

3

MATERIAL E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 - Material

O material utilizado para este estudo foi um ferro fundido nodular ferrítico, classificado segundo a norma ASTM A 536 [22] como do tipo 60.40.18, isto é, um ferro fundido nodular ferrítico com valores mínimos de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento de 420 MPa, 280 MPa e 18%, respectivamente. A composição química característica do material acha-se apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química do ferro fundido nodular ferrítico adotado [23].

Elemento	% em peso
Carbono	3,72
Silício	2,75
Manganês	0,12
Magnésio	0,038
Enxofre	0,001
Ferro	Restante

O material foi fornecido pela Fundição FUNPETRO, de Petrópolis - RJ, na forma de amostras fundidas padronizadas na geometria “Y – block”, de acordo com a norma anteriormente mencionada [22]. As Figuras 3.1 e 3.2, apresentam a amostra “Y-block”.

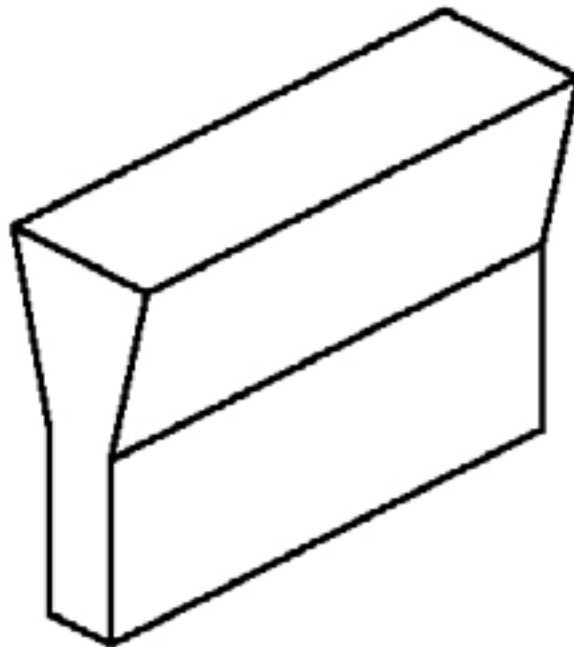


Figura 3.1 – Geometria do tipo “Y – block” para amostras fundidas .

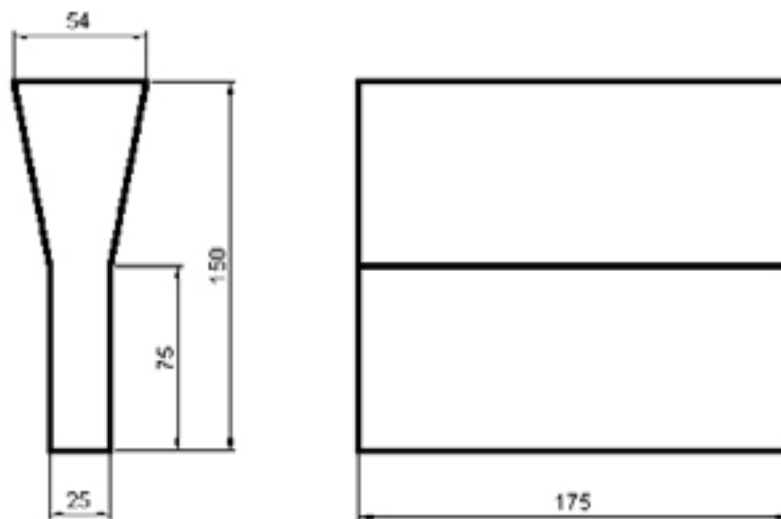


Figura 3.2 – Dimensões das amostras “Y-block” adotadas.

3.2 – Preparação das amostras fundidas

As amostras “Y – block” foram fundidas em moldes de areia fabricados pelo processo de moldação em silicato de sódio e catalizados com dióxido de carbono. Metade das amostras foram fundidas adotando-se resfriadores de dimensões padronizadas, em forma de chapas fundidas. Estas chapas foram posicionadas nos moldes de areia em regiões previamente estabelecidas, conforme ilustrado nas Figuras 3.3 e 3.4. O objetivo do uso dos resfriadores nos moldes foi promover um resfriamento diferenciado no molde e, conseqüentemente, provocar modificações microestruturais locais na amostra fundida.

