

4

RESULTADOS

4.1

Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas básicas do ferro fundido nodular ferrítico, nas seis diferentes condições microestruturais estudadas neste trabalho, acham-se apresentadas na Tabela 4.1. Esta tabela reporta os valores do limite de escoamento (σ_y), limite de resistência mecânica (σ_r), deformação na carga máxima (ϵ_r) e ductilidade na fratura (ϵ_f), obtidos pela média de cinco corpos de prova e seus respectivos desvios padrão.

Tabela 4.1 – Características mecânicas do ferro fundido nodular ferrítico.

Condições	σ_y (MPa)	σ_r (MPa)	ϵ_r (%)	ϵ_f (%)
SRB	318 \pm 3	479 \pm 6	20,1 \pm 2	20,0 \pm 2
SRN	315 \pm 6	475 \pm 7	17,2 \pm 6	19,3 \pm 1
SRR	280 \pm 4	437 \pm 6	16,1 \pm 1	21,8 \pm 1
CRB	294 \pm 8	445 \pm 9	25,9 \pm 2	21,8 \pm 1
CRN	291 \pm 1	437 \pm 1	24,5 \pm 4	21,9 \pm 1
CRR	279 \pm 2	433 \pm 3	22,7 \pm 2	21,8 \pm 2

Onde

- ϵ_f foi calculado como $I_n (A_0 / A_f)$

4.2

Vida útil em fadiga

Os resultados do ensaio de fadiga rotativa do ferro fundido nodular ferrítico nas condições SRB, SRR, CRB e CRR são apresentados pelas Tabelas 4.2 a 4.5.

Nestas tabelas, σ representa a tensão de fadiga, N_c significa o número de ciclos para falha de cada corpo de prova ensaiado na referente tensão, enquanto N significa o número médio de ciclos para a falha.

TABELA 4.2 – Parâmetros do ensaio de fadiga na condição SRB

σ (MPa)	Log σ	N_c (ciclos)	N (ciclos)	log N
180	2,26	32000 / 35000 / 36000	34333	4,54
160	2,21	86000 / 92000	89000	4,95
145	2,16	280000 / 326000	303000	5,48
135	2,13	780000 / 810000	795000	5,90
125	2,10	4000000/ 4000000 *	4000000	6,60

* O ensaio de ambos os corpos de prova foi interrompido no número de ciclos indicado, sem que estes corpos apresentassem fratura.

TABELA 4.3 – Parâmetros do ensaio de fadiga na condição SRR

σ (MPa)	Log σ	N_c (ciclos)	N (ciclos)	log N
180	2,26	19500/22000/21000	20833	4,32
160	2,21	85000/93000	89000	4,95
145	2,16	189000	189000	5,28
135	2,13	322000/321000	321500	5,51
125	2,10	480000	480000	5,68
120	2,07	720000/780000	750000	5,88
110	2,03	1183000/1300000	1241500	6,09
100	2,00	4000000/4000000	4000000	6,60

*O ensaio de ambos os corpos de prova foi interrompido no número de ciclos indicado, sem que estes corpos apresentassem fratura.

TABELA 4.4 – Parâmetros do ensaio de fadiga na condição CRB

σ (MPa)	Log σ	N_c ciclos	N (ciclos)	log N
180	2,26	48000/ 45000/ 46000	46333	4,67
160	2,21	395000/380000	387000	5,59
145	2,16	737000/ 780000	758500	5,88
135	2,13	4000000/4000000 *	4000000	6,60

*O ensaio de ambos os corpos de prova foi interrompido no número de ciclos indicado, sem que estes corpos apresentassem fratura.

TABELA 4.5 – Parâmetros do ensaio de fadiga na condição CRR

σ (MPa)	Log σ	N_c (ciclos)	N (ciclos)	log N
180	2,26	20000/23000/23000	22000	4,34
160	2,21	83000/87000	85000	4,93
145	2,16	193000/197000	195000	5,29
135	2,13	369000/340000	354500	5,55
125	2,10	870000/910000	890000	5,95
120	2,07	4000000/4000000 *	4000000	6,60

*O ensaio de ambos os corpos de prova foi interrompido no número de ciclos indicado, sem que estes corpos apresentassem fratura.

Os gráficos da vida em fadiga do ferro fundido nodular ferrítico nas condições SRB, SRR, CRB e CRR acham-se apresentados da Figura 4.1 à Figura 4.4.

