

3 MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Material

O material adotado no presente trabalho foi um aço do tipo SAE 4140 recebido em forma de barra circular com diâmetro e comprimento de 165 mm e 120 mm, respectivamente. A composição química real do aço acha-se apresentada na Tabela 3.1, assim como aquelas fornecidas pela especificação SAE e quando da certificação do material pelo seu fabricante (Aços Finos Piratini).

Tabela 3.1 – Composição Química do material (% em peso).

Elemento	Especificação SAE (%)	Certificação do aço (%)	Composição Real (%)
C	0,38-0,43	0,41	0,39
Mn	0,75-1,00	0,83	0,80
Mo	0,15-0,25	0,21	0,20
Ni	-----	0,02	0,02
Cr	0,80-1,10	0,99	0,99
Si	0,15-0,35	0,21	0,24
P	0,035 (máx.)	0,018	0,021
S	0,040 (máx.)	0,027	0,032
Cu	-----	0,01	0,01
V	-----	-----	0,006
Al	-----	0,034	0,033

3.2. Corte de Amostras

Todas as etapas de preparação do aço SAE 4140 foram executadas na Companhia Brasileira de Amarras (BRASILAMARRAS), localizada no município de Niterói, Estado do Rio de Janeiro.

Após o seu recebimento a barra foi encaminhada diretamente para a operação de corte, para a retirada de barretas circulares com diâmetro e comprimento de 15 mm e 120 mm, respectivamente, que sofreram tratamentos térmicos posteriores. Para a operação de corte da barra foi empregada uma Serra Fita Horizontal Manual modelo FM-1600, da marca FRANHO, com uma capacidade de corte de 90° ou 45° dependendo da direção de corte, peso aproximado de 450 kg e motor de acionamento de 2 cv.

3.3. Tratamentos Térmicos

Preliminarmente, estudou-se a taxa de resfriamento do forno tipo “mufla” que seria adotado nos tratamentos térmicos, sob duas condições diferentes de resfriamentos, isto é, com a porta aberta e fechada, a partir de uma temperatura de austenitização de 870°C. Os gráficos resultantes do estudo preliminar se encontram apresentados nas Figuras 3.1 e 3.2.

