

4

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1.

Propriedades Mecânicas

4.1.1.

Ensaio de Tração

Os resultados do ensaio de tração do aço SAE 4140 após os tratamentos térmicos estão mostrados na Tabela 4.1. As propriedades mecânicas medidas foram o limite de escoamento (LE) limite de resistência mecânica (LR), alongamento específico (ΔL) e redução de área (RA). Nesta Tabela os valores experimentais estão representados pela média dos três corpos de prova e acompanhados dos seus respectivos desvios padrão.

Tabela 4.1 – Propriedades Mecânicas do aço SAE 4140.

Lote	LE (MPa)	LR (MPa)	ΔL (%)	RA (%)
1	$869 \pm 4,1$	$977 \pm 1,4$	$16,2 \pm 1,4$	$59,5 \pm 5$
2	$717 \pm 5,8$	$868 \pm 2,8$	$20 \pm 0,3$	64 ± 0
3	$819 \pm 7,6$	$934 \pm 4,9$	$17,4 \pm 0,6$	63 ± 0
4	$692 \pm 1,7$	$808 \pm 1,4$	$22,2 \pm 0,5$	$65 \pm 0,9$
5	$667 \pm 1,1$	$722 \pm 6,6$	$22,5 \pm 1,5$	$64 \pm 1,4$
6	$638 \pm 2,4$	$767 \pm 1,1$	$22 \pm 0,7$	$66 \pm 0,7$
7	$763 \pm 4,2$	$908 \pm 2,7$	$18,5 \pm 1,3$	63 ± 2
8	773 ± 0	$911 \pm 3,5$	$18,7 \pm 1,6$	$64 \pm 0,7$
9	$798 \pm 3,0$	$923 \pm 3,4$	$15,5 \pm 5$	$61 \pm 2,8$
10	811 ± 10	$920 \pm 1,8$	$13,5 \pm 1$	$51 \pm 1,1$
11	$757 \pm 2,8$	$874 \pm 2,1$	$18,5 \pm 0,8$	$63 \pm 1,4$
12	$780 \pm 1,6$	$894 \pm 2,0$	$17,5 \pm 1,3$	$63 \pm 1,9$
13	$854 \pm 3,1$	$954 \pm 5,7$	$20,7 \pm 2$	$68 \pm 7,7$
14	$773 \pm 4,2$	$880 \pm 4,2$	$16,1 \pm 0,6$	$59,8 \pm 10$
15	$758 \pm 9,7$	$882 \pm 1,2$	$17,7 \pm 1,9$	$62,1 \pm 0$
16	$759 \pm 3,1$	$888 \pm 7,4$	$18,6 \pm 0,5$	65 ± 2
17	$740 \pm 1,1$	$870 \pm 2,2$	$19 \pm 0,6$	$60 \pm 4,3$
18	$747 \pm 1,5$	$872 \pm 1,8$	$17 \pm 0,3$	$63 \pm 4,8$
19	$992 \pm 1,1$	$1132 \pm 2,9$	$11,2 \pm 1,8$	$61 \pm 9,9$
20	$1011 \pm 6,9$	$1156 \pm 5,9$	$14 \pm 3,1$	$54 \pm 4,7$
21	$968 \pm 4,7$	$1128 \pm 6,8$	$16,1 \pm 3,4$	$51 \pm 5,2$
22	$747 \pm 2,1$	$848 \pm 1,8$	$22 \pm 1,8$	$62 \pm 3,5$
23	$821 \pm 6,4$	$969 \pm 1,6$	$18 \pm 0,9$	$61 \pm 1,2$
24	$786 \pm 8,5$	$870 \pm 1,6$	$21 \pm 1,5$	$65 \pm 0,4$

Pela análise da Tabela 4.1 podemos observar que para os lotes 1 ao 6 as propriedades de limite de escoamento e limite de resistência apresentaram uma variação bastante significativa enquanto para o alongamento específico e a redução de área esta variação não se verificou em grandes proporções. Para os lotes da condição fechada a variação do limite de escoamento e limite de resistência foi verificada como significativa enquanto o alongamento específico e a redução de área esta variação não se verificou em grandes proporções. Já para os lotes da condição aberta o limite de escoamento e o limite de resistência apresentam uma variação considerável enquanto o alongamento específico e a redução de área apresentaram pouca variação. Para os lotes 19 ao 22 a variação foi bastante elevada tanto em relação ao limite de escoamento como em relação ao limite de resistência enquanto o alongamento específico e a redução de área a variação foi pequena. Para os lotes 23 e 24 o limite de escoamento e o limite de resistência apresentaram variações significativas enquanto o alongamento específico e a redução de área apresentaram pouca variação. Para todas as propriedades mecânicas obtidas os valores se encontram de acordo com a norma ASTM E370 [71].

Há de se destacar aqui com relação a estas propriedades mecânicas que o limite de escoamento é calculado pela carga limite de escoamento dividido pela área, sendo a área de todos os corpos igual a 30,66mm. O limite de resistência mecânica é calculado pela força dividido pela área. O alongamento específico é calculado pela variação de comprimento dividido pelo comprimento inicial, sendo este comprimento inicial igual a cinco vezes o diâmetro do corpo de prova. Com relação ao alongamento específico ele é medido no momento da fratura do corpo de prova sendo uma medida adimensional e denominado assim, pois o material rompe com pescoçamento. O alongamento específico é diferente de deformação na fratura. A redução de área é calculada pela diferença entre a área inicial e a área final dividido pela área inicial sendo uma medida da ductilidade do material.

4.1.2. Ensaio de Impacto

Os resultados do ensaio de impacto do aço SAE 4140 após os tratamentos térmicos são mostrados na Tabela 4.2. Nesta Tabela os valores experimentais estão representados pela media dos seis corpos de prova e seus respectivos desvios padrão. Os valores obtidos estão de acordo com a norma ASTM E-23-05 [72].

Tabela 4.2 – Resultados de ensaio de impacto do aço SAE 4140.

Lote	Charpy (J)
1	95,6 ± 3,3
2	126,2 ± 1,1
3	118,3 ± 2,9
4	92,3 ± 2,2
5	140 ± 9,0
6	128 ± 1,4
7	101,4 ± 1,1
8	90,4 ± 2,2
9	103,6 ± 3,8
10	101,7 ± 1,1
11	110,2 ± 7,8
12	108,1 ± 7,4
13	111 ± 9,3
14	117 ± 10
15	112 ± 1,5
16	82 ± 3,0
17	106 ± 1,6
18	105 ± 5,0
19	48 ± 7,5
20	69 ± 7,7
21	57,4 ± 4,9
22	125,7 ± 1,2
23	121,5 ± 7,0
24	129,3 ± 6,6
25	95,3 ± 6,3

A análise da Tabela 4.2 indica que a média dos corpos de prova Charpy para cada lote variou significativamente, com o lote 5 apresentando o maior valor de energia de impacto enquanto o lote 19 apresentando o menor valor de energia de impacto. Os valores elevados de energia de impacto caracterizam a formação de uma microestrutura dúctil enquanto os valores baixos de energia de impacto a formação de uma microestrutura frágil. Como os lotes foram subdivididos de acordo com o tipo de tratamento térmico adotado e condições de resfriamento utilizadas o seu comportamento deve ser analisado separadamente. A Figura 4.1 apresenta o comportamento dos lotes 1 ao 6 em função da temperatura de revenido.

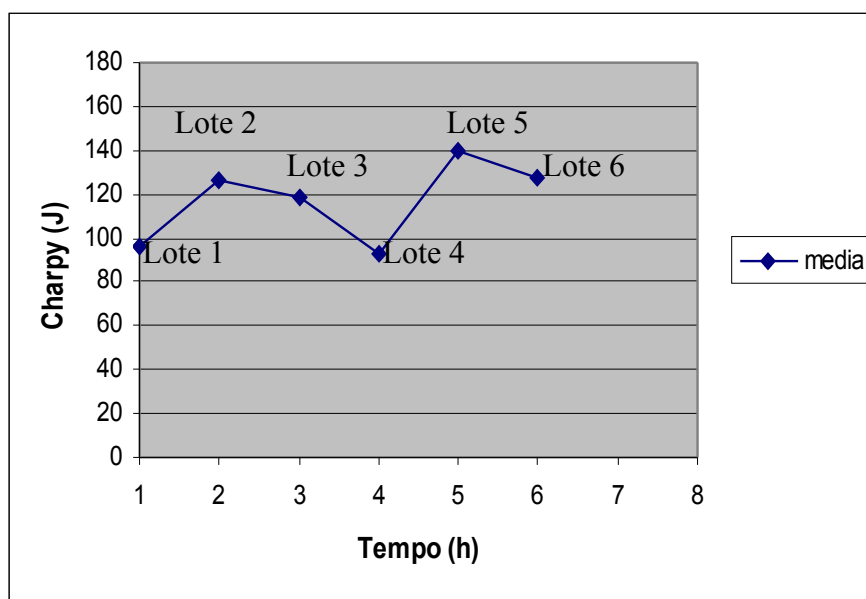


Figura 4.1 – Energia de impacto em função do tempo de revenido.

A análise da Figura 4.1 mostra que os valores de energia de impacto se encontram bastantes elevados com o lote 5 apresentando o maior valor para um tempo de revenido de 5 horas enquanto o lote 4 apresentou o menor valor para um tempo de revenido de 4 horas. Há de se destacar que o lote 4 apresenta pelo seu comportamento uma tendência a fragilização no revenido.

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram a energia de impacto em função da temperatura de resfriamento de acordo com as condições de resfriamento adotadas: aberto e fechado.