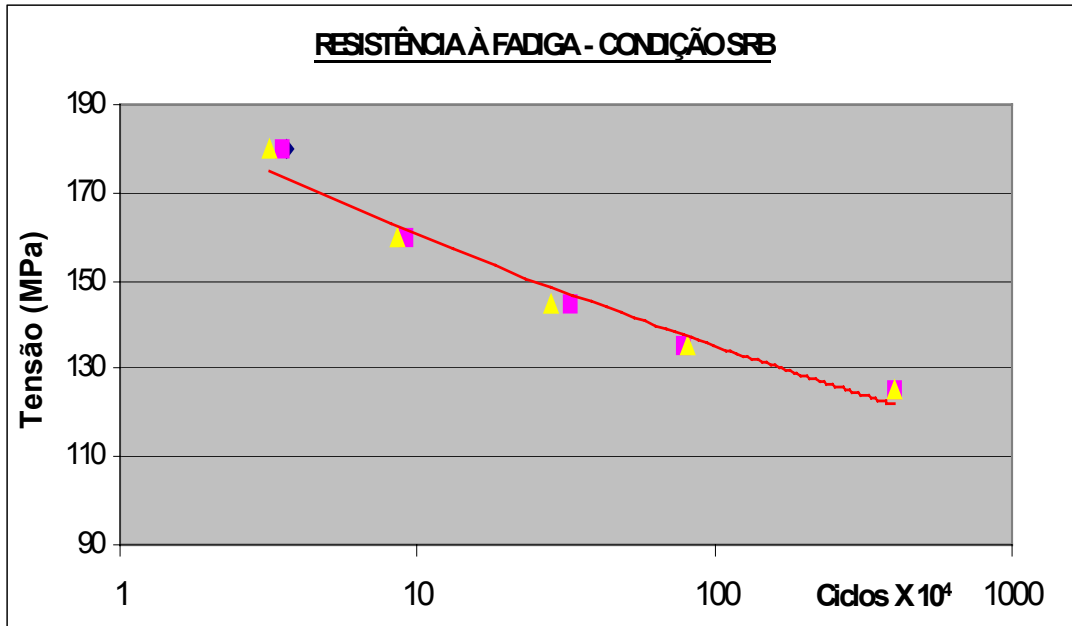


Figura 4.1 – Gráfico de resistência à fadiga do material na condição SRB

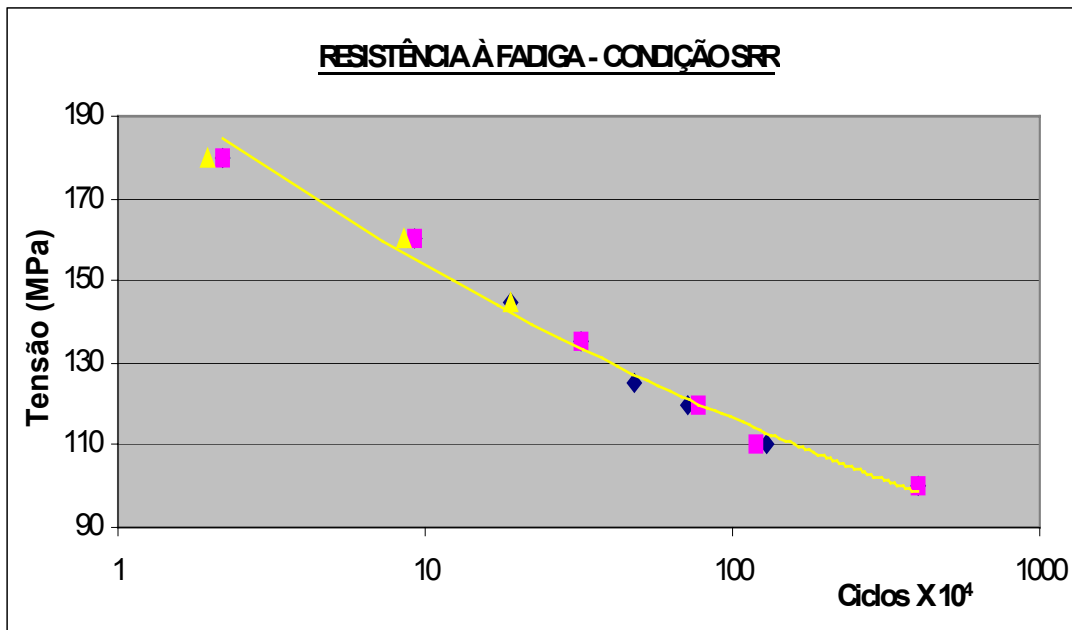


Figura - 4.2 Gráfico de resistência à fadiga do material na condição SRR

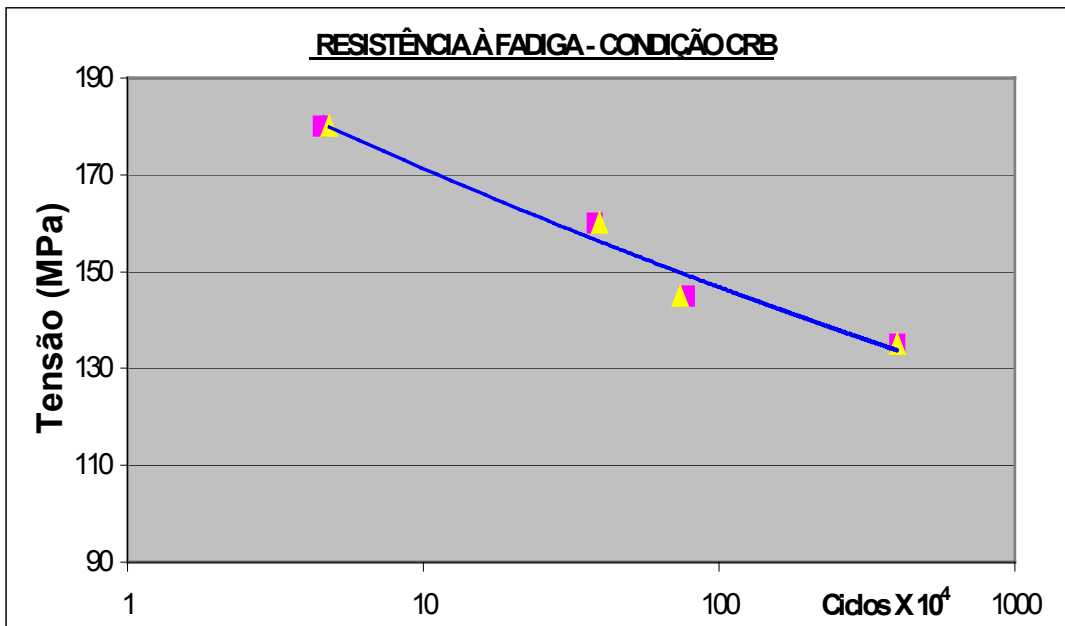


Figura 4.3 – Gráfico de resistência à fadiga do material na condição CRB.

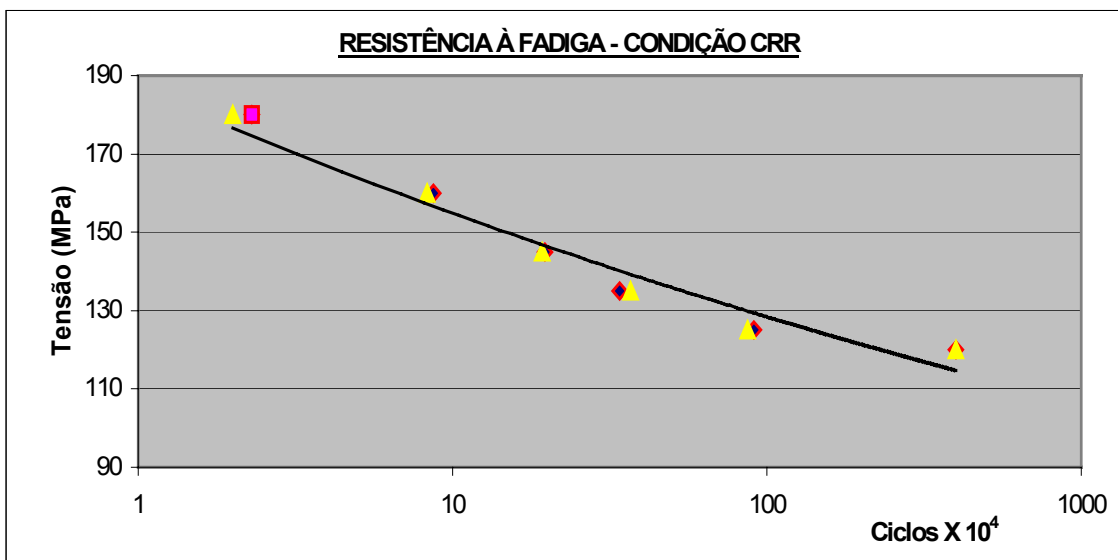


Figura 4.4 – Gráfico de resistência à fadiga do material na condição CRR.

4.3

Caracterização microestrutural do material

As Figuras 4.5 a 4.8 apresentam as análises metalográficas do ferro fundido nodular ferrítico na condição bruta de fundição.

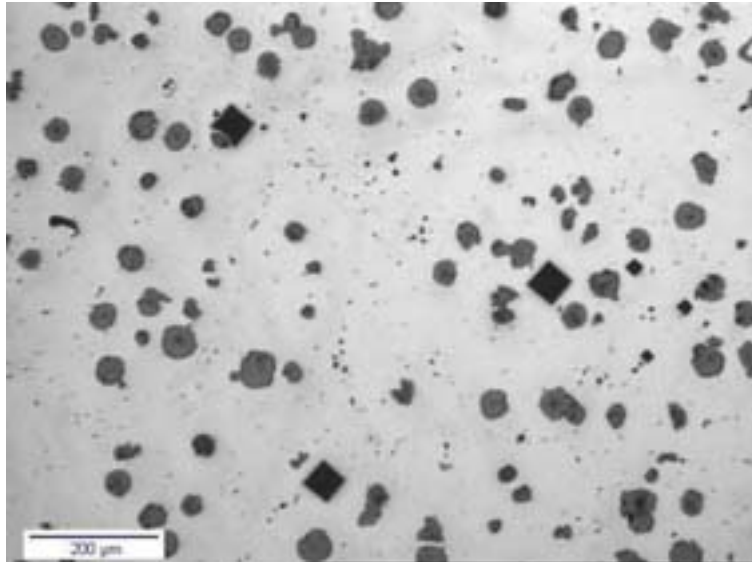


Figura 4.5 - Amostra na condição SRB sem ataque. Observa-se basicamente a presença de nódulos de grafita.

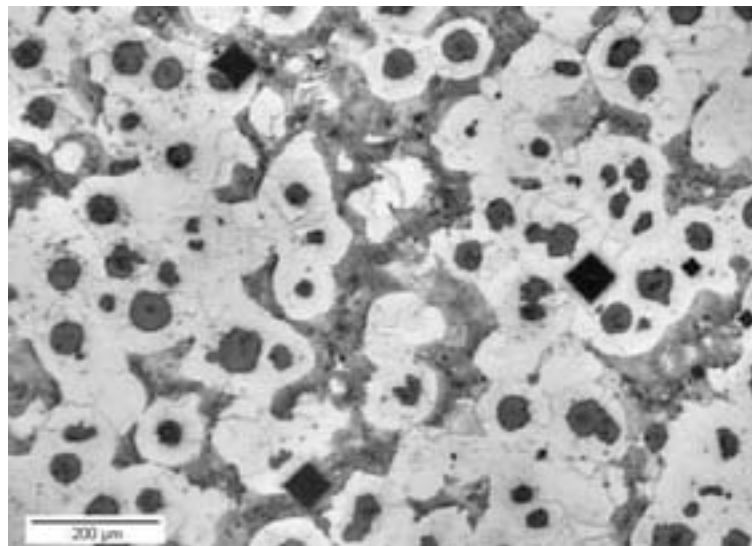


Figura 4.6 - Amostra na condição SRB com ataque. Observa-se a presença de nódulos de grafita com áreas de ferrita ao seu redor e regiões de perlita.

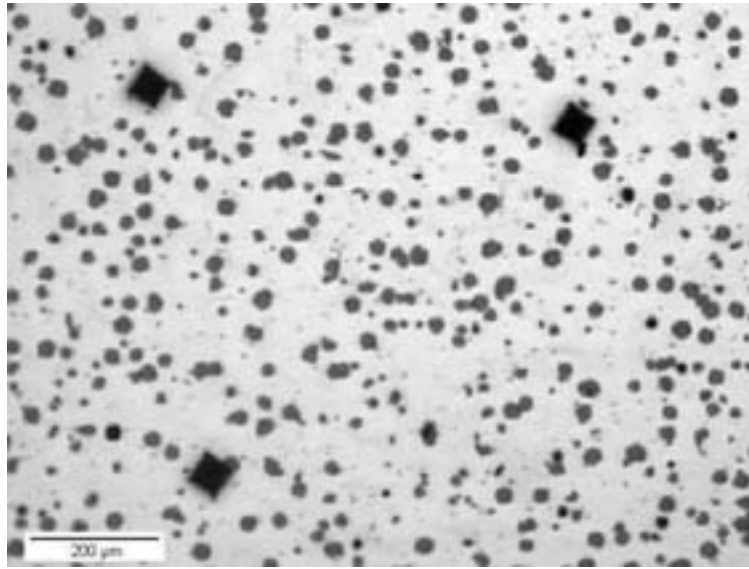


Figura 4.7 - Amostra na condição CRB sem ataque. Observa-se basicamente a presença de nódulos de grafita.