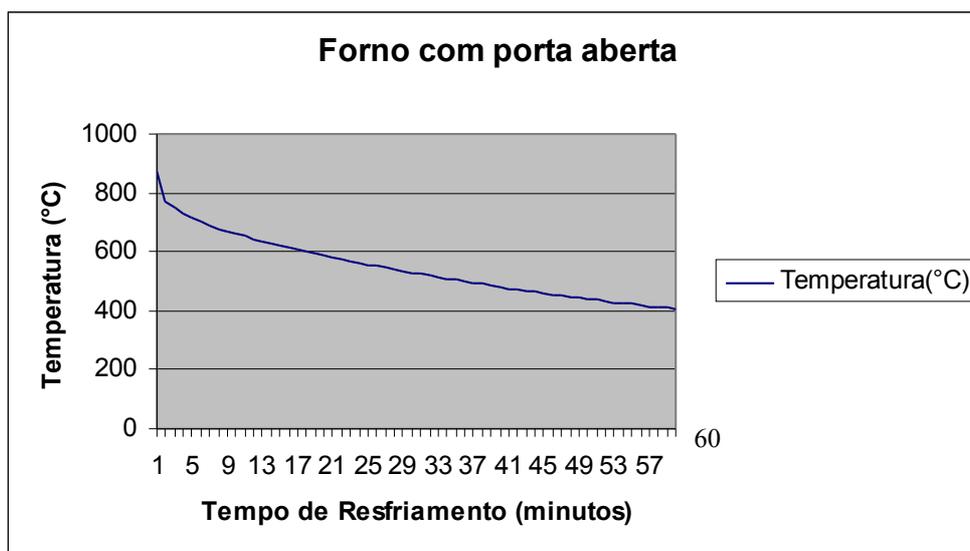


Figura 3.1 – Variação de temperatura do forno com a porta aberta

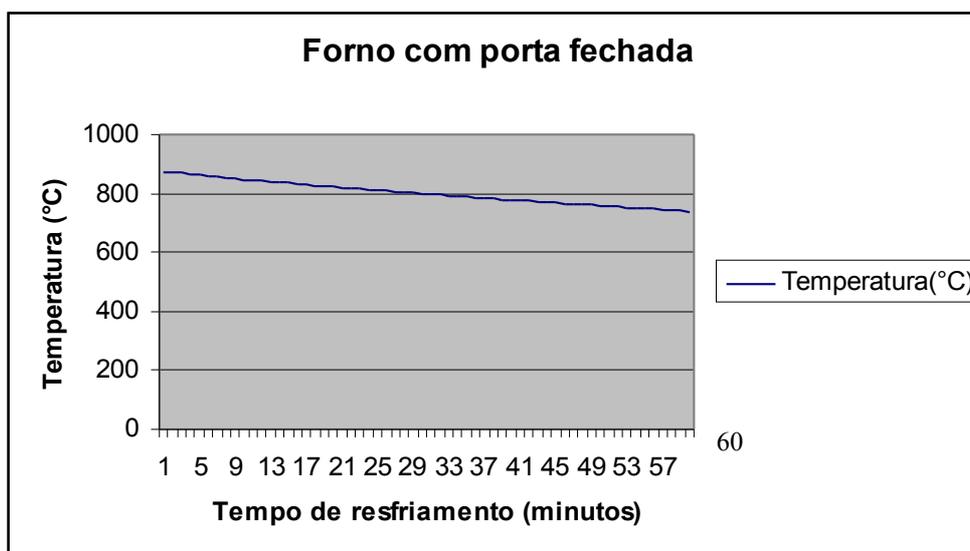


Figura 3.2 – Variação de temperatura do forno com a porta fechada

Logo após a operação de corte das amostras, as mesmas foram grupadas em lotes e tratadas termicamente (têmpera e revenido) em forno elétrico, marca MERCKTHERM, modelo FACH, com temperatura máxima de tratamento de 1200°C e taxa de aquecimento de 2°C por minuto.

As barretas foram temperadas a partir de suas permanências em diferentes temperaturas de austenitização durante 30 minutos, seguindo-se resfriamento em óleo. O tratamento térmico de revenido pós-têmpera foi realizado em diferentes temperaturas e tempos, tendo ocorrido o resfriamento das amostras em óleo a partir de diferentes temperaturas e taxas de resfriamento. A Tabela 3.2 apresenta todos os parâmetros adotados nos tratamentos térmicos.

Tabela 3.2 – Quadro Resumo dos Diferentes Tratamentos Térmicos Adotados

Lote / Condição Microestrutural	Têmpera	Resfriamento	Revenido	Resfriamento
1 2 3 4 5 6	870°C, 30 minutos	imediatamente em óleo	650°C, 1 hora 650°C, 2 horas 650°C, 3 horas 650°C, 4 horas 650°C, 5 horas 650°C, 6 horas	imediatamente em óleo
7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18	870°C, 30 minutos	imediatamente em óleo	650°C, 1 hora	575°C, fechado 575°C, aberto 550°C, fechado 550°C, aberto 500°C, fechado 500°C, aberto 450°C, fechado 450°C, aberto 400°C, fechado 400°C, aberto 375°C, fechado 375°C, aberto imediatamente em óleo
19 20 21 22	870°C, 30 minutos	imediatamente em óleo	560°C, 1 hora 590°C, 1 hora 620°C, 1 hora 680°C, 1 hora	imediatamente em óleo
23 24	840°C, 30 minutos 900°C, 30 minutos	imediatamente em óleo	680°C 680°C	imediatamente em óleo
25	870°C	imediatamente em óleo	680°C	imediatamente em óleo

3.4. Posição de Retirada e Geometria dos Corpos de Prova das Amostras

Após os tratamentos térmicos, corpos de prova para os ensaios de tração foram usinados na posição Z-X, enquanto corpos de prova para ensaios de energia de impacto foram usinados nas posições Z-X e Z-Y, conforme apresentado na Figura 3.3.

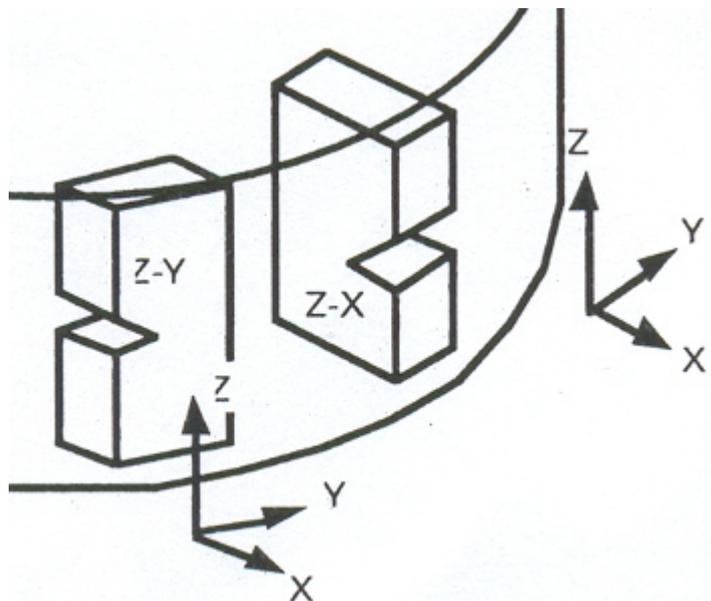


Figura 3.3 - Posição de retirada de corpos de prova das amostras [69]