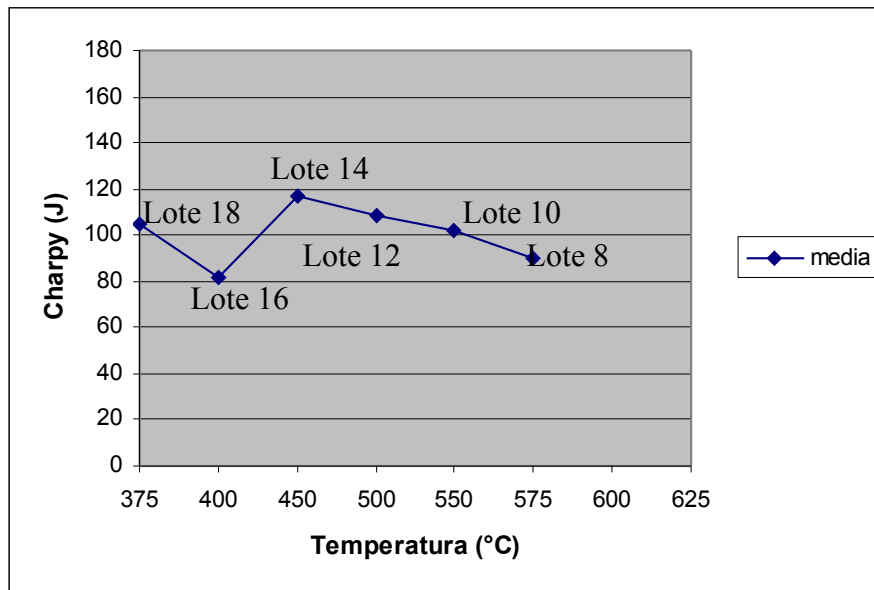


Figura 4.2 – Energia de impacto em função da temperatura para a condição aberta.

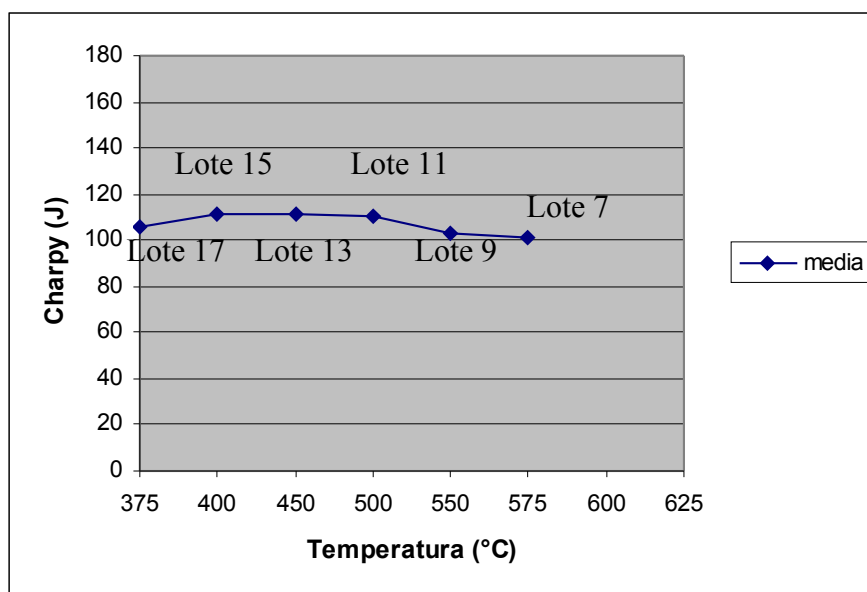


Figura 4.3 – Energia de impacto em função da temperatura para a condição fechada.

A análise das Figuras 4.2 e 4.3 sugerem que o forno com porta aberta apresentou maior variação de energia de impacto do que o forno com porta fechada, porém na condição fechada a energia de impacto apresentou uma menor queda com aumento de temperatura de revenido conforme pode se verificar pela suavidade da curva. Este comportamento apresentado leva a crer que durante a condição fechada ocorre o refino da microestrutura, conseqüentemente levando a um aumento de resistência e tenacidade do material. O lote 16 pode ser

caracterizado como um ponto fora da curva, levando a crer que ele realmente foi fragilizado.

A Figura 4.4 mostra a energia de impacto em função da temperatura de revenido.

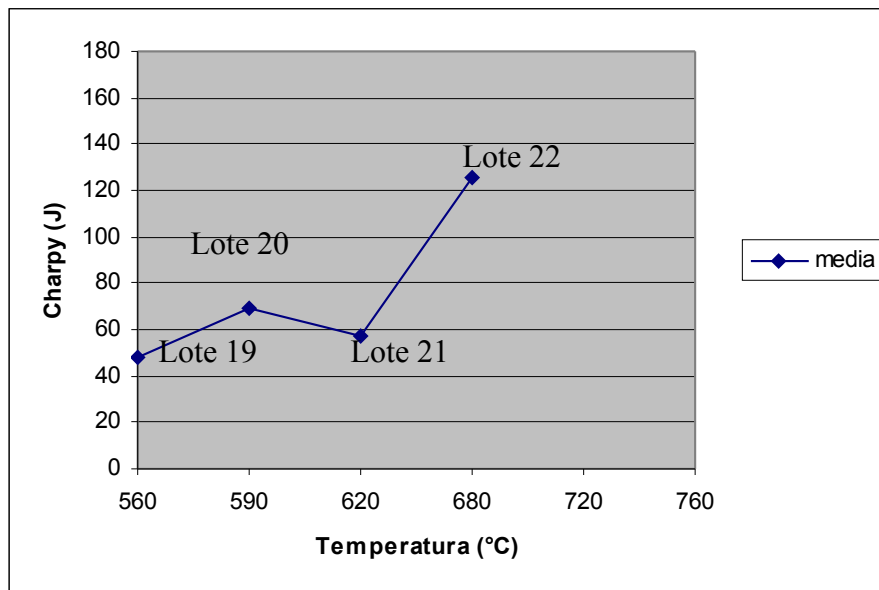


Figura 4.4 – Energia de impacto em função da temperatura de revenido.

A análise da Figura 4.4 mostra que ocorre uma queda de energia de impacto para o lote 21 durante a temperatura de revenido de 620°C, isto pode ser devido à tendência que este lote teve a fragilização. Já no lote 22 o valor de energia de impacto é bastante elevado.

4.2.

Microdureza

Os resultados do ensaio de microdureza do aço SAE 4140 estão mostrados na Tabela 4.3 e foram obtidos com a medição de cinco pontos distintos, efetuados na superfície do corpo de prova Charpy. Nesta tabela os valores experimentais estão representados pela média e os respectivos desvios padrão.

Tabela 4.3 – Resultados de microdureza do aço SAE 4140.

Lote	H _v
1	340,2 ± 1,4
2	353,6 ± 1,1
3	320,6 ± 1,7
4	337 ± 1,2
5	307,4 ± 2,1
6	307,2 ± 1,7
7	332,4 ± 2,1
8	350,2 ± 7,1
9	369,8 ± 1,3
10	382,2 ± 2,1
11	334,8 ± 1,6
12	313 ± 1,3
13	309,2 ± 9,8
14	311,4 ± 6,0
15	322,8 ± 1,0
16	314,8 ± 1,3
17	335 ± 5,3
18	330,2 ± 2,1
19	425,4 ± 3,6
20	360,2 ± 2,0
21	370,6 ± 1,8
22	278,4 ± 9,0
23	242,2 ± 8,0
24	237,6 ± 4,9
25	340 ± 1,5

A análise da Tabela 4.3 mostra que houve influência dos diversos parâmetros de tratamento térmicos adotados como temperatura, tempo e condições de resfriamento sobre a microdureza do material. O lote 19 foi o que apresentou a máxima microdureza entre todos. Possivelmente, sua maior microdureza foi devido a transformações difusionais parciais que favoreceram a formação de uma microestrutura de bainita e martensita revenida livre de carbonetos. Ao comparar a Tabela 4.3 que apresenta os valores de microdureza com a Tabela 4.2 que apresenta os valores de energia de impacto podemos afirmar que as microestruturas são diferentes, mas realmente não podemos afirmar se realmente ocorreu fratura dúctil ou frágil.

4.3. Caracterização Microestrutural

A seguir são apresentadas as estruturas característica de cada condição microestrutural dos diferentes tratamentos térmicos (vide Tabela 3.2).

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 1 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.5 e 4.6. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.5) e constituída essencialmente por martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.6).

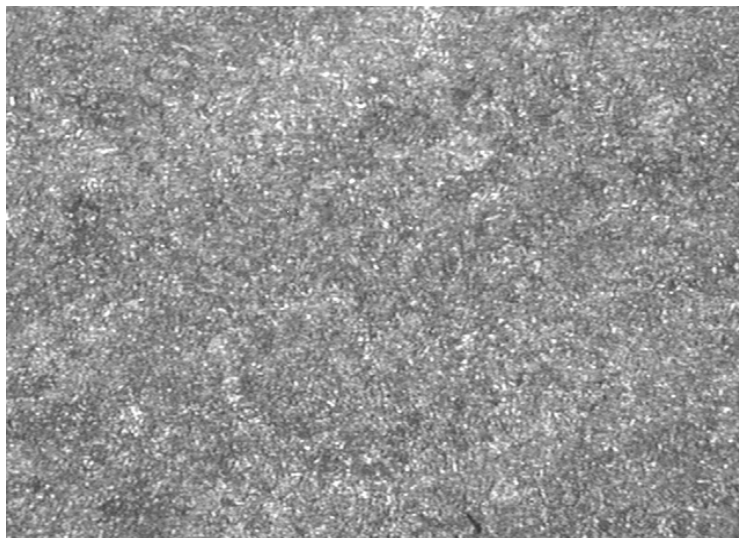


Figura 4.5 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 1. Aumento de 100x.