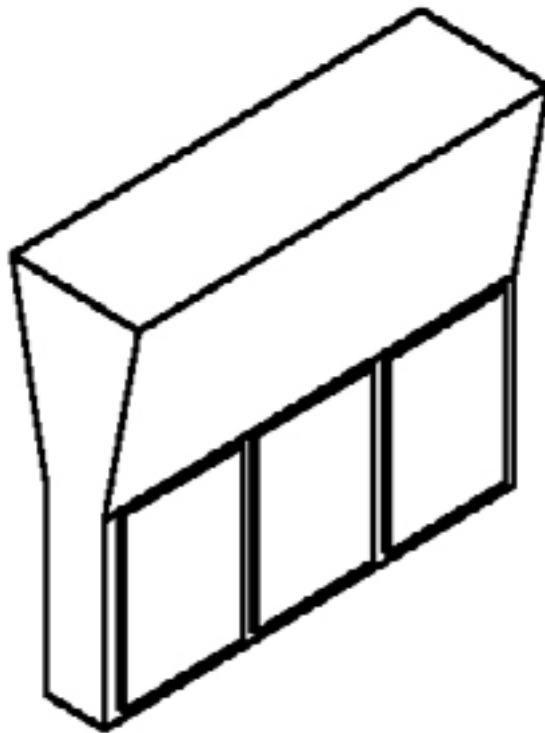


Figura 3.3 – Posicionamento dos resfriadores nas amostras fundidas.

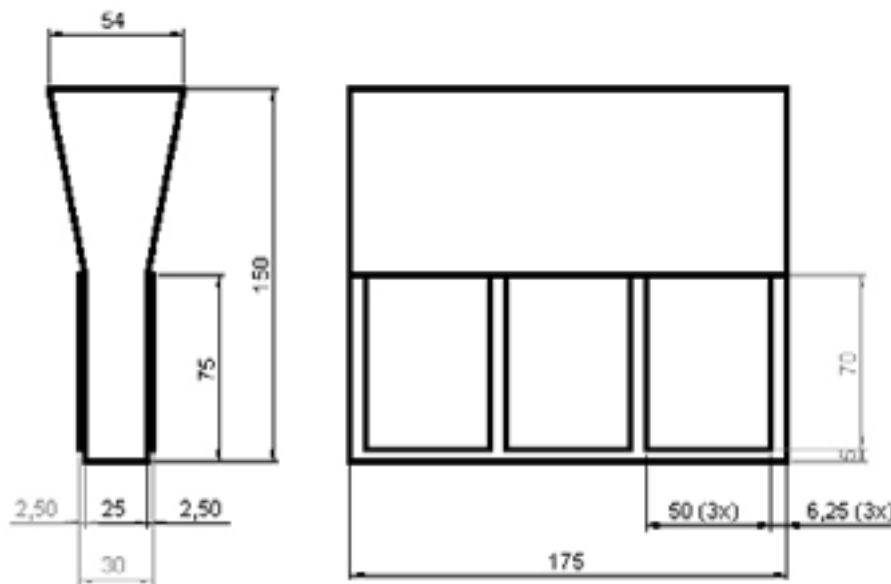


Figura 3.4 – Dimensões dos resfriadores nas amostras fundidas.

Após a etapa de moldação, a areia do molde e os resfriadores foram pintados com tinta à base de grafita e zirconita dissolvidos em uma solução alcóolica e queimados com maçarico. A pintura do molde e resfriadores teve como objetivo evitar a formação de gases provenientes da areia durante o processo de fundição, bem como o caldeamento da chapa resfriadora com o metal líquido.

A carga metálica foi produzida em forno de indução com capacidade de 600kg, usando 30% de sucata de um aço SAE 1010 de composição conhecida [24], 40% de gusa também com composição química conhecida [25] e 30% de sucata (canais e refugos) de ferro fundido nodular ferrítico da própria Fundição FUNPETRO.

A carga foi fundida à temperatura de 1380°C em panela aberta e pintada internamente com tinta refratária à base de grafita para evitar a contaminação (aumento do carbono). Antes do seu vazamento, a carga líquida foi inoculada com uma liga de ferro-silício-magnésio, além de cálcio e residual de terras raras, com a finalidade de melhorar o processo de nodulização do ferro fundido, conforme

apresentado anteriormente (vide item 2.3). O vazamento nos moldes foi realizado em um tempo de seis minutos.