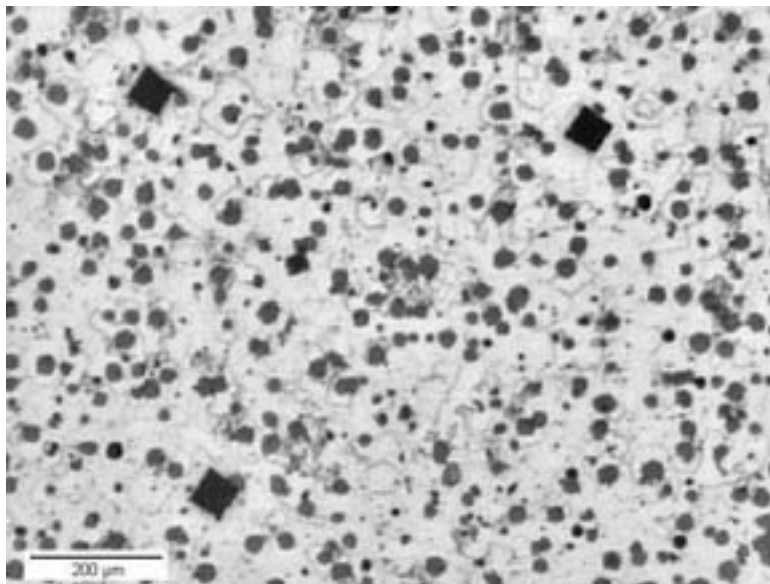


Figura 4.8 - Amostra na condição CRB com ataque. Observa-se a presença de nódulos de grafita com áreas de ferrita ao seu redor e poucas regiões de perlita no contorno de grão da ferrita.

As análises metalográficas características das diferentes condições microestruturais após os tratamentos térmicos podem ser vistas das Figuras 4.9 a 4.16.

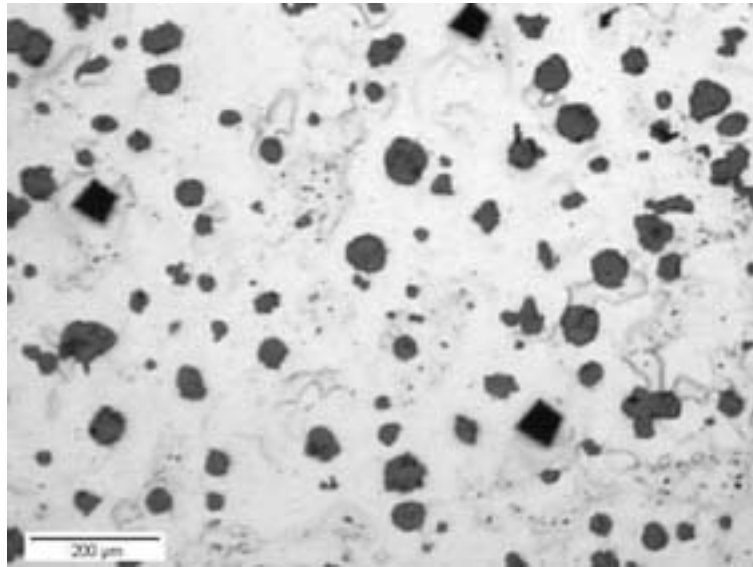


Figura 4.9 - Amostra na condição SRN sem ataque. Observa-se basicamente a presença de nódulos de grafita.

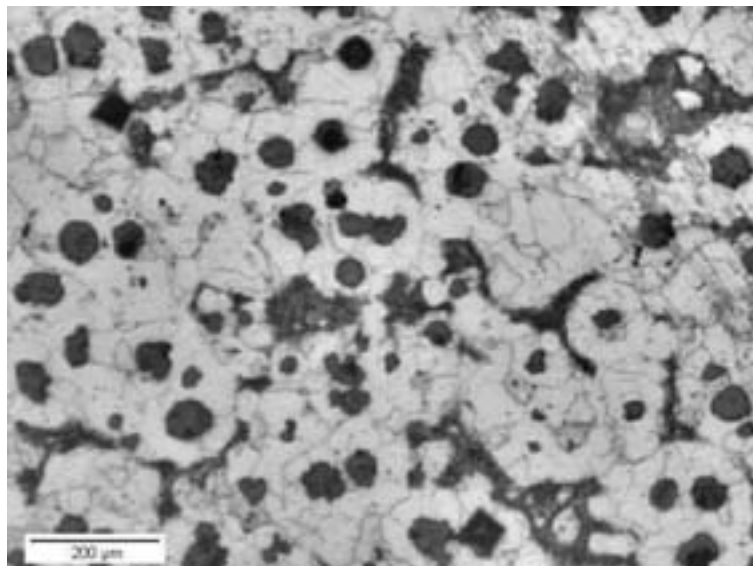


Figura 4.10 - Amostra na condição SRN com ataque. Observa-se a presença de nódulos de grafita com áreas de ferrita ao seu redor e regiões com a presença de perlita.

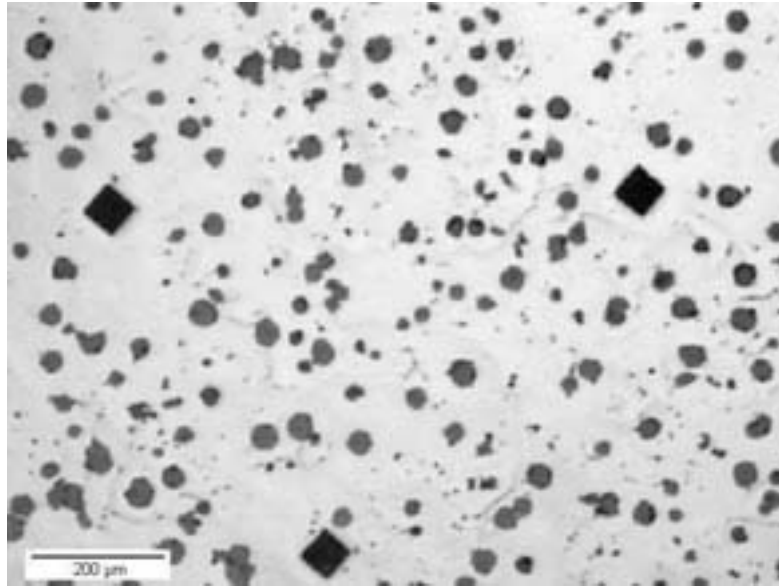


Figura 4.11- Amostra na condição CRN sem ataque. Observa-se basicamente a presença de nódulos de grafita.

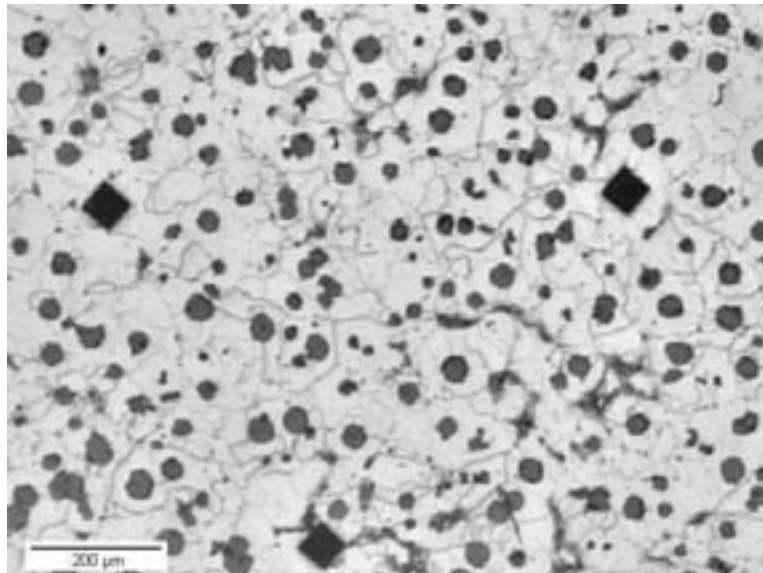


Figura 4.12 - Amostra na condição CRN com ataque. Observa-se a presença de nódulos de grafita com áreas de ferrita ao seu redor e poucas regiões de perlita no contôrno de grão da ferrita.

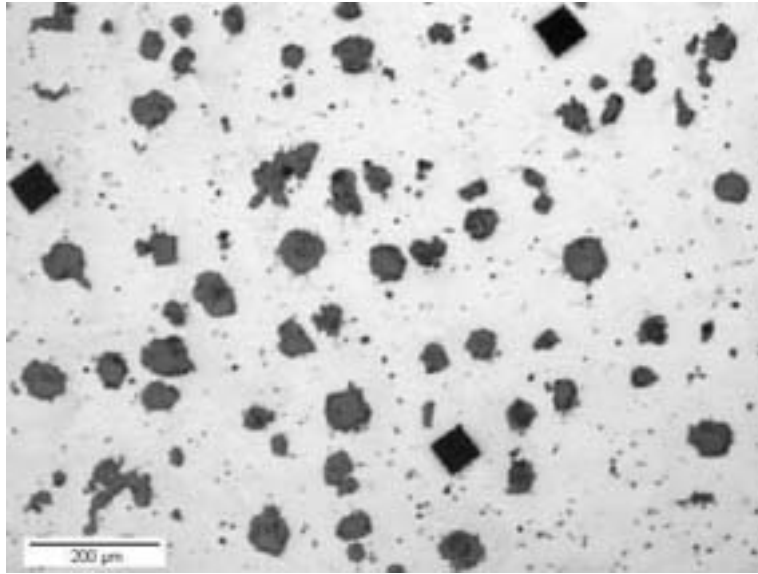


Figura 4.13 – Amostra na condição SRR sem ataque. Observa-se basicamente a presença de nódulos de grafita.