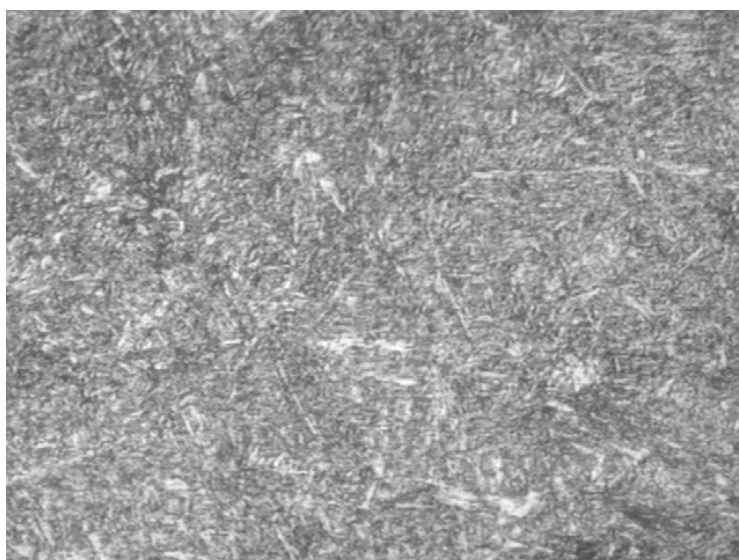


Figura 4.6 – Idem figura anterior. Presença de traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 2 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 2 horas seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.7 e 4.8. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina com presença de segregação em alguns pontos (Figura 4.7) e constituída por martensita revenida (Figura 4.8).

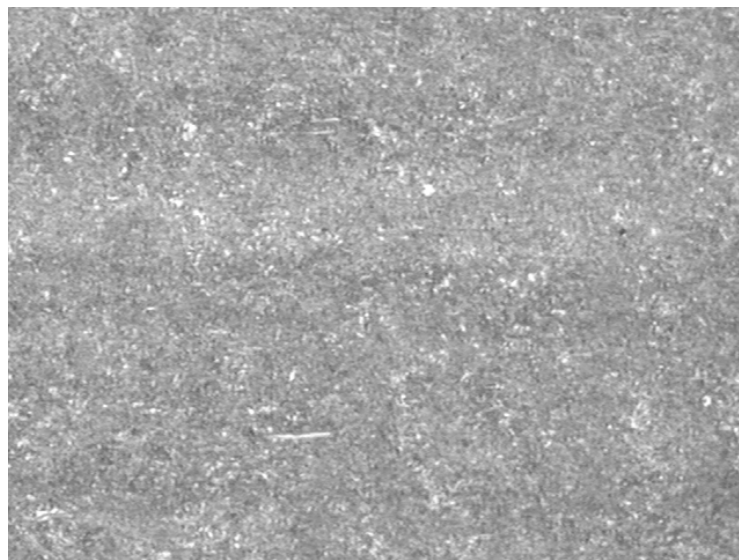


Figura 4.7 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 2. Aumento de 100x.

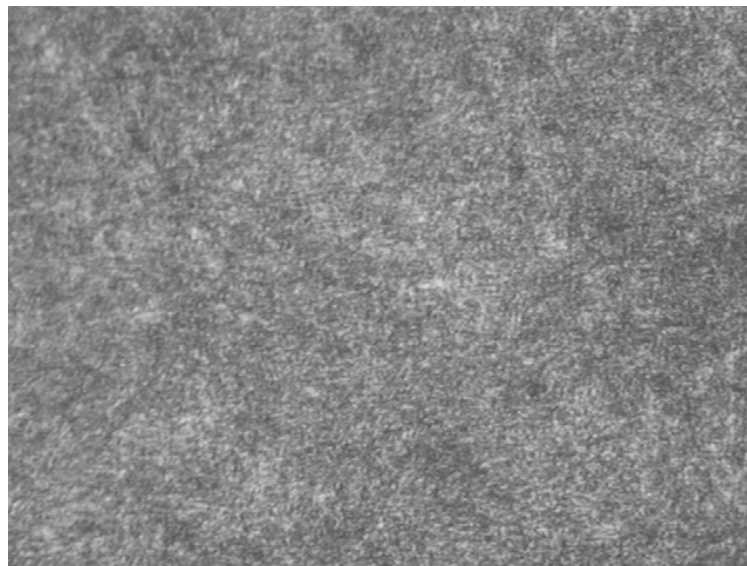


Figura 4.8 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida. Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 3 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 3 horas seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas figuras 4.9 e 4.10. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina apresentando efeitos de segregação (Figura 4.9) e constituída essencialmente por martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.10).

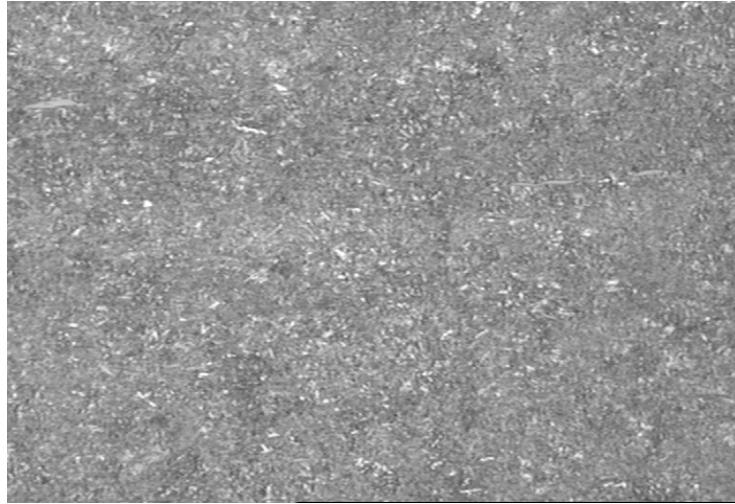


Figura 4.9 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 3. Aumento de 100x.

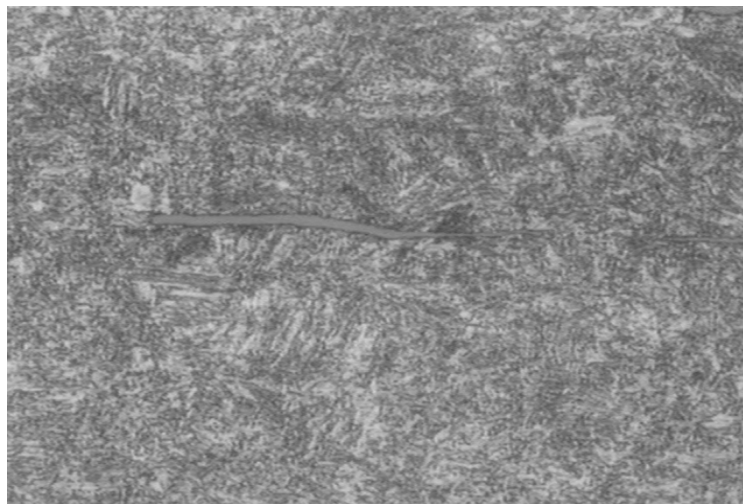


Figura 4.10 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 4 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 4 horas seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.11 e 4.12. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.11) e constituída essencialmente por martensita revenida (Figura 4.12).

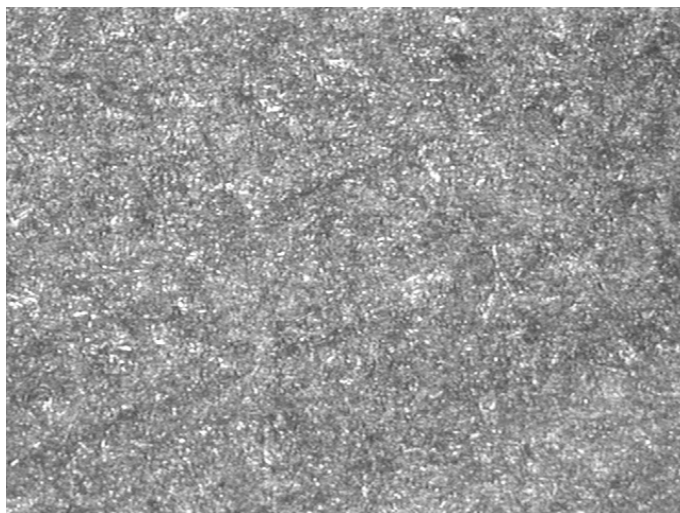


Figura 4.11 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 4. Aumento de 100x.

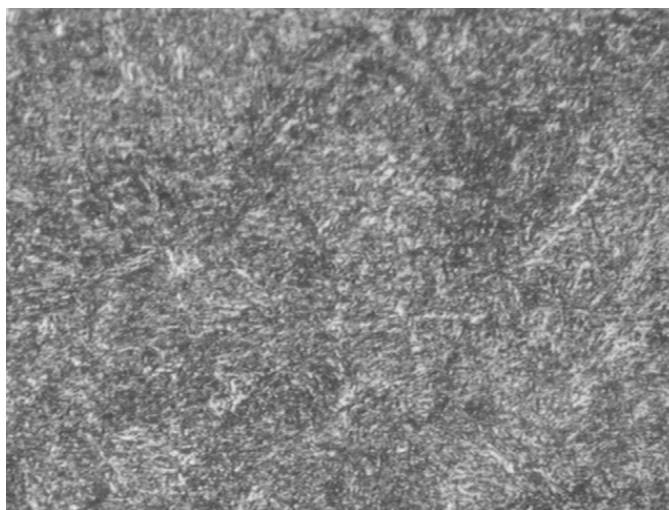


Figura 4.12 — Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas presentes características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 5 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 5 horas seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.13 e 4.14. Observa-se que a microestrutura de granulação fina (Figura 4.13) é constituída essencialmente de martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.14).