Para os ensaios de tração, foram adotados corpos de prova do tipo cilíndrico, com diâmetro nominal de 6,25mm e apresentado na Figura 3.4.

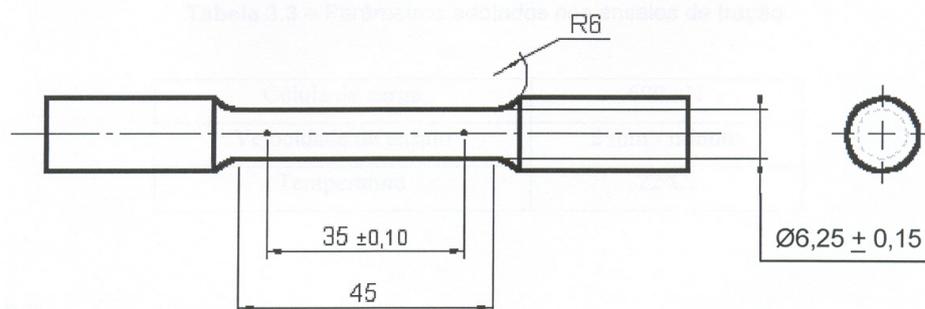


Figura 3.4 - Geometria do corpo de prova de tração [70]

Para os ensaios de impacto foram adotados corpos de prova padrão do tipo Charpy, com entalhe em "V" e apresentado na Figura 3.5.

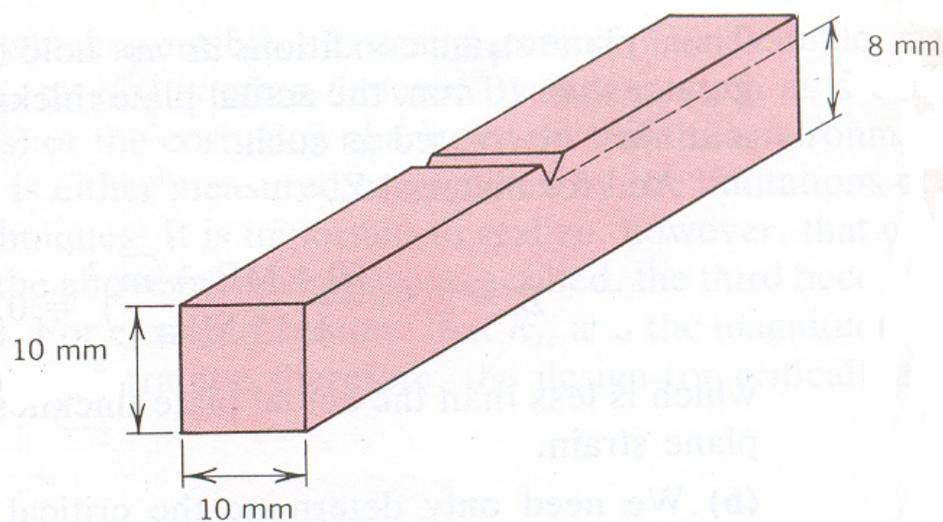


Figura 3.5 - Geometria do corpo de prova Charpy [70]

3.5. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração para a determinação das propriedades mecânicas básicas do material após os diferentes tratamentos térmicos foram realizados em uma máquina da marca Kratos, modelo K60000 MP e com célula de carga de 600KN. O ensaio dos corpos de prova de tração obedeceu à norma ASTM E370 [71] sendo utilizado três corpos de prova por condição microestrutural, pois esta foi à quantidade máxima retirada de cada amostra (vide Tabela 3.2), exceto para o lote 25. Isto se deve ao fato de que tal lote foi tratado termicamente em condições similares àquelas do lote 22 com o objetivo de ser ensaiado apenas ao impacto. A Tabela 3.3 apresenta as características do ensaio de tração.

