$KIC = 40,56 \text{ MPa.m}^{1/2}$$

---

$$CP = A4$$

## DADOS

PQ =	4267	carga maxima(N)	
S =	72	distancia apoios(m)	0,072 m
B =	8,86	espessura C.P.(mm)	0,00886 m
W =	17,66	altura C.P.(mm)	0,01766 m
a =	9,01	tamanho trinca(mm)	0,00901 m
a/W =	0,510193		
f(a/W) =	2,754495		

## CALCULOS

$$KQ = 40,6984 \text{ MPa.m}^{1/2}$$

## TESTE DE VALIDADE

T.escoa= 1516 MPa      fator B= 0,001802  
cond.: se fator B for menor q 0,00886 entao KQ = KIC.

$$KIC = 40,7 \text{ MPa.m}^{1/2}$$

- Material temperado e revenido:

## CALCULO DE KIC:

CP = TR1

### DADOS

PQ = 5199 carga maxima(N)  
S = 72 distancia apoios(m) 0,072 m  
B = 8,8 espessura C.P.(mm) 0,0088 m  
W = 17,59 altura C.P.(mm) 0,01759 m  
a = 9,46 tamanho trinca(mm) 0,00946 m  
a/W = 0,537806  
f(a/W) = 3,021538

### CALCULOS

KQ = 55,09332 MPa.m<sup>1/2</sup>

### TESTE DE VALIDADE

T.escoa= 1516 MPa fator B= 0,003302  
cond.: se fator B for menor q 0,0088 entao KQ = KIC.

KIC = 55,09 MPa.m<sup>1/2</sup>

---

CP = TR2

### DADOS

PQ = 5396 carga maxima(N)  
S = 72 distancia apoios(m) 0,072 m  
B = 8,65 espessura C.P.(mm) 0,00865 m  
W = 17,7 altura C.P.(mm) 0,0177 m  
a = 9,12 tamanho trinca(mm) 0,00912 m  
a/W = 0,515254  
f(a/W) = 2,800704

### CALCULOS

KQ = 53,41899 MPa.m<sup>1/2</sup>

### TESTE DE VALIDADE

T.escoa= 1516 MPa fator B= 0,003104  
cond.: se fator B for menor q 0,00865 entao KQ = KIC.

KIC = 53,42 MPa.m<sup>1/2</sup>

# CALCULO DE KIC:

**CP = TR3**

## DADOS

PQ = 5494 carga maxima(N)  
S = 72 distancia apoios(m) 0,072 m  
B = 8,7 espessura C.P.(mm) 0,0087 m  
W = 17,7 altura C.P.(mm) 0,0177 m  
a = 9,16 tamanho trinca(mm) 0,00916 m  
a/W = 0,517514  
f(a/W) = 2,821717

## CALCULOS

KQ = 54,48229 MPa.m<sup>1/2</sup>

## TESTE DE VALIDADE

T.escoa= 1516 MPa fator B= 0,003229  
cond.: se fator B for menor q 0,0087 entao KQ = KIC.

KIC = **54,48** MPa.m<sup>1/2</sup>

---

**CP = TR4**

## DADOS

PQ = 5297 carga maxima(N)  
S = 72 distancia apoios(m) 0,072 m  
B = 8,8 espessura C.P.(mm) 0,0088 m  
W = 17,28 altura C.P.(mm) 0,01728 m  
a = 9,12 tamanho trinca(mm) 0,00912 m  
a/W = 0,527778  
f(a/W) = 2,920219

## CALCULOS

KQ = 55,71595 MPa.m<sup>1/2</sup>

## TESTE DE VALIDADE

T.escoa= 1516 MPa fator B= 0,003377  
cond.: se fator B for menor q 0,0088 entao KQ = KIC.

KIC = **55,72** MPa.m<sup>1/2</sup>

## 7.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1.TABELA DE RESULTADOS

MATERIAL	DUREZA (HRC)	L.ESCOAM (MPa)	L.RUPTURA (MPa)	ALONG. (%)	K <sub>IC</sub>
B. LAMINADA 1 3/4X3/16"	32	928	1213	6	--
B. LAMINADA 2 1/4X1/4"	30	747	1106	9,5	--
MOLA CLIENTE 1 3/4X3/16"	41	--	1330	--	--
MOLA CLIENTE 2 1/4X1/4"	38	--	1230	--	--
T <sub>TEMPERA</sub> E REVIDO	47,4*	1475	1675	7	54,7
AUST <sub>TEMPERA</sub>	47,6*	1516	1705	12	40,2