3.3

Tratamentos térmicos

Após a desmoldagem das amostras fundidas, suas partes retas foram cortadas à altura de 75 mm e separadas em amostras fundidas com ou sem resfriadores. Posteriormente, providenciou-se o tratamento térmico do material.

3.3.1

Normalização

Neste processo as amostra foram colocadas em um forno estacionário de resistência elétrica do laboratório de Metalografia e Tratamento Térmico da Universidade Católica de Petrópolis (UCP), aquecidas à temperatura de 780°C e mantidas nesta temperatura durante 5 horas, seguindo-se um resfriamento livre ao ar.

3.3.2

Recozimento

Neste processo as amostra foram colocadas em um forno estacionário de resistência elétrica do laboratório de Metalografia e Tratamento Térmico da UCP, aquecidas à temperatura de 900°C e mantidas em tal temperatura durante 3 horas. Em seguida, o forno foi desligado e as amostras sofreram um resfriamento em seu interior até a temperatura de 650°C, em uma escala de 100⁰C/h, quando o forno foi novamente ligado e mantido a tal temperatura durante um um periodo de uma hora. Após este intervalo de tempo, o forno foi desligado definitivamente e as amostras resfriaram até a temperatura ambiente em seu interior numa escala de 50⁰C/h.

3.4

Nomenclatura das amostras fundidas

A Tabela 3.2 apresenta a nomenclatura adotada neste estudo para as amostras fundidas, em função das condições de resfriamento e dos tratamentos térmicos.

Tabela 3.2 – Nomenclatura das amostras

Condição	Nomenclatura da Amostra
Sem resfriador bruta de fundição	SRB
Sem resfriador normalizada	SRN
Sem resfriador recozida	SRR
Com resfriador bruta de fundição	CRB
Com resfriador normalizada	CRN
Com resfriador recozida	CRR

3.5

Posição de retirada e geometria dos corpos de prova

Os corpos de prova de tração e fadiga rotativa foram retirados das partes retas das amostras “Y-blocks”, conforme apresentado na Figura 3.3, após os tratamentos térmicos de normalização e recozimento. A geometria dos corpos de prova para os ensaios foi determinado de acordo com as normas recomendadas para cada teste.

3.5.1 – Corpo de prova para ensaio de tração.

Para o ensaio de tração foram utilizados corpos de prova cilíndricos com cabeça lisa de acordo com a norma ASTM 370 [26], como é apresentado nas Figuras 3.5 e 3.6.

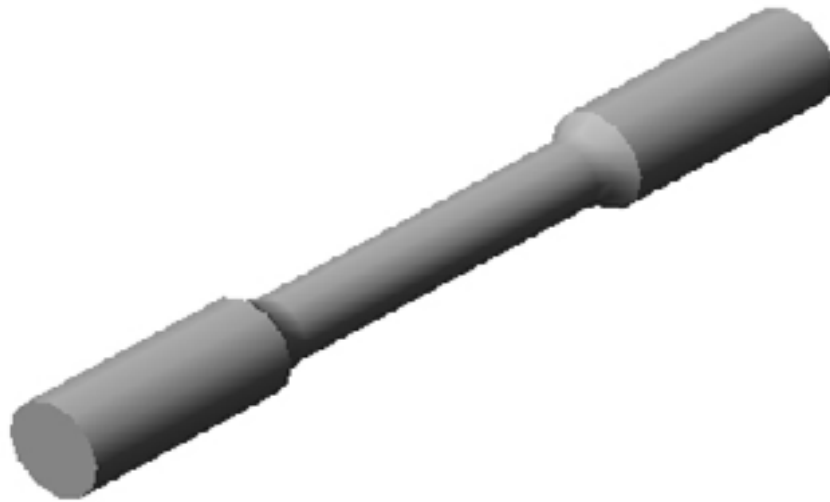


Figura 3.5 – Corpo de prova de cabeça lisa para ensaio de tração.