Tabela 3.3 – Parâmetros adotados no ensaio de tração

Célula de carga	60000 kgf
Velocidade de ensaio	5,0 mm/min
Temperatura	22°C

3.6. Ensaio de Impacto

A principal justificativa para a utilização deste ensaio foi avaliar a tenacidade ao impacto das diferentes condições microestruturais. O ensaio foi realizado em uma máquina modelo UT-30 com faixa nominal de trabalho de 15 kgm a 30 kgm (metro kilograma) e valor de divisão de 0,1 kgm a 0,2 kgm, apresentando largura do cutelo (e_s) de $(13,1 \pm 0,1)$ mm da marca AVK-Budapest, apresentada esquematicamente na Figura 3.6. Já a Figura 3.7, apresenta, esquematicamente, a posição de impacto do pêndulo no corpo de prova durante o ensaio.

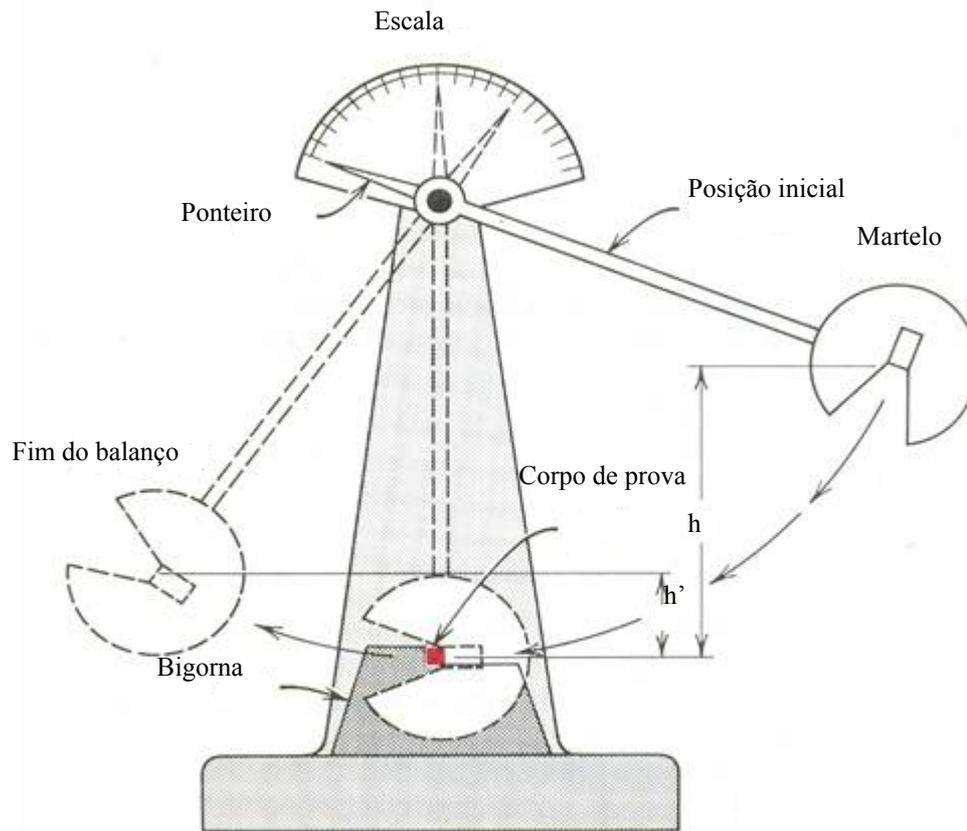


Figura 3.6 – Desenho da máquina de Impacto Charpy [70]