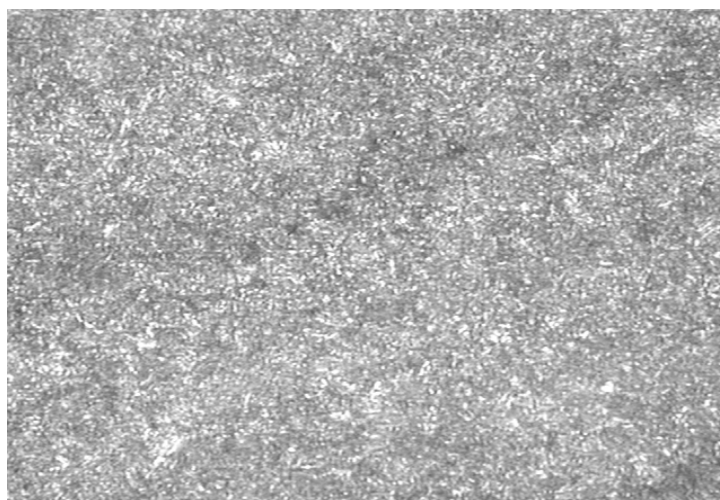


Figura 4.13 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 5. Aumento de 100x.

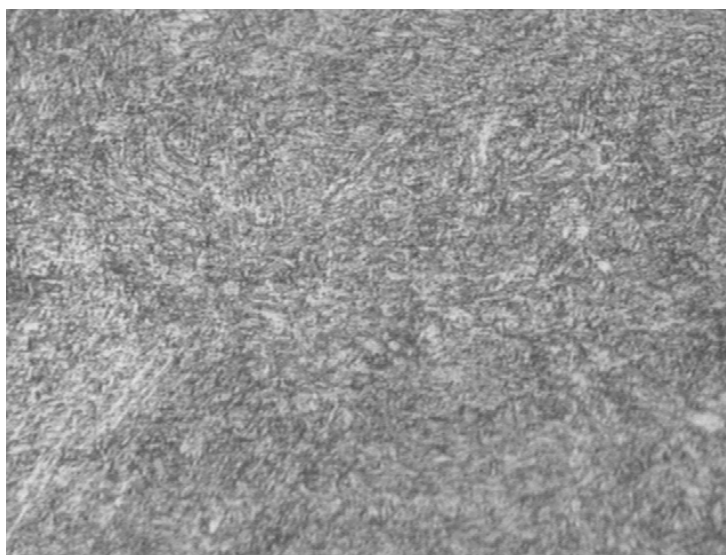


Figura 4.14 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida. Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 6 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 6 horas seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.15 e 4.16. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.15) e constituída por martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.16).

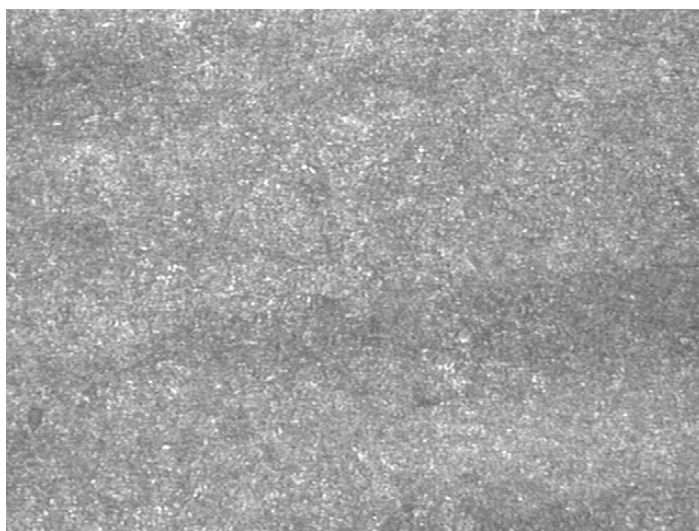


Figura 4.15 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 6. Aumento de 100x.

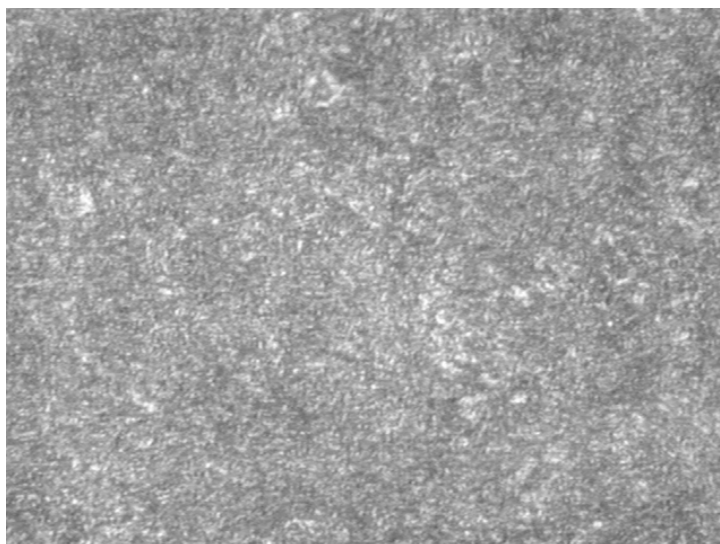


Figura 4.16 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas presentes características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 7 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 575°C na condição fechada em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.17 e 4.18. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.17) e constituída por martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.18).

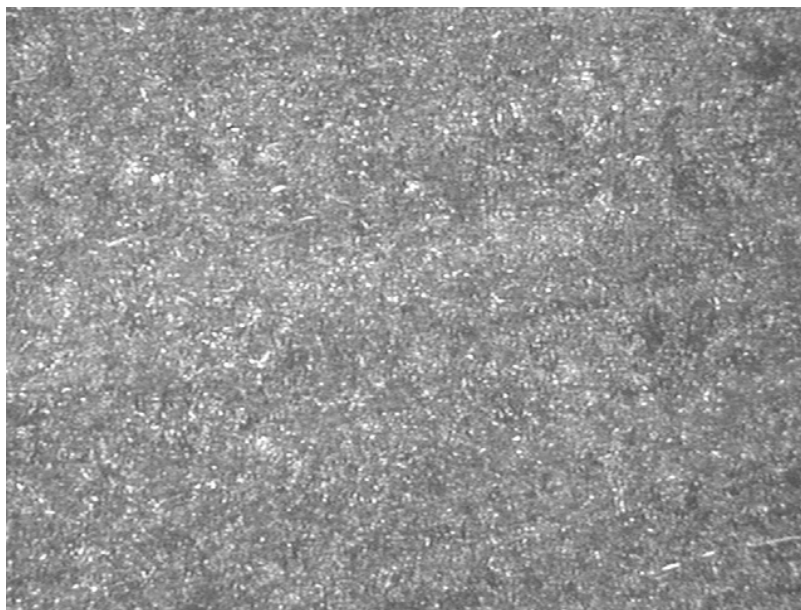


Figura 4.17 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 7. Aumento de 100x.

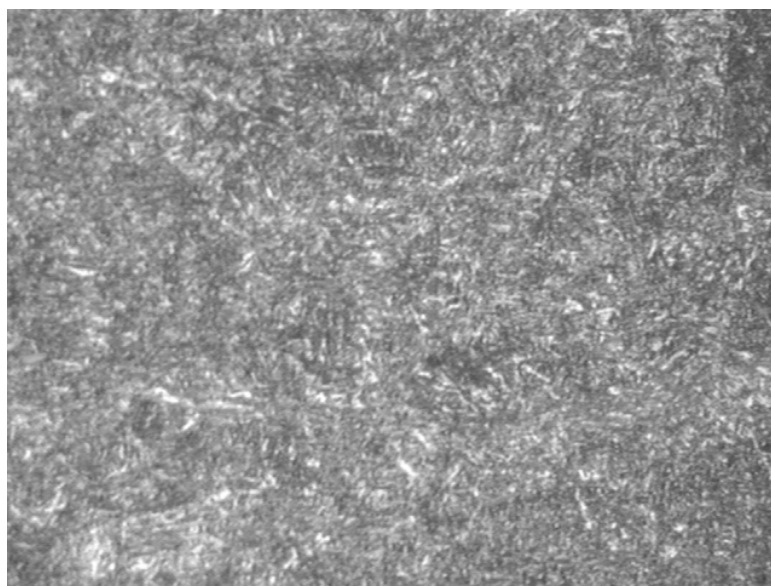


Figura 4.18 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras) e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 8 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 575°C na condição aberta em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.19 e 4.20. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina com presença de segregação (Figura 4.19) e constituída por martensita revenida (Figura 4.20).



Figura 4.19 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 8. Aumento de 100x.

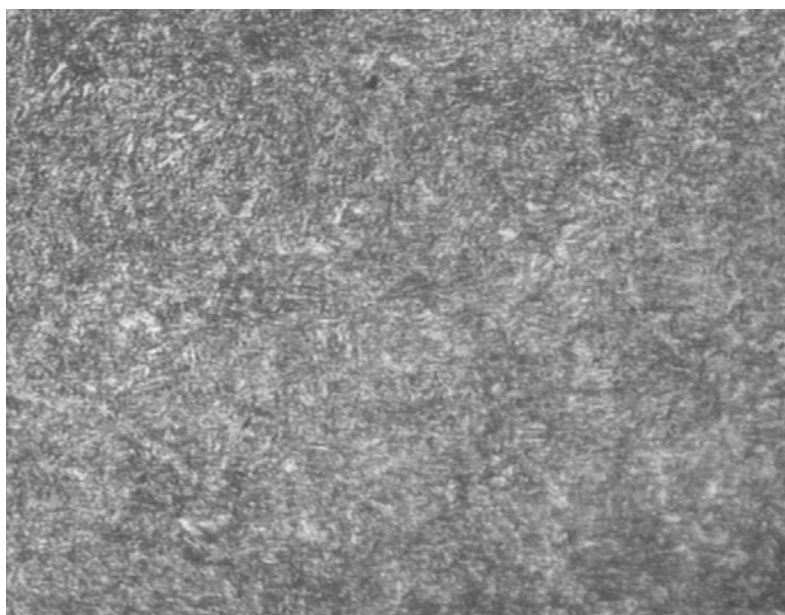


Figura 4.20 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas presentes características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 9 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 550°C na condição fechada em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.21 e 4.22. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.21) e constituída de martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.22).