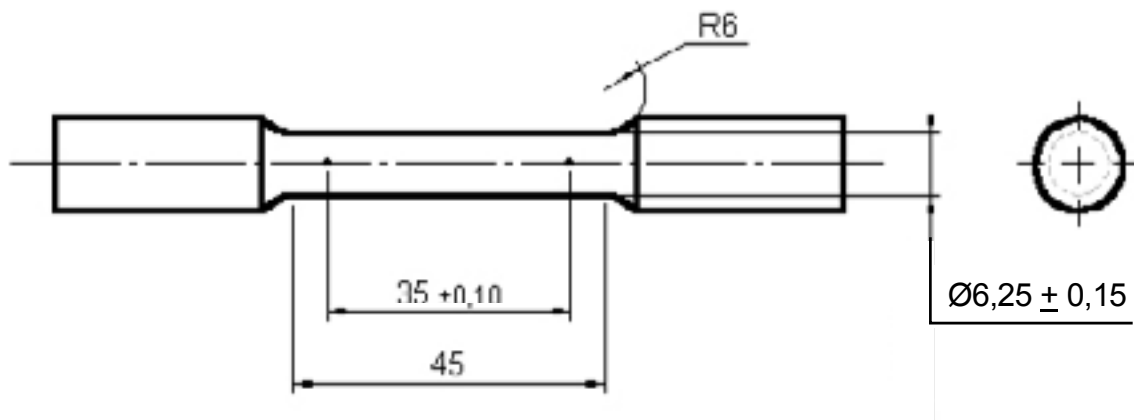


Figura 3.6 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração.

3.5.2 – Corpo de prova para ensaio de fadiga rotativa

Para o ensaio de fadiga rotativa foram utilizados corpos de prova cilíndricos com cabeça lisa de acordo com a norma ASTM E-466 [27], como apresentado nas Figuras 3.7 e 3.8.

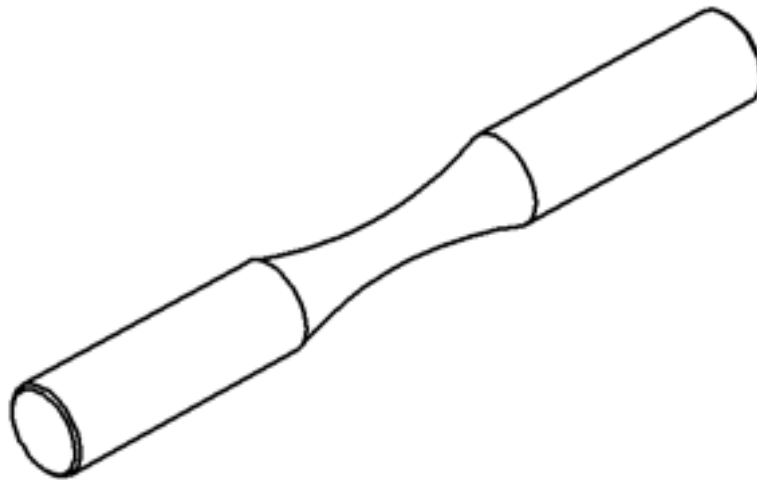


Figura 3.7 – Corpo de prova para ensaios de fadiga rotativa.

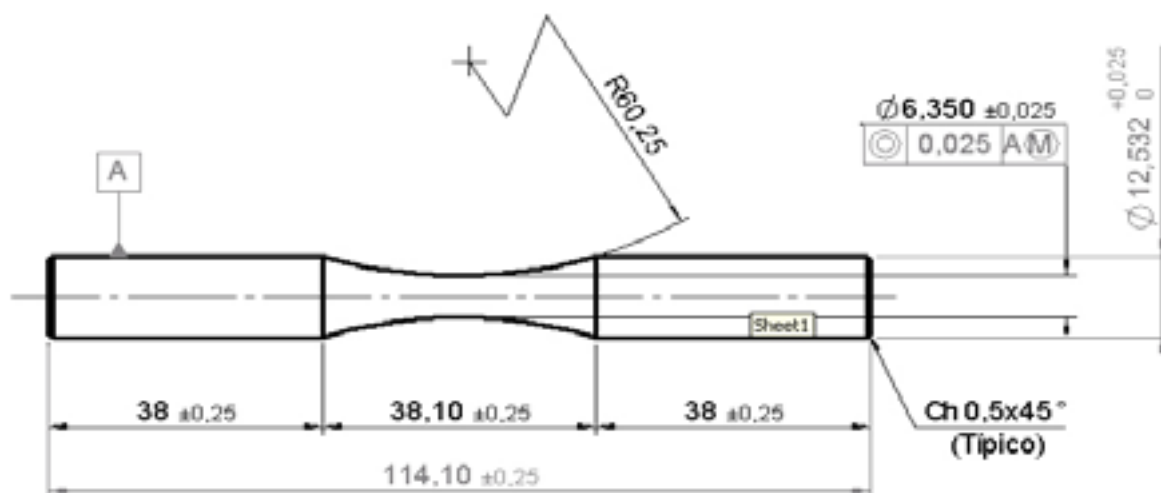


Figura 3.8 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de fadiga rotativa.