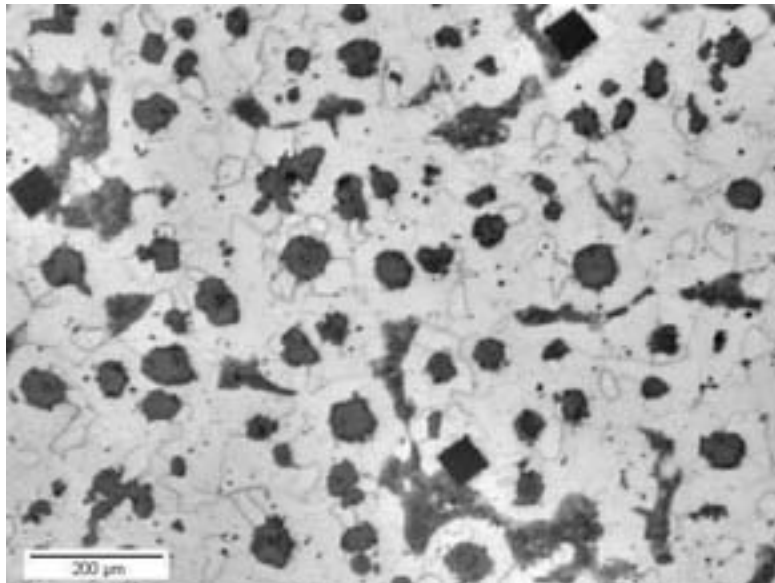


Figura 4.14 – Amostra na condição SRR com ataque. Observa-se a presença de nódulos de grafita com áreas de ferrita ao seu redor e poucas regiões de perlita.

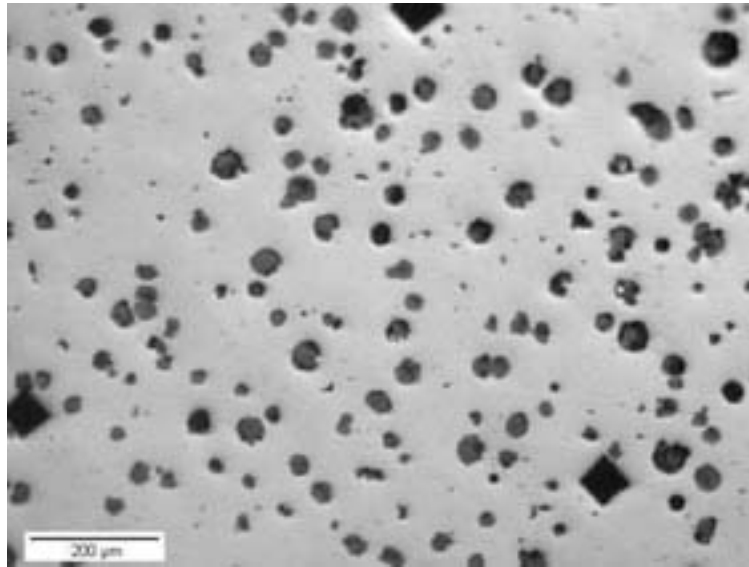


Figura 4.15 - Amostra na condição CRR sem ataque. Observa-se basicamente a presença de nódulos de grafita.

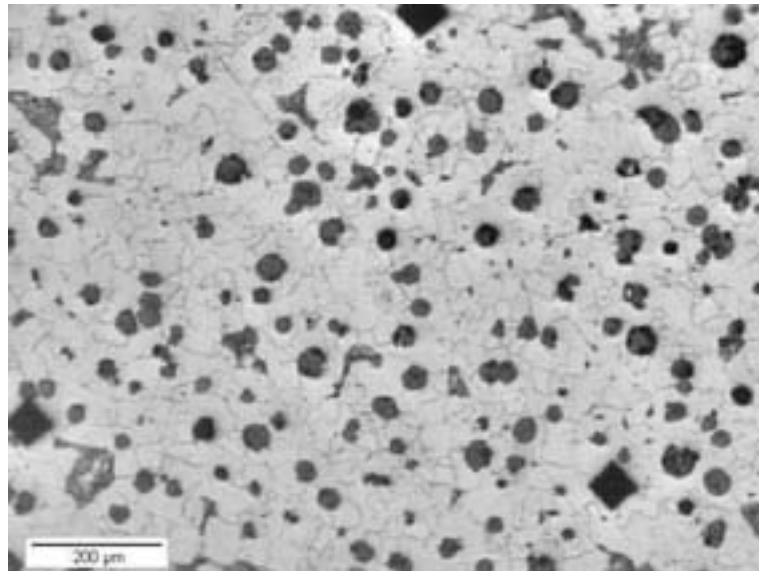


Figura 4.16 - Amostra na condição CRR com ataque. Observa-se a presença de nódulos de grafita com áreas de ferrita ao seu redor e poucas regiões de perlita.

Os resultados da análise microestrutural quantitativa do ferro fundido nodular ferrítico acham-se apresentados nas Tabelas 4.6 a 4.9.

Tabela 4.6 – Quantidade de nódulos no material

Condição	Nódulos/mm ²
SRB	71,94 ± 11,60
SRN	78,77 ± 14,79
SRR	78,66 ± 18,10
CRB	204,47 ± 126,44
CRN	222,35 ± 110,82
CRR	212,19 ± 103,16

Tabela 4.7 – Tamanho médio dos nódulos de grafita.

Condição	Nódulos de grafita (μm)
SRB	55,96 ± 11,02
SRR	63,96 ± 15,91
CRB	29,71 ± 4,39
CRR	34,21 ± 7,06

Tabela 4.8 – Fração volumétrica dos constituintes microestruturais.

Condição	Ferrita (%)	Perlita (%)	Grafita(%)
SRB	83,64 ± 3,9	5,49 ± 3,07	10,87
SRR	80,24 ± 0,06	6,81 ± 1,14	12,9
CRB	84,80 ± 0,67	3,33 ± 0,89	11,86
CRR	84,64 ± 1,19	3,42 ± 1,89	11,93

Na Tabela 4.8, as fração volumétricas da grafita e da ferrita foram medidas através do programa KS-400, enquanto que, a fração volumétrica da perlita foi calculada como sendo o restante para completar 100%.

Tabela 4.9 –Tamanho médio dos grãos de ferrita.

Condição	Grãos de ferrita (μm)
SRB	42,78 \pm 17,99
SRR	33,53 \pm 11,43
CRB	31,63 \pm 12,00
CRR	34,38 \pm 11,04

Os resultados da análise digital de imagens, obtidas pelo programa KS 400, com finalidade de classificar o tipo da grafita, comparada com à norma ISO 945, representada na Figura 3.11, do capítulo 3, são apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.10 - Classificação da grafita, segundo a norma ISO 945.

Condição	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V	ClasseVI
SRB	7,37	2,55	1,13	1,13	49,29	39,66
SRR	0,32	2,89	4,50	1,93	42,59	47,59
CRB	0,21	1,77	1,66	1,66	33,68	61,95
CRR	-	2,40	1,89	0,76	26,33	66,93

As análise metalográficas das diferentes condições microestruturais após o ataque com metabissulfito de potássio podem ser vistas da Figura 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20.

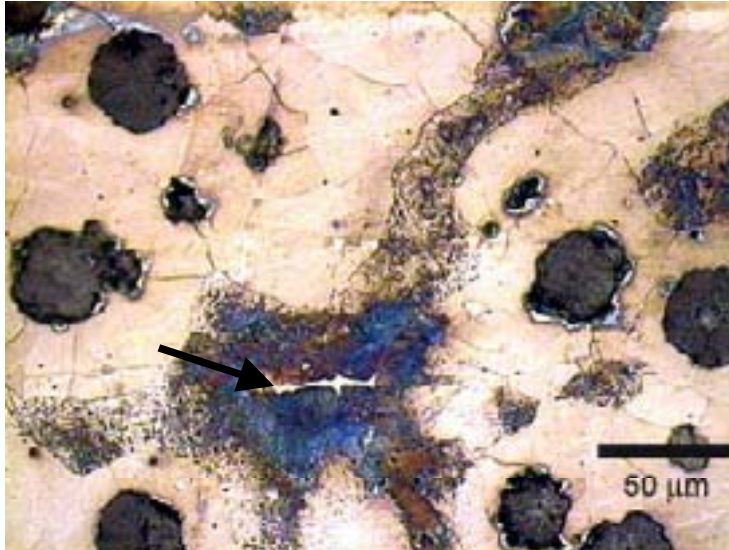


Figura 4.17 – Amostra na condição SRB. Observa-se a presença de uma fina “agulha” de cementita dentro da perlita.