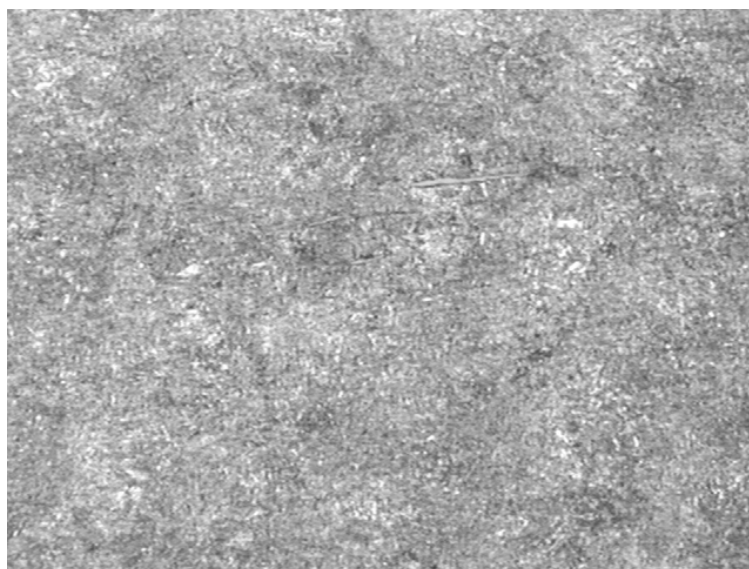


Figura 4.21 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 9. Aumento de 100x.

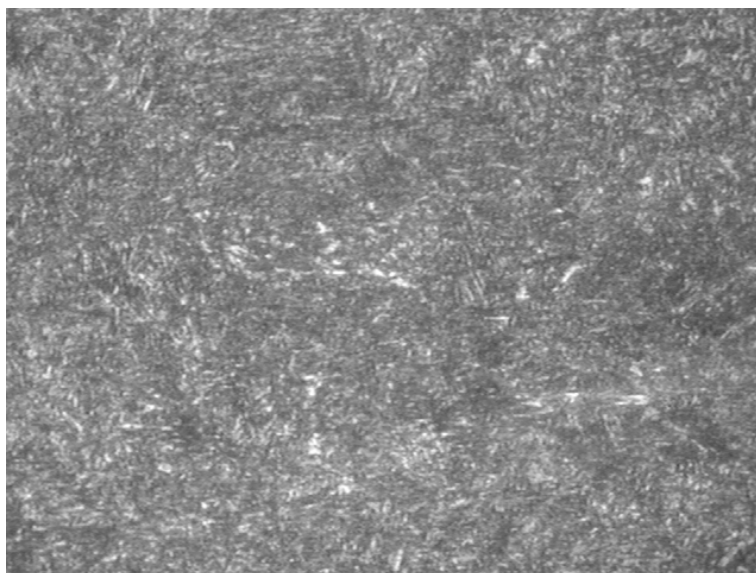


Figura 4.22 – Idem figura anterior. Presença de traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 10 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 550°C na condição aberta em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.23 e 4.24. Observa-se que a microestrutura é essencialmente martensítica com presença de segregação (Figura 4.23) e constituída por martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.24).

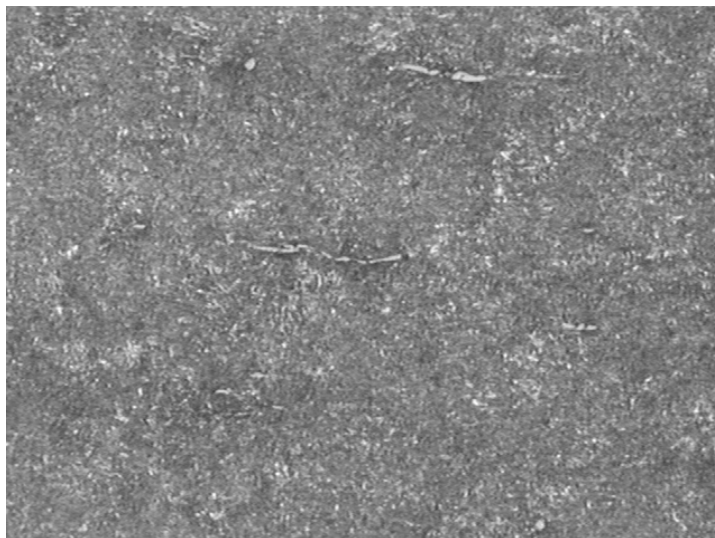


Figura 4.23 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 10. Aumento de 100x.

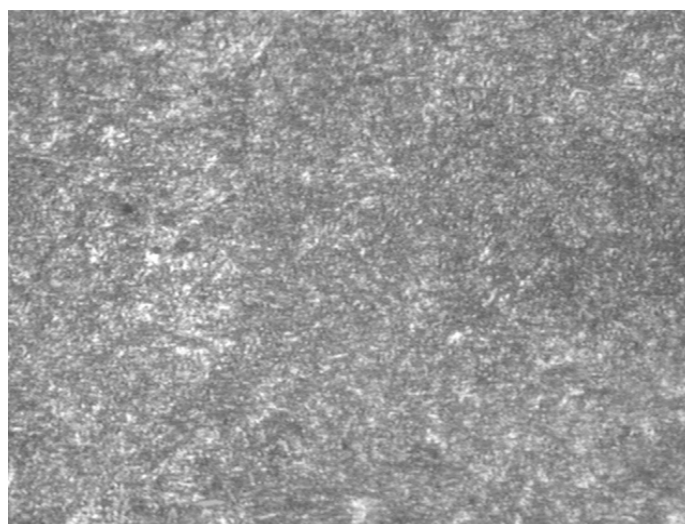


Figura 4.24 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 11 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 500°C na condição fechada em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.25 e 4.26. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.25) e constituída por martensita revenida (Figura 4.26).

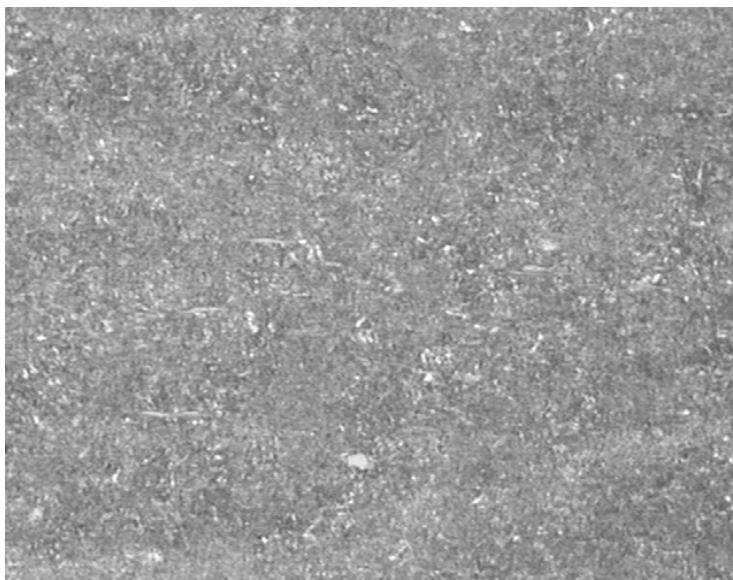


Figura 4.25 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 11. Aumento de 100x.

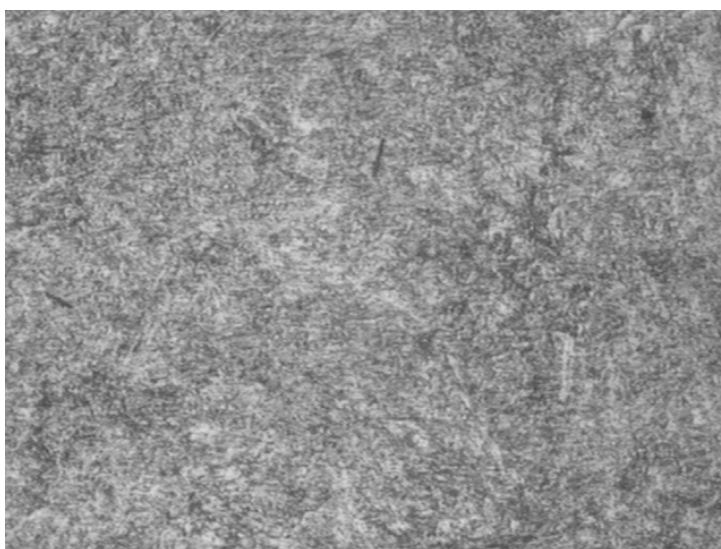


Figura 4.26 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 12 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 500°C na condição aberta em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.27 e 4.28. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina com presença de segregação (Figura 4.27) e constituída por martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.28).

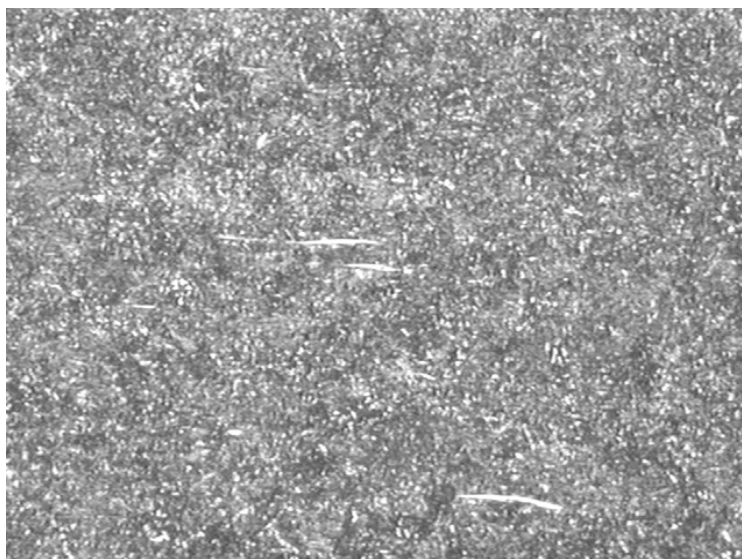


Figura 4.27 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 12. Aumento de 100x.