3.6

Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados na PUC – Rio, utilizando-se uma máquina de ensaio universal do tipo INSTRON com uma célula de carga de 100 kN, e conduzidos de acordo com a norma A-370 [26]. Os ensaios permitiram a determinação do limite de escoamento, limite de resistência à tração, deformação e ductilidade na fratura do material.

3.7

Ensaio de fadiga

Amostras do material nas condições SRB, SRR, CRB e CRR foram submetidas a ensaio de fadiga rotativa com o objetivo de se determinar a influência das diferentes microestruturas sobre sua vida útil em fadiga do material. Não foram ensaiadas as condições SRN e CRN, pois apresentaram parâmetros de propriedades mecânicas muito similares com às condições SRB e CRB (vide Tabela 4.1), além disso, para levantamento preciso da curva tensão – vida em fadiga, faz-se necessário uma grande quantidade de corpo de prova, o que não existia para as condições SRN e CRN. Para tal ensaio, adotou-se uma máquina de fadiga por flexão rotativa do tipo RM-506 pertencente à Universidade Católica de Petrópolis.

Neste tipo de máquina, o corpo de prova é fixado entre pinças e aplica-se uma pré-carga constante em seu comprimento útil (vão central), o que resulta no aparecimento de um momento fletor no corpo de prova. Durante cada semi-rotação do corpo de prova, o momento fletor é aplicado nas fibras externas da amostra que, ao completar uma rotação inteira foi submetida a um ciclo completo de tração e compressão. A Figura 3.9 apresenta os diagramas de esforços atuantes nos corpos de prova durante o ensaio de fadiga por flexão rotativa.

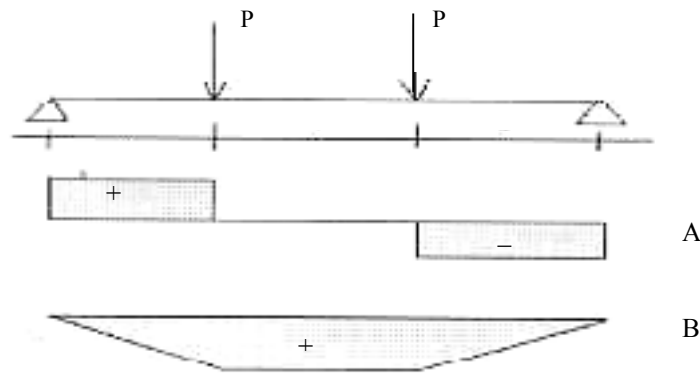


Figura 3.9 – Diagrama de esforços cisalhantes e fletores durante ensaio de fadiga.

Durante o ensaio, o corpo de prova sofre rotação fixado pelos seus extremos (cabeças) e carregado por forças equivalentes, de modo simétrico resultando em flexão da parte central. O mecanismo de carregamento dos corpos de prova acha-se baseado na rotação de dois rolamentos internos da máquina, chamados de rolamentos alto compensadores, que se movem em conjunto com a flexão do corpo de prova. Estes rolamentos estão conectados a um dispositivo formado de barra de tração e pesos de carga, conforme apresentado no esquema da Figura 3.10. A força “*P*” aplicada em cada ensaio oscilou entre 1,1 a 2 kg, provocando um momento fletor no corpo de prova.