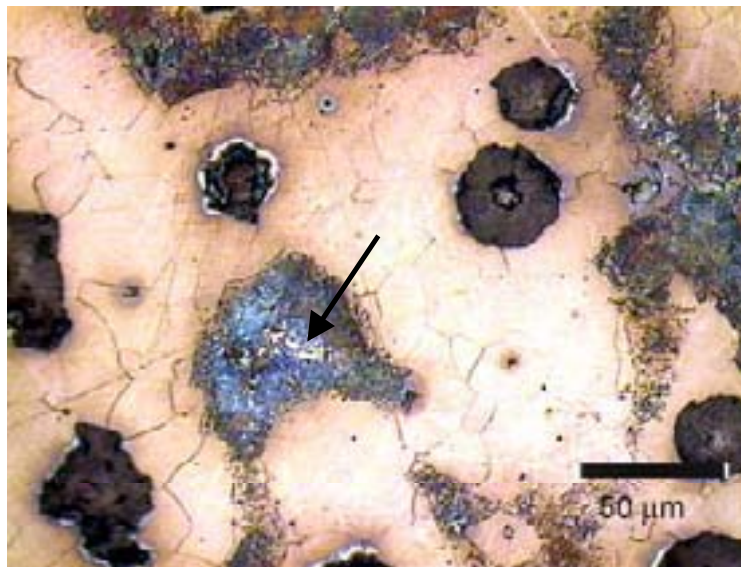


Figura 4.18 - Amostra na condição SRR. Observa-se a presença de cementita coalescida envolta por área de perlita.

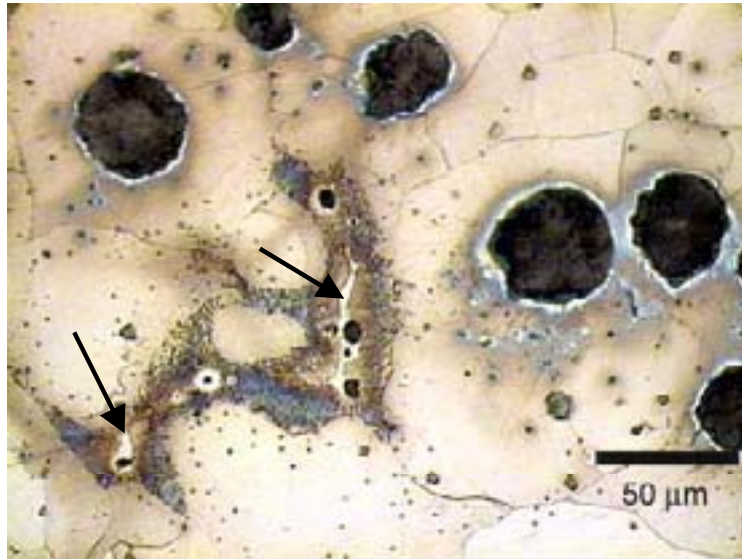


Figura 4.19 – Amostra na condição CRB. Observa-se a presença de regiões de cementita em áreas de perlita.

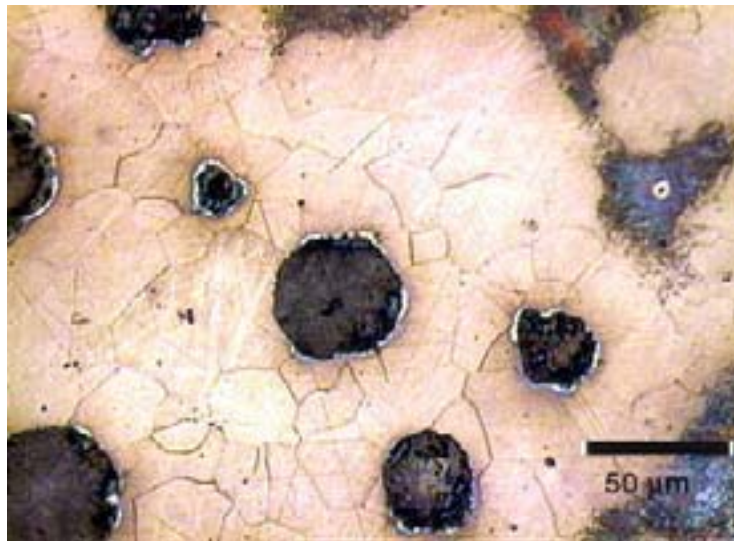


Figura 4.20 – Amostra na condição CRR. Não se observa a presença de cementita livre na perlita como nas figuras anteriores.

4.4

Dureza

Os valores médios de dureza Rockwell tipo B e microdureza Vickers encontrados nas diferentes condições microestruturais do ferro fundido nodular ferrítico constam das Tabelas 4.11 e 4.12, respectivamente.

Tabela 4.11 – Dureza do ferro fundido nodular ferrítico.

Condição	Dureza (HR _b)
SRB	42,5 ± 1,5
SRN	50,6 ± 1,5
SRR	40,6 ± 1,8
CRB	39,6 ± 1,9
CRN	46,5 ± 1,7
CRR	41,8 ± 1,5

Tabela 4.12 – Microdureza do ferro fundido nodular ferrítico

Condição	Média Dureza (Vickers)
SRB	186,6 ± 8
SRN	183,0 ± 10
SRR	177,0 ± 6
CRB	172,0 ± 5
CRN	174,0 ± 5
CRR	161,0 ± 3

4.5

Superfície de fraturas

A documentação das análises das superfícies de fratura dos corpos de prova submetidos aos ensaios de fadiga é apresentado da Figura 4.21 a 4.38.

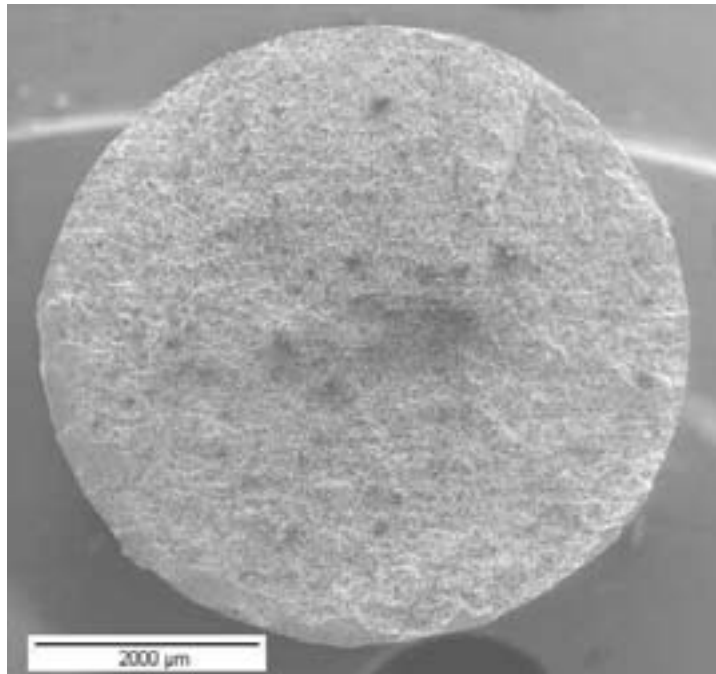


Figura 4.21 - Superfície de fratura do corpo de prova na condição SRB, ensaiado com tensão de 125 MPa.

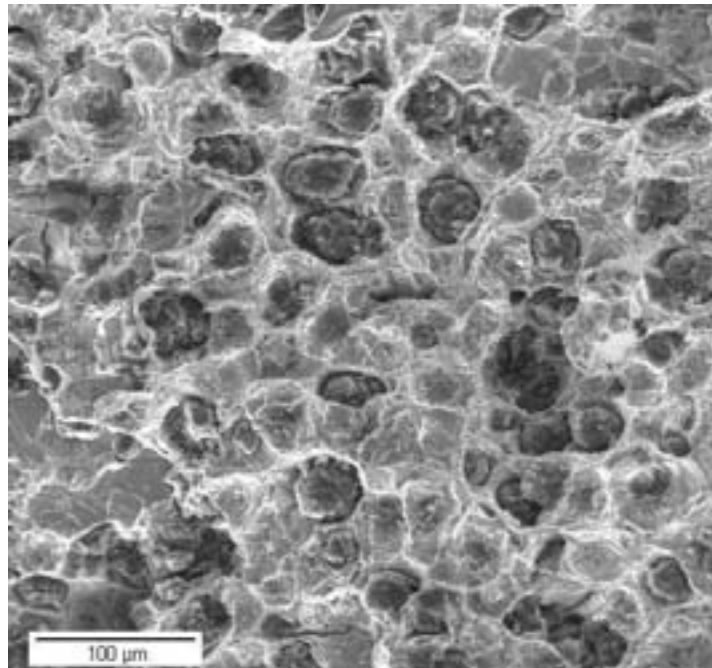


Figura 4.22 – Detalhamento fractográfico da Figura 4.21. Observa-se a presença de “dimples” com pouca deformação plástica entre os nódulos de grafita e matriz ferrítica, além de áreas entre os nódulos que apresentam facetas de clivagem de pequenas dimensões e deformação plástica localizada.