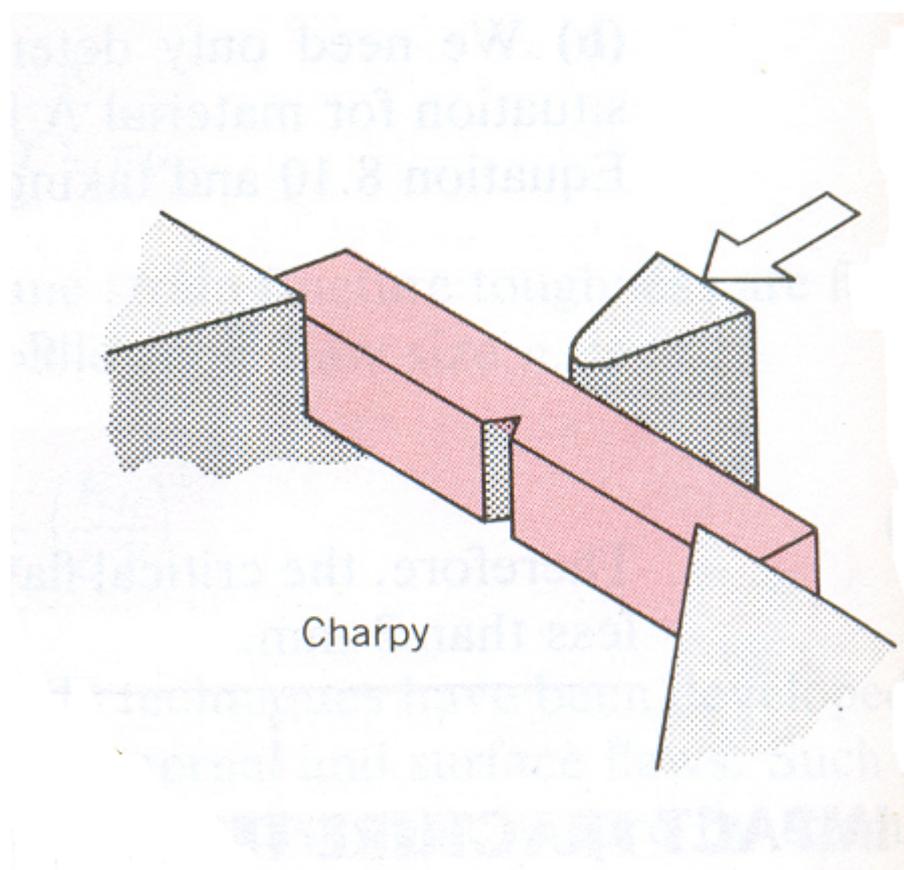


Figura 3.7 – Posição do corpo de prova Charpy [70]

O ensaio obedeceu à norma ASTM E-23-05 [72] sendo utilizados seis corpos de prova por condição microestrutural. Os corpos de prova Charpy foram cortados transversalmente, seguidos do procedimento de polimento e ataque convencional com nital 2%. A Tabela 3.4 resume as características do ensaio de impacto.

Tabela 3.4 - Parâmetros adotados no ensaio de impacto

Célula de carga	30 kgf
Temperaturas	22 °C (lotes 1→24) -20°C (lote 25)

3.7.**Medição de Microdureza**

A medição de microdureza foi realizada após a caracterização microestrutural do material, adotando-se as mesmas amostras da microscopia ótica. Foi utilizado um microdurômetro HMV-2000 da marca SHIMADZU com uma pré-carga de 100 g durante um intervalo de 30 segundos e um marcador com ponta de diamante. Cada amostra foi medida em 5 pontos distintos.

3.8.**Caracterização Microestrutural**

A caracterização microestrutural do aço SAE 4140 após os diferentes tratamentos térmicos foi realizada nos próprios corpos de prova Charpy utilizando metalografia ótica. Os corpos de prova foram cortados no sentido longitudinal com auxílio de um cortador MESOTON da marca PANAMBRA. Em seguida, os corpos de prova sofreram operações de lixamento e polimento.

As operações de lixamento foram realizadas em uma politriz modelo DP-10 da marca PANAMBRA com fluxo de água contínuo seguindo uma seqüência definida de lixas (220, 320, 400, 600 e 1200) da maior granulometria para a menor granulometria. Tendo o cuidado de lavar continuamente a amostra e secá-la com secador ao passar de uma lixa para outra e sempre mudar a direção de lixamento (90°) com o objetivo de eliminar os riscos deixados por lixamento anterior.

Após as operações de lixamento, seguiu-se polimento com panos de 6, 3 e 1 micron em uma politriz modelo DP-10 da marca PANAMBRA sem fluxo de água contínuo e utilizando pasta de diamante para eliminar por completo os riscos deixados pelo

lixamento. Tendo o cuidado de manter as amostras em movimento constante sobre o pano para evitar o seu abaulamento e manter o pano umedecido com álcool para prevenir acúmulo de sujeira na superfície da amostra.

Durante as operações de lixamento e polimento foi utilizado o microscópio ótico AXIOSKOP da marca ZEISS para a observação e controle da superfície da amostra. O ataque químico foi realizado com nital a 2% de modo a revelar a microestrutura do material.

A caracterização microestrutural foi realizada em microscópio ótico AXIOSKOP da marca ZEISS.

3.9. Caracterização Fractográfica

A superfície de fratura dos corpos de prova de impacto foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com auxílio de Microscópio Digital DSM 960 da marca ZEISS com potência de 20 kv.

Com a finalidade de preservar as condições da superfície fraturada, os corpos de prova foram lavados com água destilada e acetona e secos imediatamente após o ensaio, sendo as superfícies da fratura protegidas com esmalte e os corpos de prova guardados em dessecador.