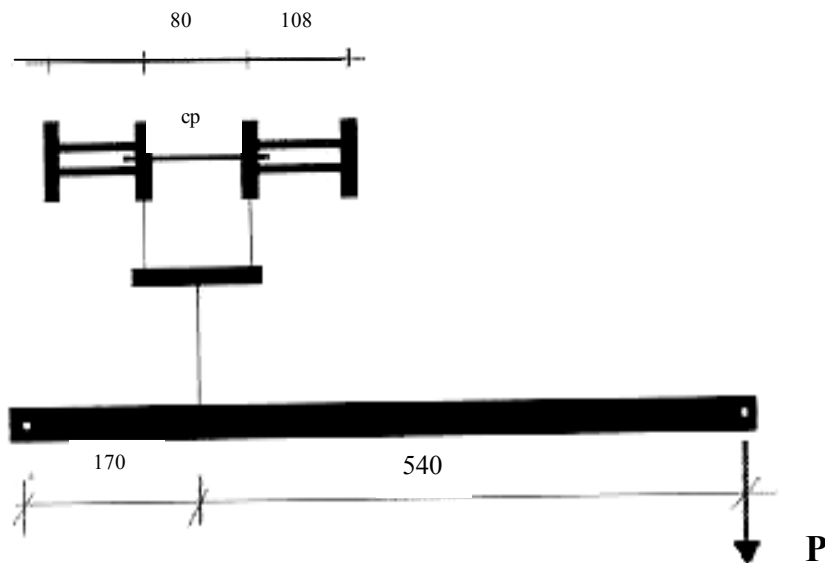


Figura 3.10 – Esquema da máquina de fadiga do sistema Sonderricker-Farmer.

A Tabela 3.3 apresenta a relação entre carga aplicada no corpo de prova e tensão de flexão resultante.

Tabela 3.3 – Relação entre carga e tensão de flexão atuantes no corpo de prova.

Carga Variável (kg)	Tensão de Flexão (MPa)
1,1	100
1,2	110
1,3	120
1,4	125
1,5	135
1,6	145
1,8	160
2,0	180

Na Tabela 3.3, a tensão de flexão foi calculadas pela fórmula :

$$\sigma = (22.971 * P) / d^3 \quad (9)$$

onde σ = tensão de flexão (MPa)

P = peso da carga variável (kg)

d = diâmetro do corpo de prova (mm)

Um mínimo de dois corpos de prova foi adotado para cada tensão de ensaio e ciclados até a fratura.

3.8

Caracterização microestrutural

As amostras para a análises metalográficas analisada e que também foram submetidas a aplicação do programa KS-400, foram retiradas do corpo de prova “Y-block”, nas mesmas regiões das quais foram retiradas os corpos de prova para ensaio de tração e para ensaio de fadiga por flexão rotativa. Foram preparadas cinco amostras de cada condição microestrutural.

Para esta análise, a preparação da superfície foi realizada pela técnica de lixamento por via úmida nos laboratório da UCP, onde as amostras foram desbastadas até a lixa 400 e levadas ao Laboratório de Metalografia da PUC- Rio, onde realizou-se um lixamento mais fino, com lixas 600 e 1000 e posterior polimento à base de pasta de diamante. Após o polimento, as amostras destinadas à caracterização microestrutural da matriz foram atacadas uma solução de Nital 2%, enquanto outras amostras, para caracterização da grafita, não sofreram ataque químico. Todas as amostras foram analisadas em microscópio ótico Axivert 25 Zeiss interfaciado com câmara de vídeo JVC – TK 1270.

Com o objetivo de determinar a presença de regiões de cementita livre dentro da perlita, isto é, cementita não combinada com ferrita, as amostras nas condições microestruturais SRB, SRR, CRB e CRR foram repolidas e submetidas a um outro ataque químico com solução de meta-bissulfato de potássio 10%. Depois do ataque, as amostras foram novamente analisadas em microscopia ótica.

Algumas amostras foram submetidas a uma análise digital de imagem com finalidade de caracterizar a fração volumétrica dos seus constituintes, adotando-se para tal o programa KS-400[28]. As amostras sofreram ataque químico com solução de Nital 2% e procedeu-se a análise quantitativa da grafita, perlita e ferrita. Além disto, as mesmas amostras também foram submetidas a um processo automático de classificação da morfologia da grafita segundo as seis classes definidas pela norma ISO-945 [29], que classifica a grafita de veios a nódulos perfeitos, conforme mostrado na Figura 3.11. Para a aplicação do programa KS-400, foram escolhidos aleatoriamente três campos em cada amostra metalográfica. Estes campos foram alinhados usando como marca de referência microdureza Vickers. Foram impressos em cada um dos três campo três pontos de microdureza de forma que os mesmos formassem a figura geométrica de um triângulo. A finalidade desta marcação é de

se poder fazer o alinhamento de cada campo das imagens anteriores e posteriores ao ataque químico para uma perfeita digitalização.

Para a determinação do tamanho de grão médio do constituinte ferrita, adotou-se uma contagem manual, em que cada grão foi identificado e medido de maneira individual. Neste processo, mediu-se, de maneira aleatória, somente grãos de ferrita que envolvessem nódulos de grafita.