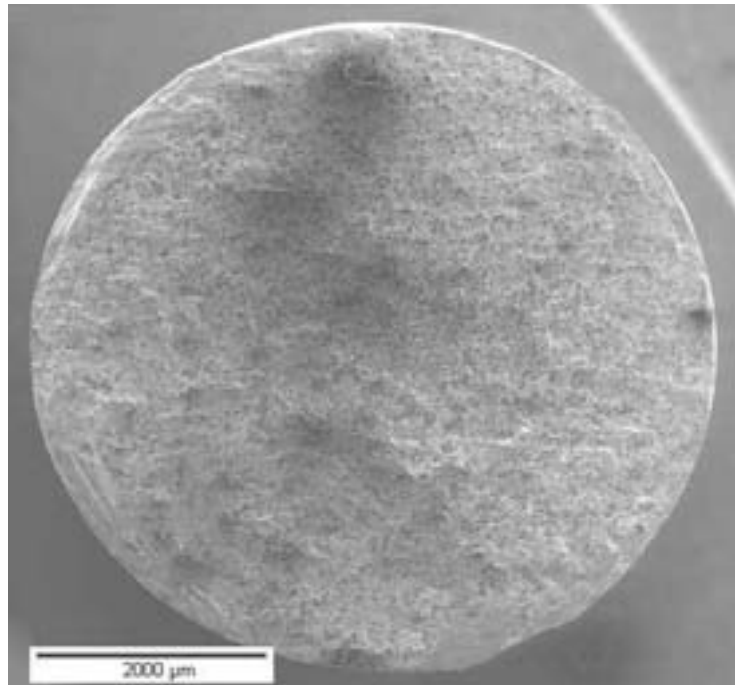


Figura 4.23 - Superfície de fratura do corpo de prova na condição SRB, ensaiado com tensão de 180 MPa.

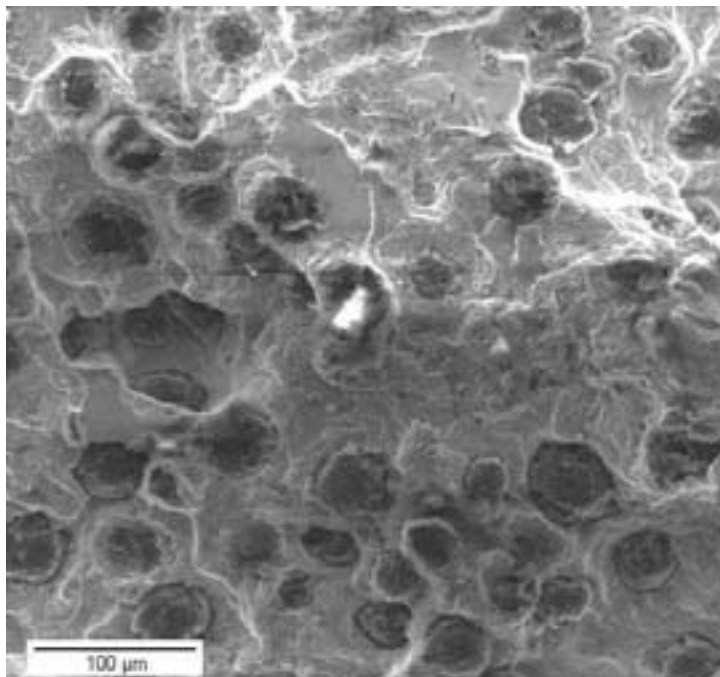


Figura 4.24 – Detalhamento fractográfico da Figura 4.23. Observa-se a presença de “dimples” com deformação plástica entre os nódulos de grafita e matriz ferrítica superior àquela apresentada na Figura 4.22.

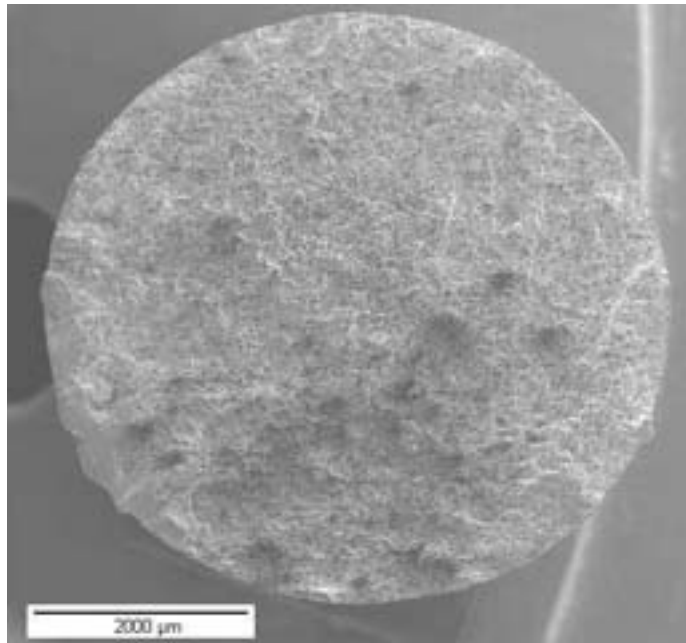


Figura 4.25 - Superfície de fratura do corpo de prova na condição SRR, ensaiado com tensão de 120 MPa.

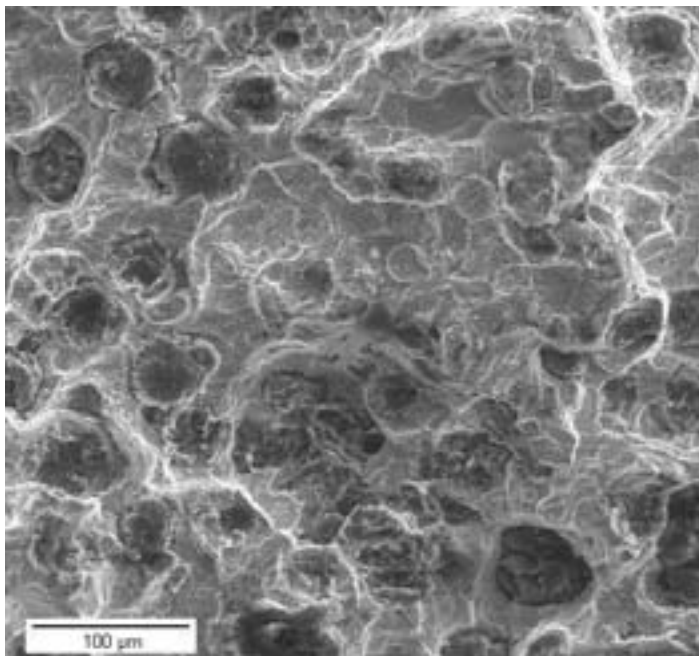


Figura 4.26 -Detalhamento fractográfico da Figura 4.25. Observa-se a presença de “dimples” com maior deformação plástica em comparação com aqueles da condição SRB. Entre os nódulos, existem características de um modo misto de fratura, com regiões que apresentam clivagem e deformação plástica, sugerindo um micromecanismo dúctil localizado de rasgamento da matriz.

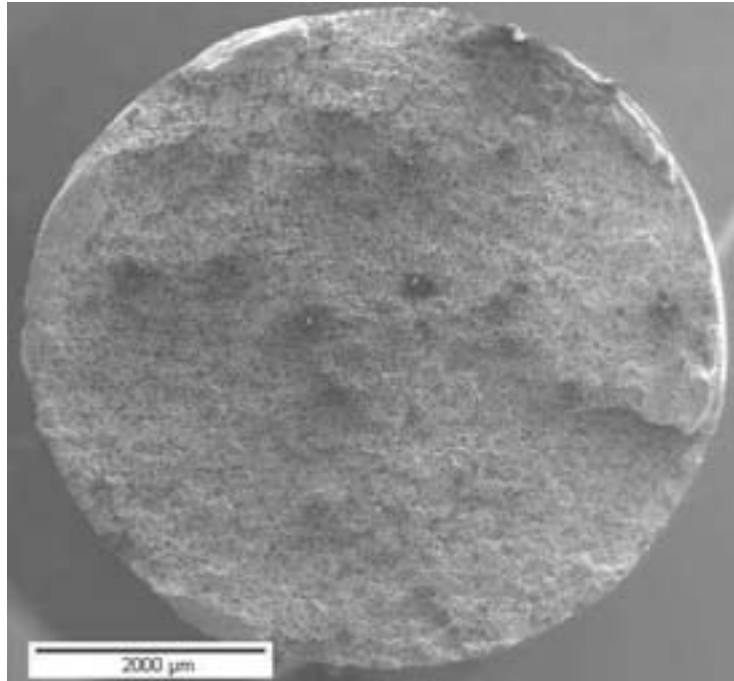


Figura 4.27 - Superfície de fratura do corpo de prova na condição SRR, ensaiado com tensão de 180 MPa.

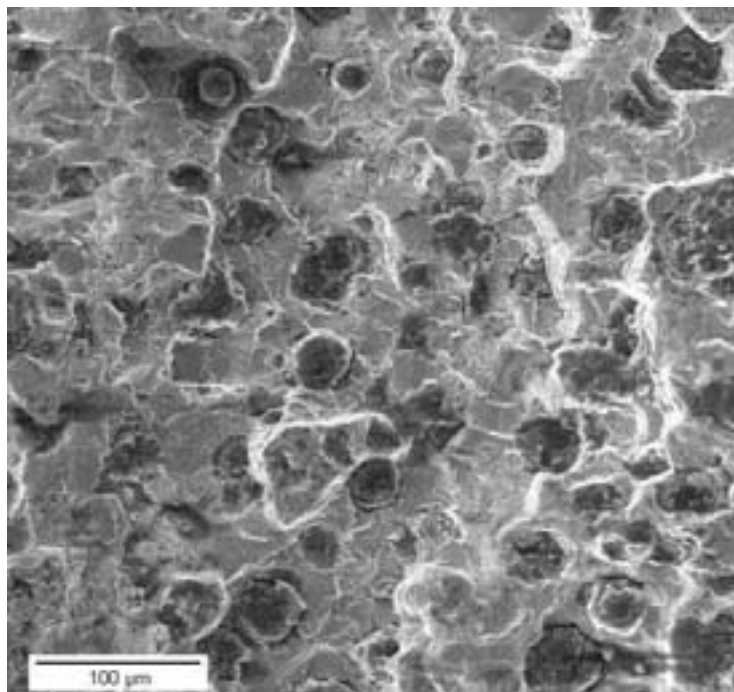


Figura 4.28 – Detalhamento fractográfico da Figura 4.27. Observa-se a presença de “dimples” com áreas de fratura mista ao redor.