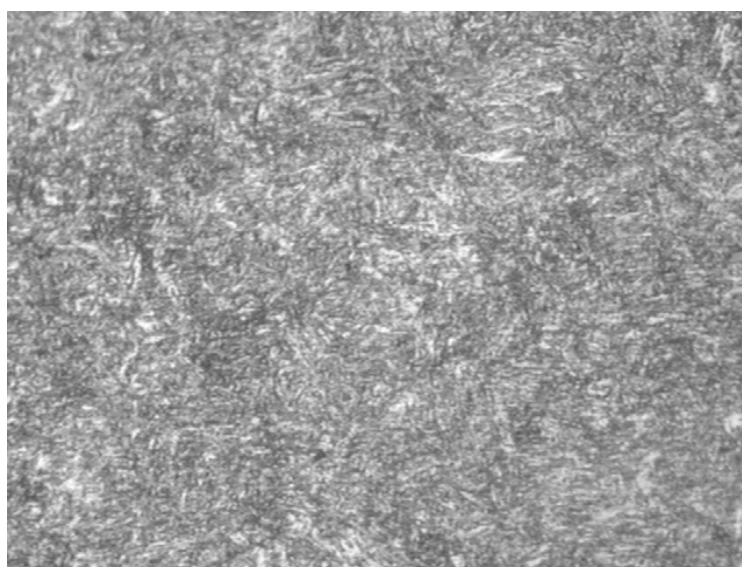


Figura 4.28 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 13 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 450°C na condição fechada em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.29 e 4.30. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.29) e constituída por martensita revenida (Figura 4.30).

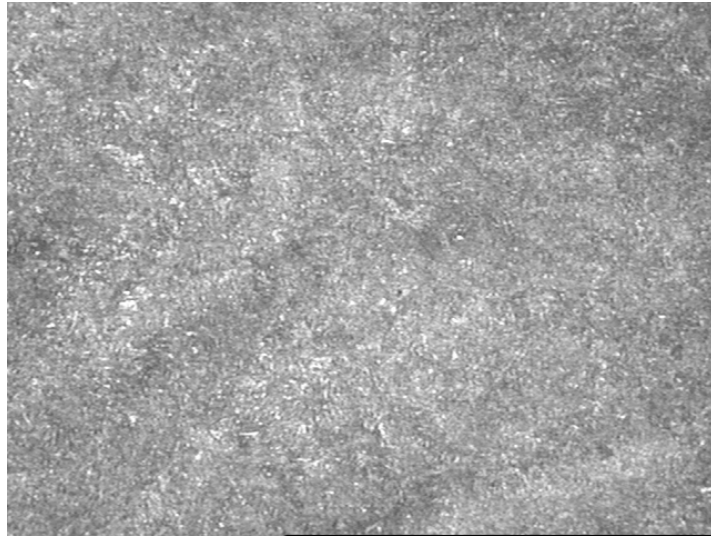


Figura 4.29 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 13. Aumento de 100x.

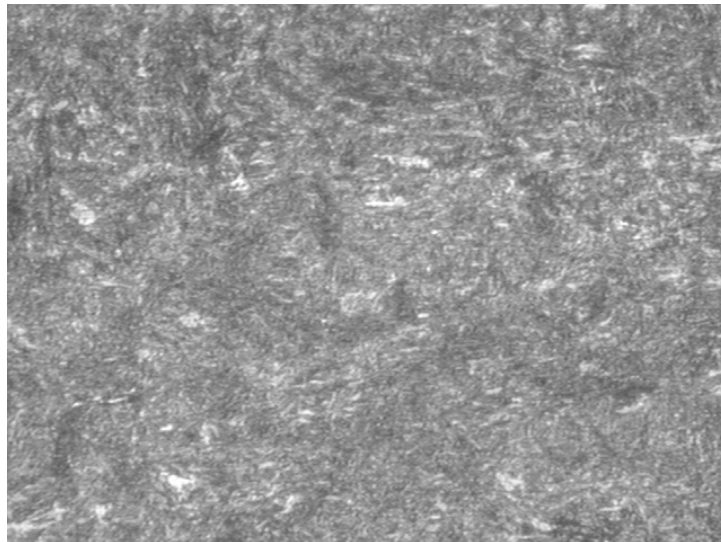


Figura 4.30 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 14 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 450°C na condição aberta em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.31 e 4.32. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.31) e constituída por martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.32).

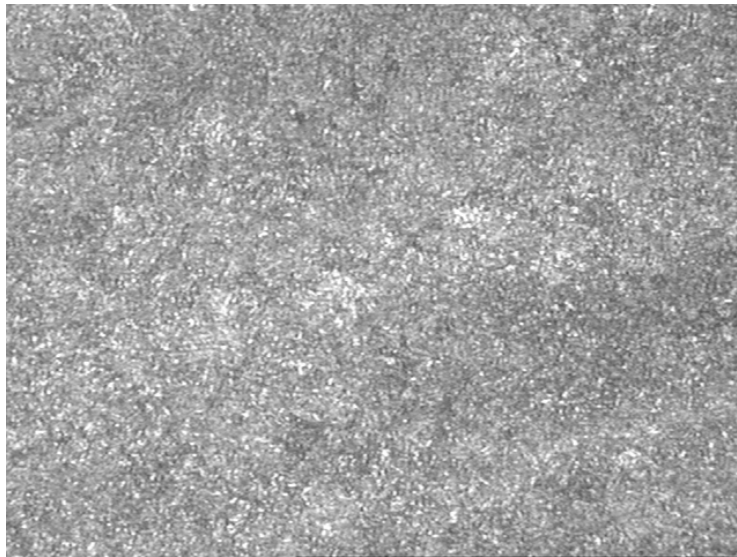


Figura 4.31 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 14. Aumento de 100x.

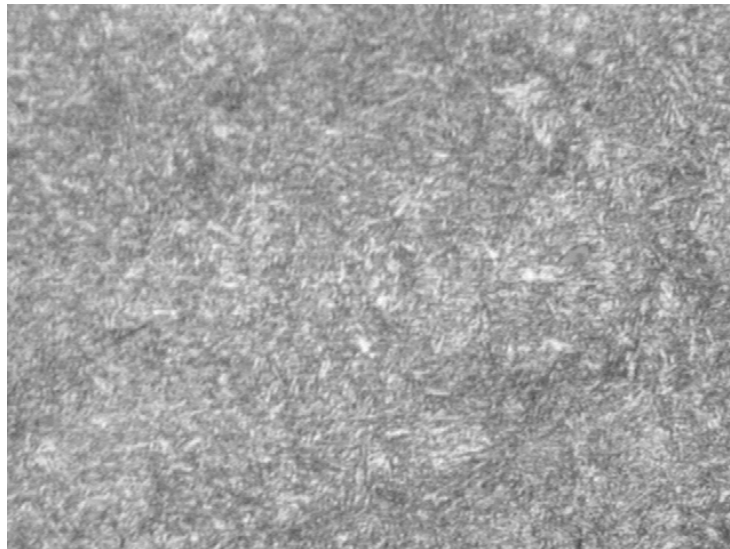


Figura 4.32 – Idem figura anterior. Presença de traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 15 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 400°C na condição fechada em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.33 e 4.34. Observa-se que a microestrutura é essencialmente martensita com regiões de segregação (Figura 4.33) e constituída por martensita (Figura 4.34).

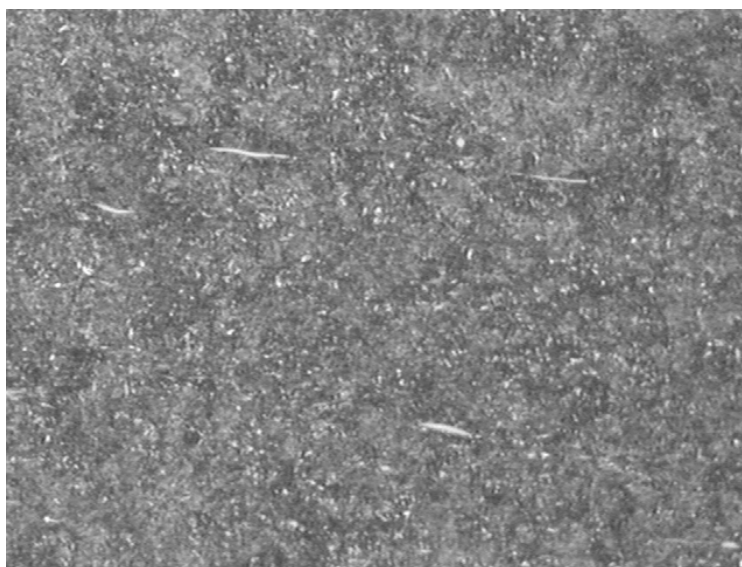


Figura 4.33 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 15. Aumento de 100x.

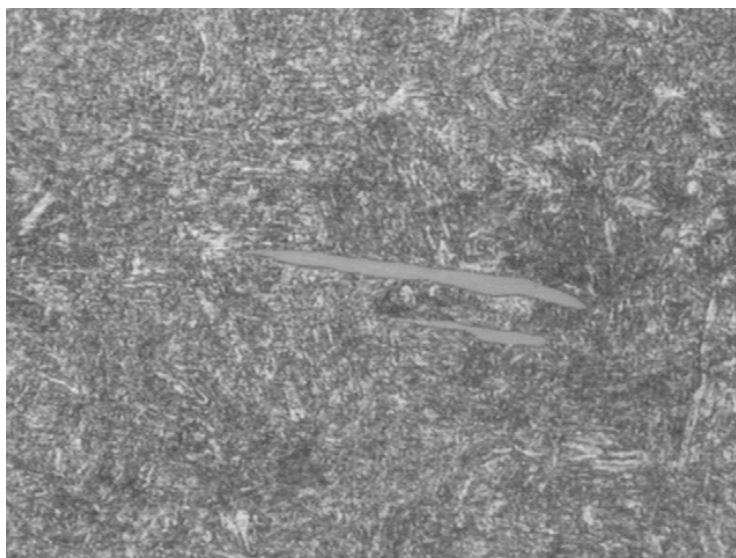


Figura 4.34 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 16 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 400°C na condição aberta em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.35 e 4.36. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.35) e constituída por martensita (Figura 4.36).