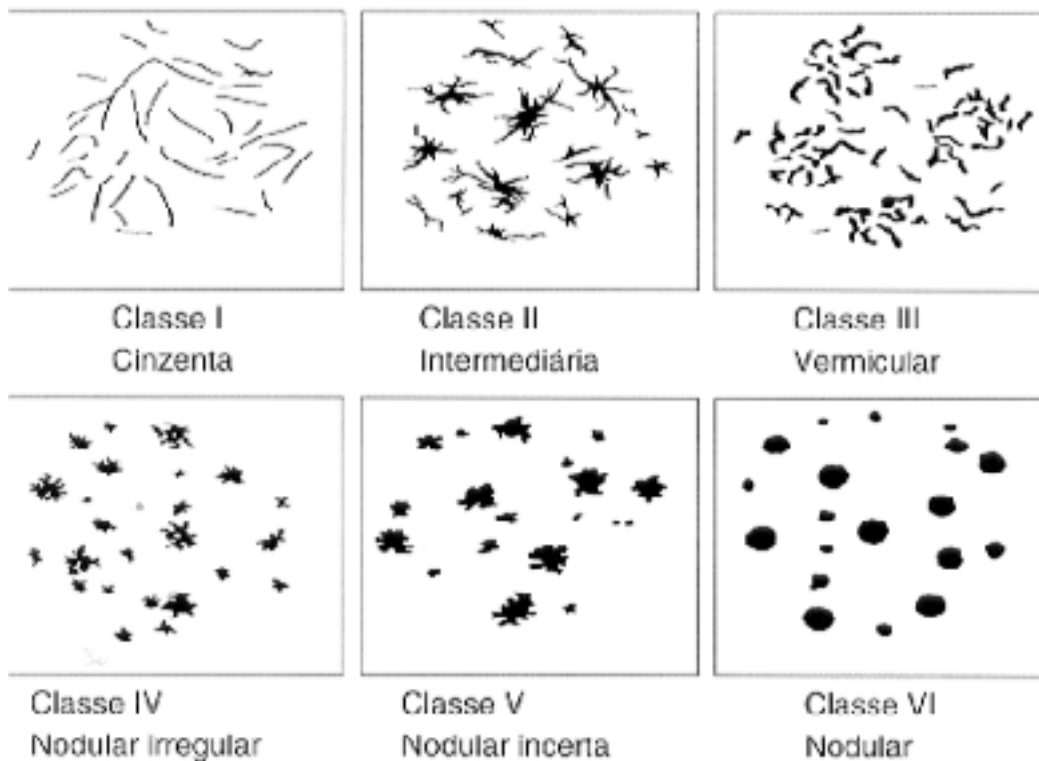


Figura 3.11 – Classificação da morfologia da grafita segundo a norma ISO 945 [29].

3.9

Dureza

Amostras de um centímetro quadrado foram retiradas das amostras “Y-block” nas mesmas posições das quais retiraram-se os corpos de prova de tração e fadiga e submetidas a ensaios de dureza.

3.9.1 – Dureza Rockwell

Medições de dureza Rockwell do tipo “B” foram realizadas nas seis condições microestruturais constantes deste estudo, medindo-se 5 pontos em cada amostra. Foi utilizado o durômetro da UCP, marca Heckert, com esfera de aço rápido de diâmetro 1/16”. Foi usado uma carga de 100 kgf.

3.9.2 – Microdureza Vickers

Medições de microdureza Vickers foram realizadas em amostras nas condições SRB, SRR, SRN, CRB, CRN e CRR, após a caracterização microestrutural das mesmas. As medições foram realizadas, no Laboratório de Metalografia da PUC-Rio. Foi utilizado durômetro Shimadzu, modelo HMV – 2000 e aplicou-se uma carga de 500 gramas-força.

3.10

Análise das superfícies de fratura

As análises fractográficas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas nos corpos de provas rompidos no ensaio de fadiga, com a finalidade de determinar a influência da microestrutura sobre o micromecanismo de fratura do material.

Após os ensaios de fadiga, os corpos de prova tiveram suas superfícies de fratura protegidas por verniz incolor, objetivando manter tal superfície isenta de oxidação, o que pode prejudicar a formação da imagem no MEV. Optou-se apenas por analisar as superfícies de fratura de corpos de prova fraturado nas condições mais e menos severas de ensaio, ou seja, com cargas máximas e mínimas, respectivamente.