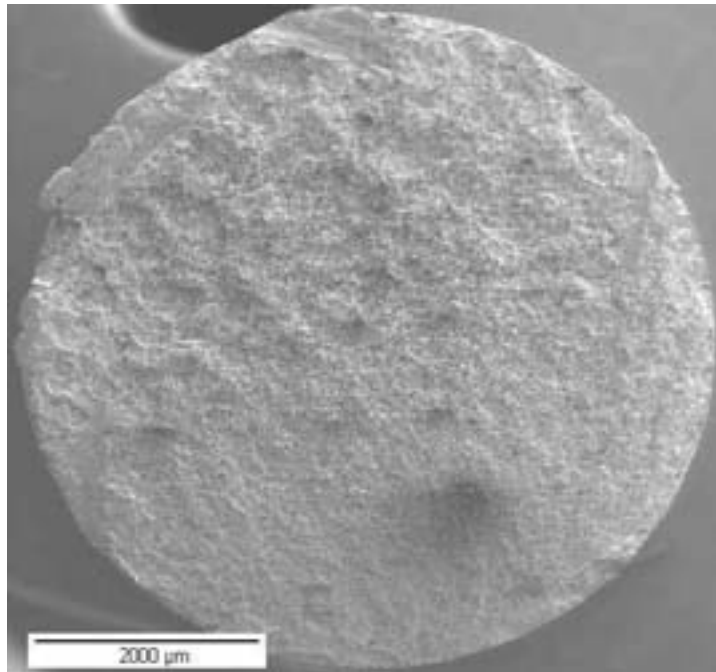


Figura 4.29 - Superfície de fratura do corpo de prova na condição CRB, ensaiado com tensão de 135 MPa.

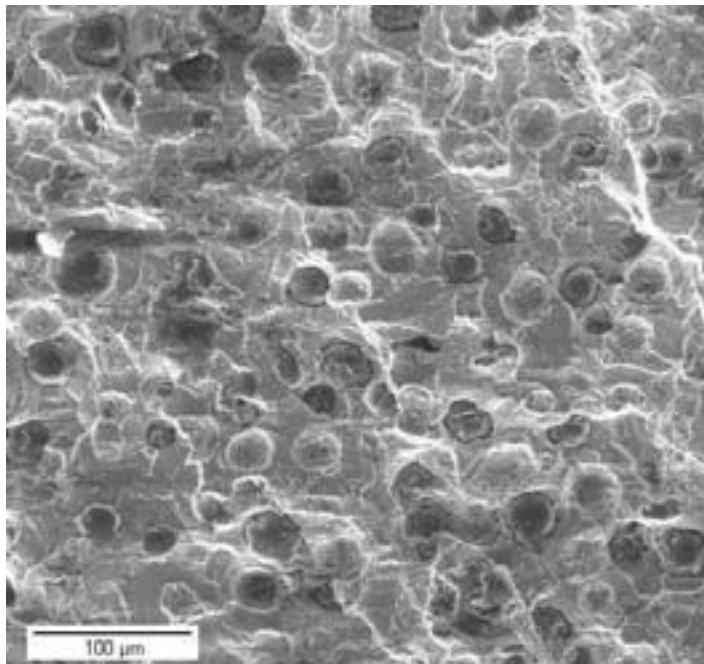


Figura 4.30 – Detalhamento fractográfico da Figura 4.29. Observa-se uma ausência quase que completa de deformação plástica entre os nódulos e matriz, evidenciando áreas de clivagem e rasgamento dúctil entre os nódulos.

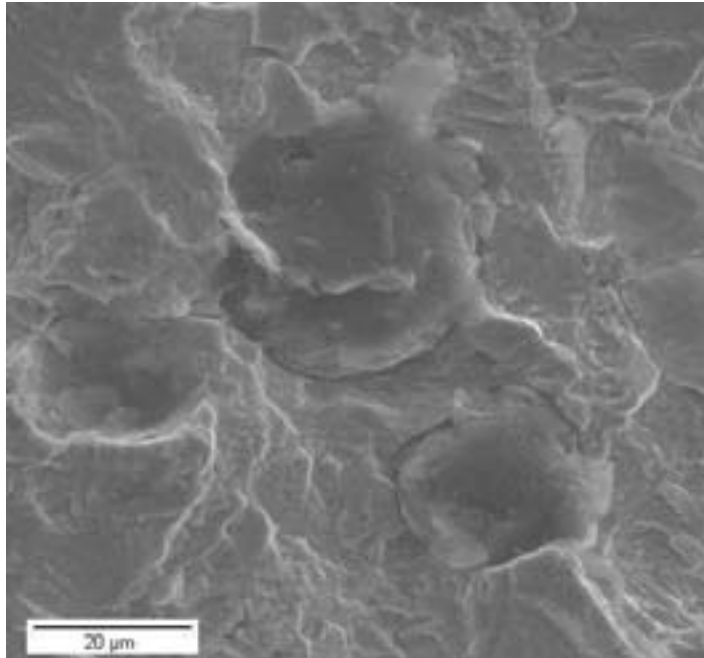


Figura 4.31– Detalhamento da interface nódulo de grafita e matriz ferrítica na amostra CRB. A figura evidencia uma reduzida deformação plástica na interface entre o nódulo e a matriz, embora exista descolamento. Nota-se com clareza a presença de linhas de deformação localizada, confirmando a existência de rasgamento dúctil em determinadas regiões da superfície de fratura.

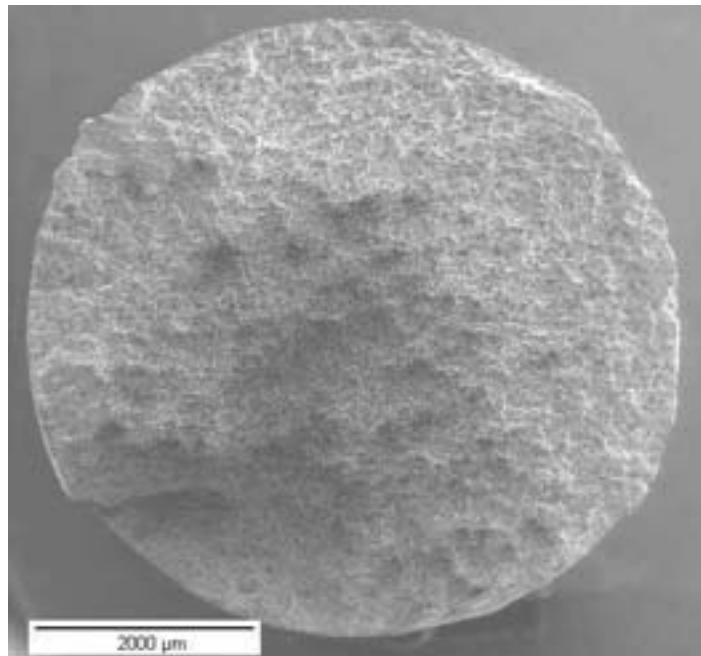


Figura 4.32 - Superfície de fratura do corpo de prova na condição CRB, ensaiado com tensão de 180 MPa.

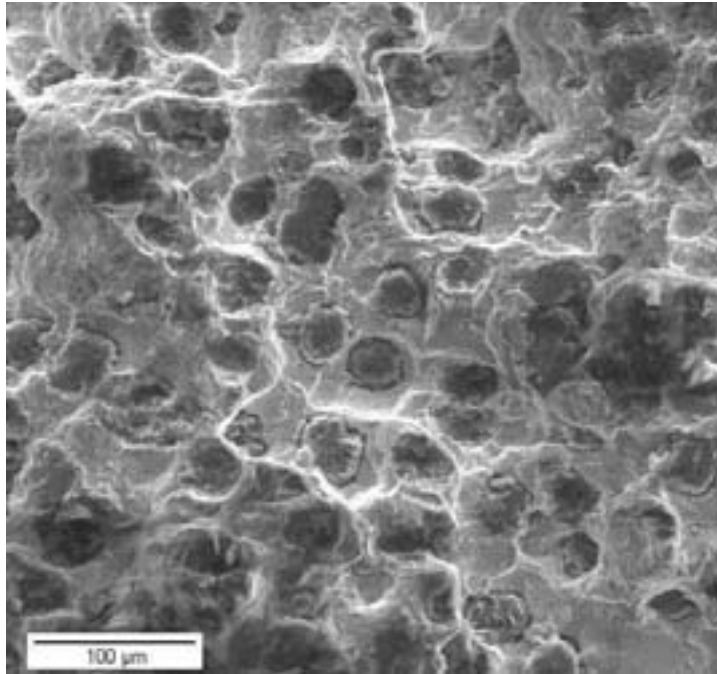


Figura 4.33 – Detalhamento fractográfico da Figura 4.32. Observa-se a presença de cavidades com deformação plástica entre os nódulos e matriz, bem como áreas de modo misto de fratura.