Figura 4.35 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 16. Aumento de 100x.

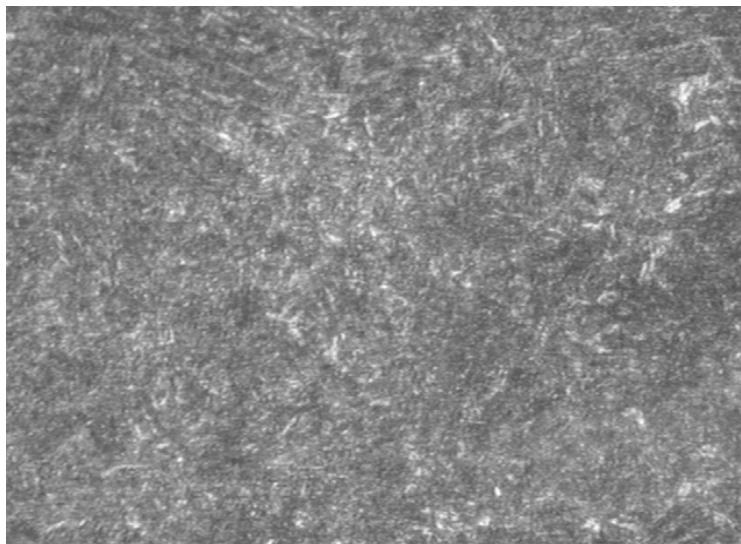


Figura 4.36 – Idem figura anterior. Presença de martensita (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 17 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 375°C na condição fechada em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.37 e 4.38. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.37) e constituída por martensita revenida (Figura 4.38).

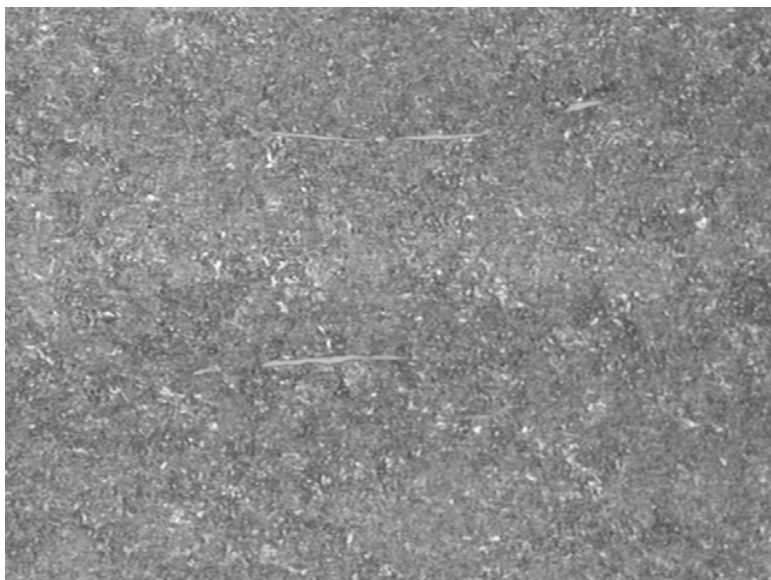


Figura 4.37 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 17. Aumento de 100x.

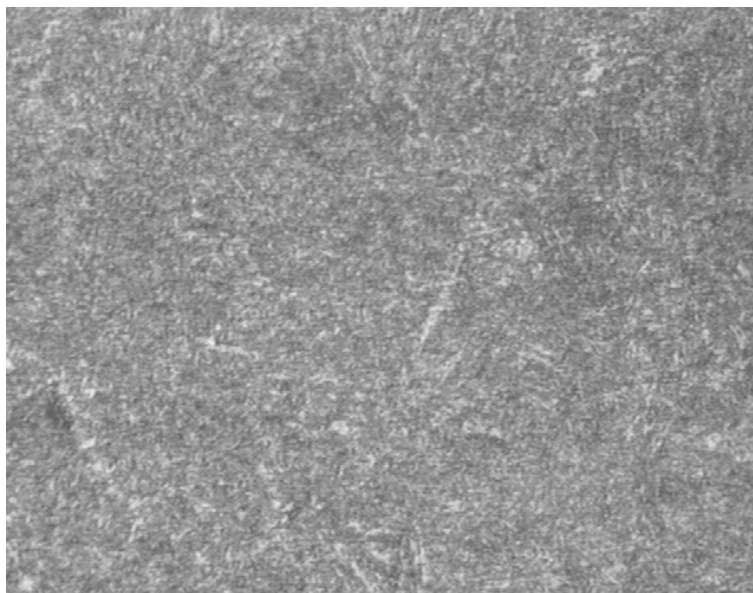


Figura 4.38 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 18 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 375°C na condição aberta em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.39 e 4.40. Observa-se que a microestrutura é martensítica com presença de segregação (Figura 4.39) e constituída por martensita revenida com traços de bainita (Figura 4.40).

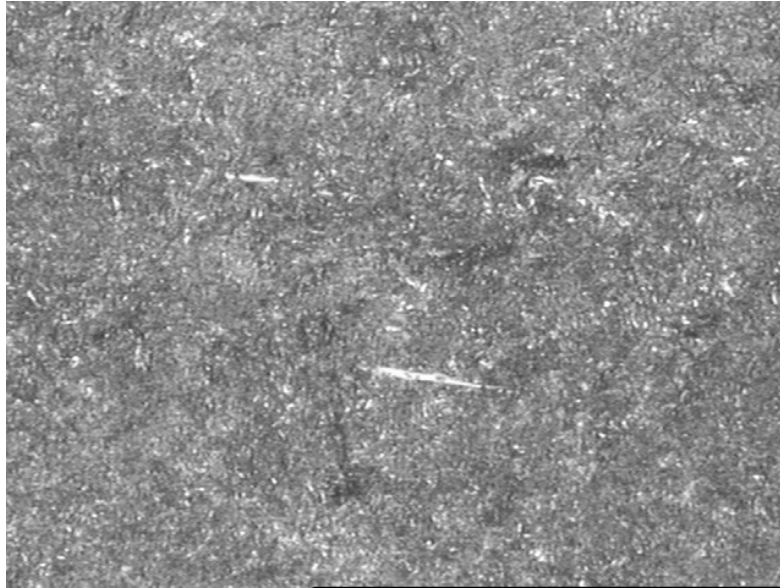


Figura 4.39 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 18. Aumento de 100x.

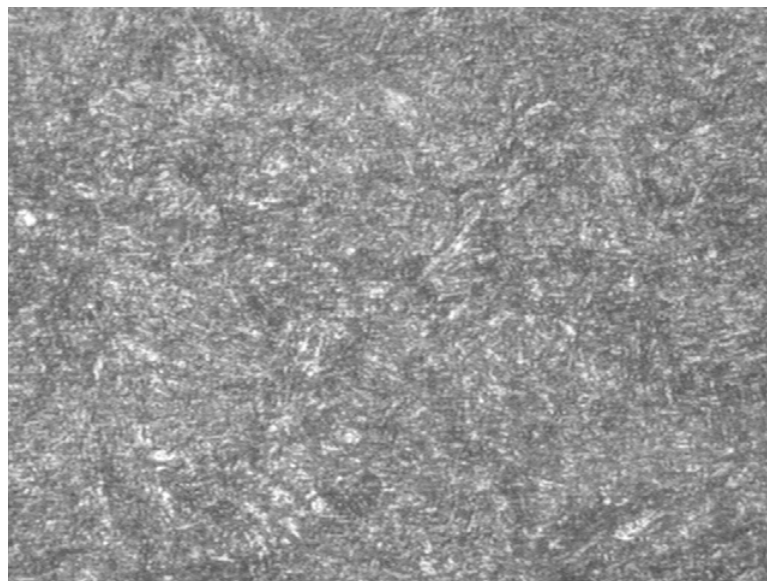


Figura 4.40 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 19 (têmpera 870°C, revenido 560°C durante 1 hora seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.41 e 4.42. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.41) e constituída por martensita revenida (Figura 4.42).

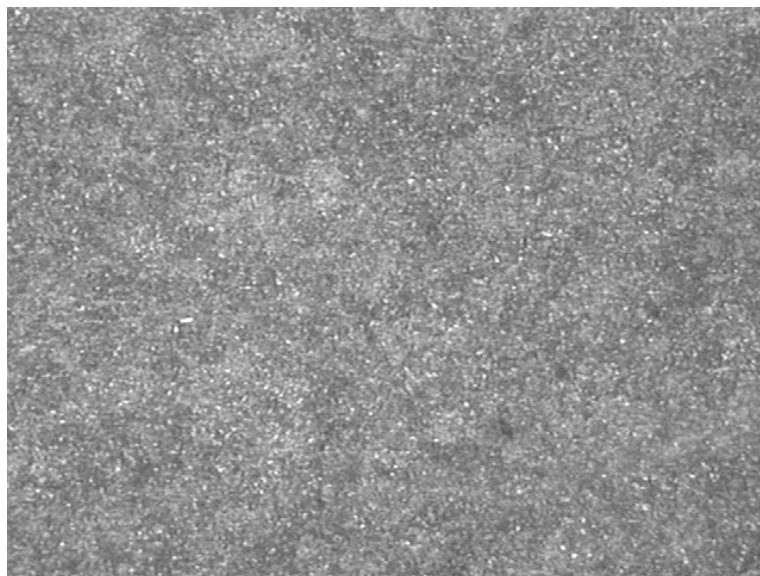


Figura 4.41 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 19. Aumento de 100x.