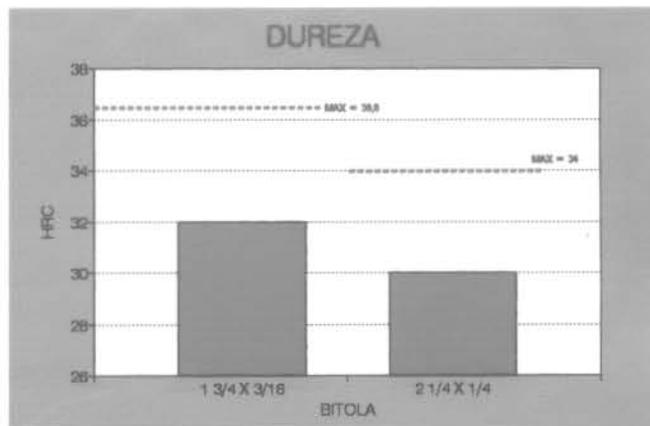
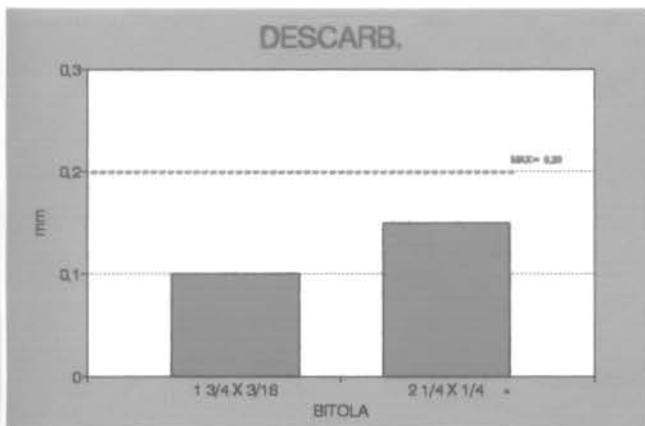
OBS: -- medidas não realizadas.

\* dureza nos corpos de prova de tração.  
K<sub>IC</sub> em MPa/m<sup>1/2</sup>.

## 7.2.DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As propriedades físicas apresentadas pelo material produzido na Siderúrgica Riograndense alcançaram valores plenamente satisfatórios para um "aço mola". Ou seja, uma boa ductilidade enquanto produto bruto de laminação para possibilitar a conformação das lâminas de mola, e um alto limite de elasticidade após tratamento térmico de têmpera mais revenido ou austêmpera para garantir um bom desempenho à mola.

A dureza e a camada descarbonetada do material bruto de laminação comparadas com as especificações de fornecimento são mostradas nos gráficos abaixo.

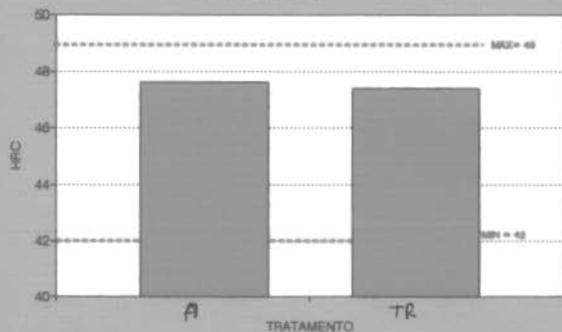


Como pode ser observado o comportamento do material produzido foi muito bom, ficando inteiramente dentro das faixas especificadas.

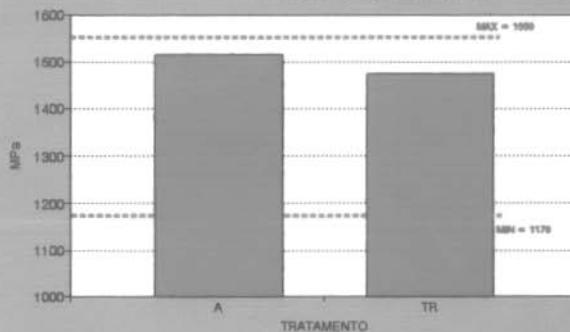
O material após os tratamentos térmicos de

austêmpera (A) e têmpera mais revenimento (TR) representa uma mola pronta para utilização. Os resultados dos testes realizados são comparados com as especificações encontradas para uma mola. Os corpos de prova para ensaio de tração forneceram os resultados que são mostrados a seguir.