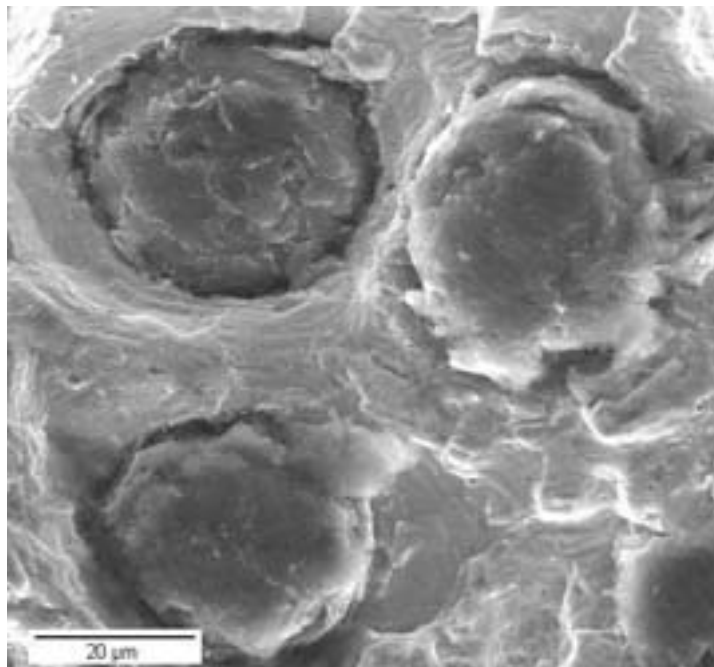


Figura 4.34 – Detalhamento da interface entre os nódulos de grafita e a matriz ferrítica na amostra CRB. A figura evidencia que a morfologia esférica da grafita foi responsável pela formação de “dimples” com extensa deformação plástica local na matriz.

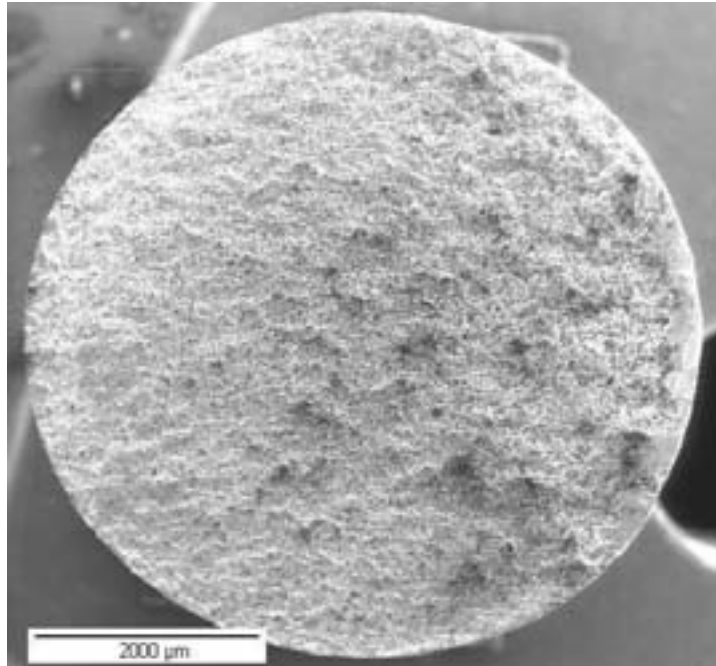


Figura 4.35 - Superfície de fratura do corpo de prova na condição CRR, ensaiado com tensão de 100 MPa.

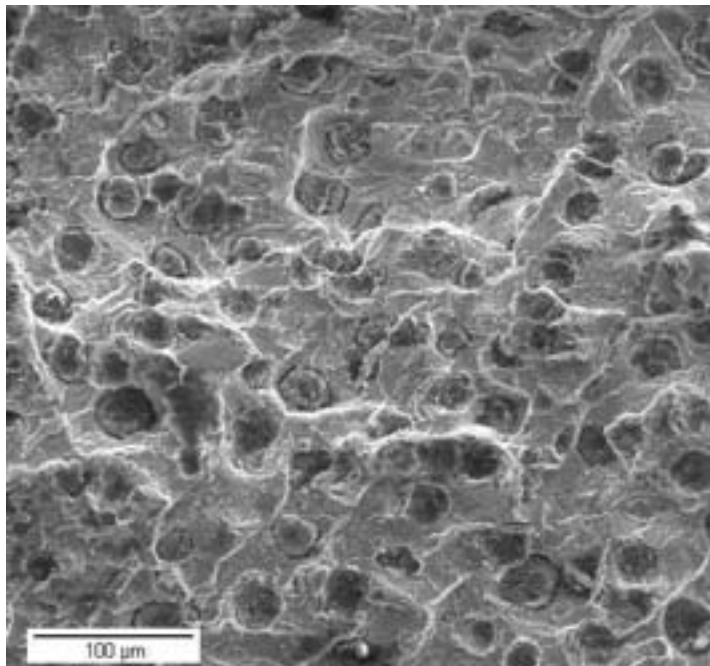


Figura 4.36 – Detalhamento fractográfico da Figura 4.35. Observa-se a presença de “dimples” e de áreas com modo misto de fratura.

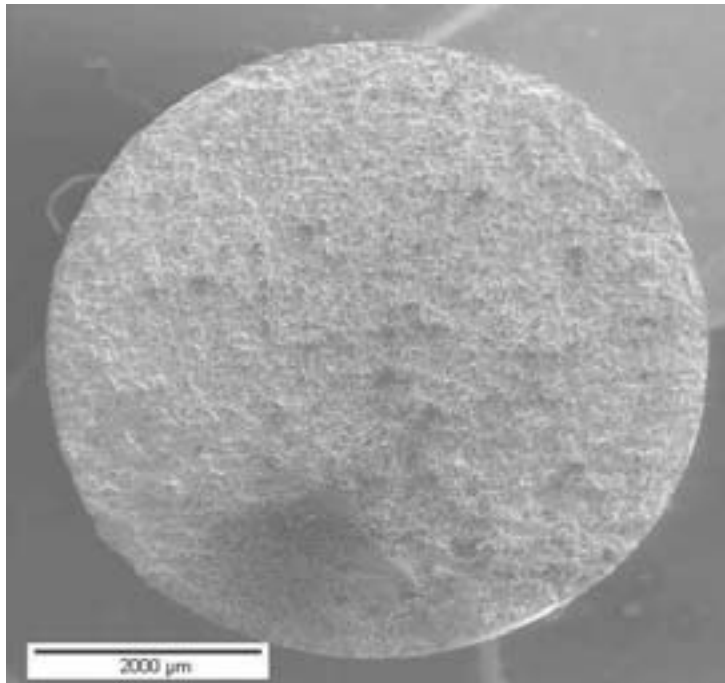


Figura 4.38 - Superfície de fratura do corpo de prova na condição CRR ensaiado com tensão de 180 MPa.

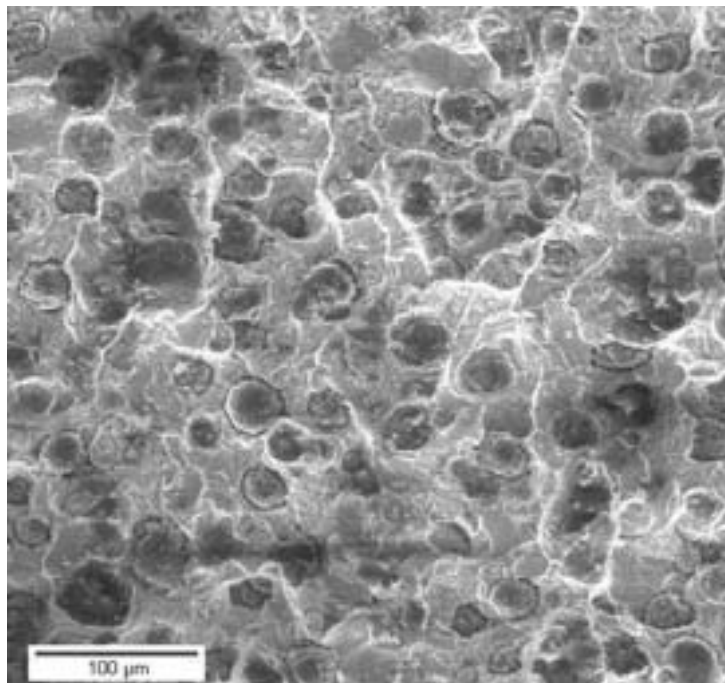


Figura 4.38 – Detalhamento fractográfico da Figura 4.37. Observa-se a presença de “dimples” e de áreas com modo misto de fratura.