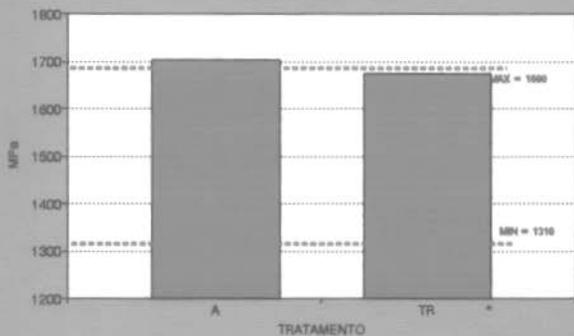
DUREZA



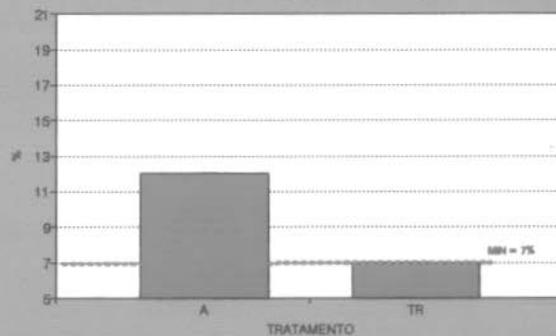
LIM. ESCOAMENTO



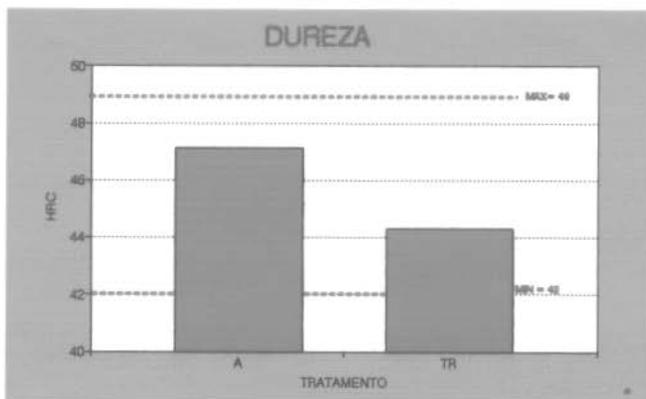
LIM. RUPTURA



ALONGAMENTO



Os corpos de prova de  $K_{IC}$  apresentam valores de dureza um pouco diferentes, possivelmente devido a pequenas diferenças nos tratamentos térmicos. Este resultado é mostrado no gráfico a seguir.



Observa-se que o material atendeu plenamente as necessidades de uma mola e no caso do limite de ruptura do material austemperado, o valor encontrado foi até superior ao especificado.

Os valores de  $K_{IC}$  encontrados são muito bons para o tipo de aço e o processo de produção utilizado. Podendo ser comparados com outros aços mais nobres como por exemplo o SAE 4340 revenido a  $205^{\circ}$  que apresenta valores de  $44\text{MPa}/\text{m}^{1/2}$  (também retirado de CP de uma seção longitudinal).

## 8. CONCLUSÃO

Lembrando que este é um produto totalmente novo para a Siderúrgica Riograndense, as barras chatas de aço SAE 5160 apresentaram um excelente comportamento, sem nenhum tipo de problema operacional na aciaria ou laminação. O material produzido atendeu plenamente as especificações existentes para fornecimento de barras chatas para molas ou feixes de molas. Este material apresentou, também, um bom comportamento na fabricação de molas, observado em um teste na empresa Molas Carlon, Erechim (RS).

Os testes realizados em laboratório procuraram determinar as propriedades físicas do material quando tratado termicamente. Os tratamentos realizados simulam a prática convencional de produção deste tipo de mola. Os resultados obtidos confirmam as boas qualidades do material e confirmam a viabilidade da produção de barras chatas de aço SAE 5160 na siderúrgica Riograndense.

As propriedades físicas exigidas de um aço mola foram totalmente atendidas pelos ensaios de tração e dureza, caracterizando um material dúctil antes dos tratamentos térmicos e após estes, um material com excelente resistência mecânica. O tratamento térmico de austêmpera apresentou resultados superiores ao temperado e revenido, com melhor resistência e maior alongamento. Já o valor de tenacidade à

fratura ( $K_{IC}$ ) do material temperado e revenido foi muito bom para um aço desta composição química, confirmando o baixo índice de inclusões deste material. O material bainítico (austemperado) apresentou valores menores de  $K_{IC}$  provavelmente devido a crescimento do grão durante o tratamento térmico.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 - Steel Springs, Metals Handbook. Volume 1, 10<sup>o</sup> edição.
- 2 - Barra Chata de Aço Laminada a Quente Para Fabricação de Molas e Feixes de Mola. ABNT EB-2165, Nov./1991.
- 3 - Metalurgia Mecânica, George Dieter, 1981.
- 4 - Aços e Ferros Fundidos, Vicente Chiaverinni, 6<sup>o</sup> ed., 1990, ABM.
- 5 - Metalografia dos Produtos Siderúrgicos, Humbertus Colpaert, 3<sup>o</sup> ed., 1974.
- 6 - Optical Microscopy of Carbon Steels, Leonard E. Samuels. ASM - American Society for Metals, 1990.
- 7 - Standar Test Method for Plaine-Strain Fracture Toughness of Mettalic Materials. ASTM E 399-90, 1990.