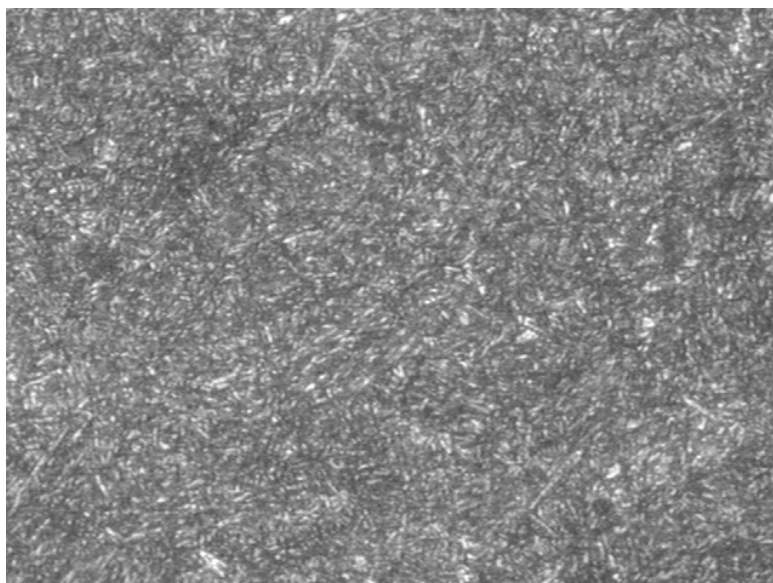


Figura 4.42 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 20 (têmpera 870°C, revenido 590°C durante 1 hora seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.43 e 4.44. Observa-se que a microestrutura é heterogênea (Figura 4.43) e constituída por martensita revenida e bainita (Figura 4.44).

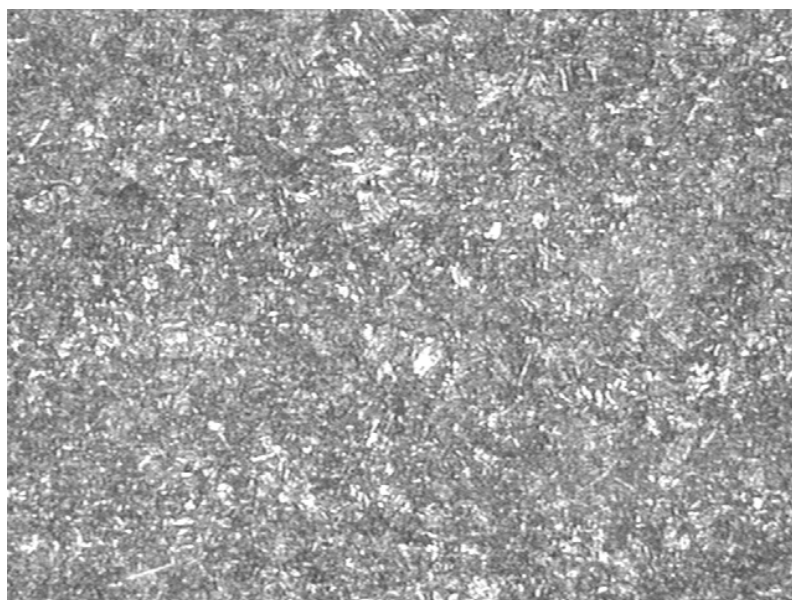


Figura 4.43– Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 20. Aumento de 100x.

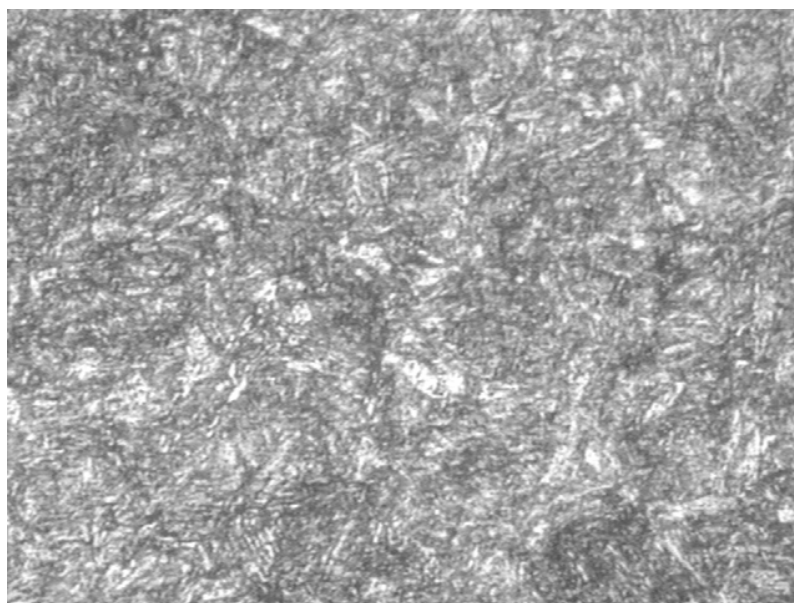


Figura 4.44 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 21 (têmpera 870°C, revenido 620°C durante 1 hora seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.45 e 4.46. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.45) e constituída por martensita revenida e bainita (Figura 4.46).

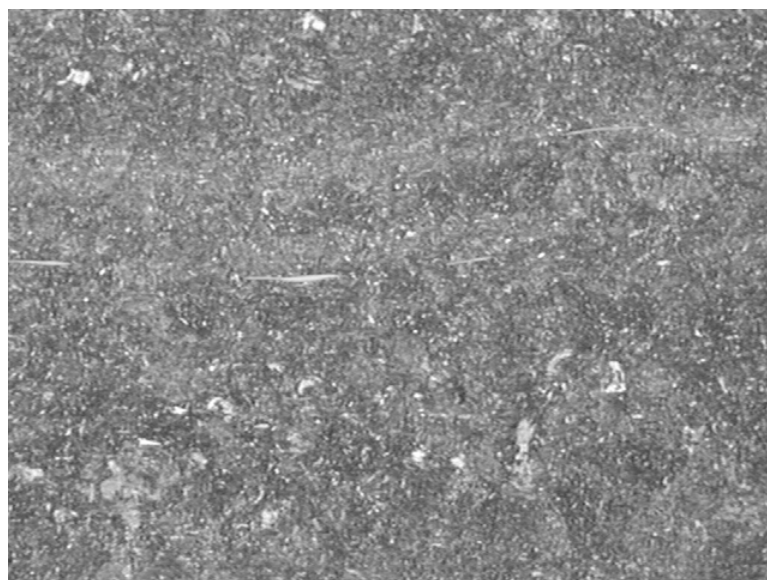


Figura 4.45 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 21. Aumento de 100x.

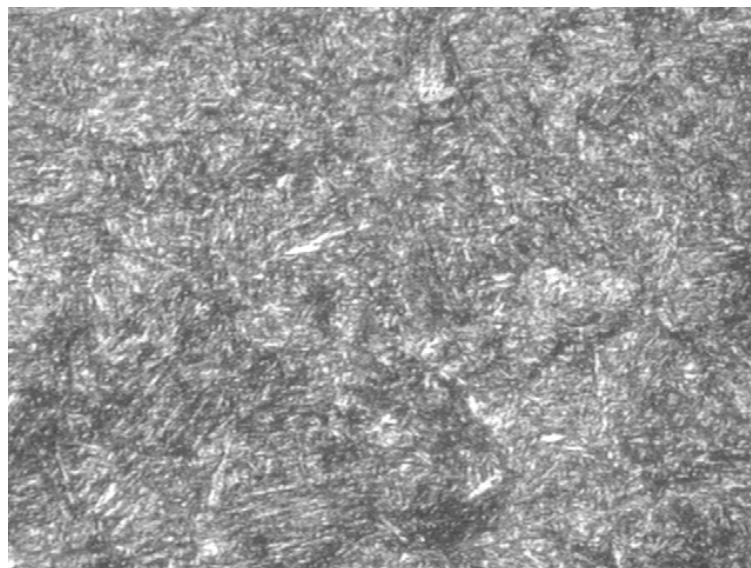


Figura 4.46 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 22 (têmpera 870°C, revenido 680°C durante 1 hora seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.47 e 4.48. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.47) e constituída por martensita revenida (Figura 4.48).

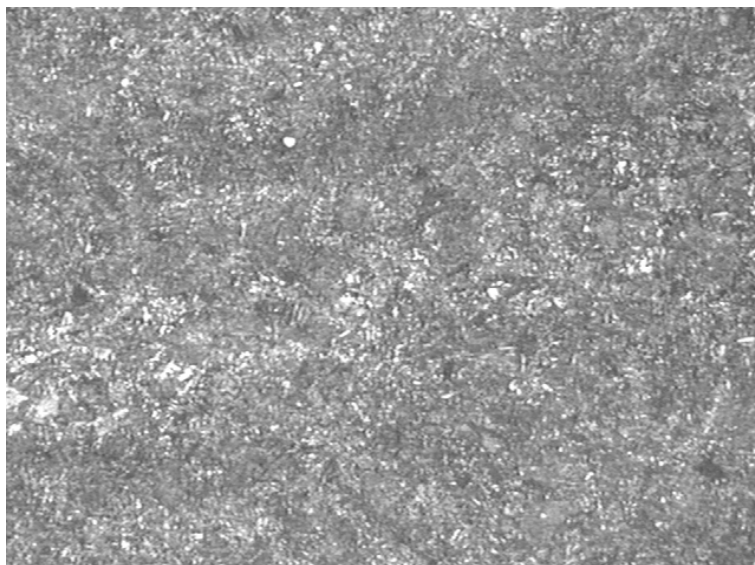


Figura 4.47 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 22. Aumento de 100x.

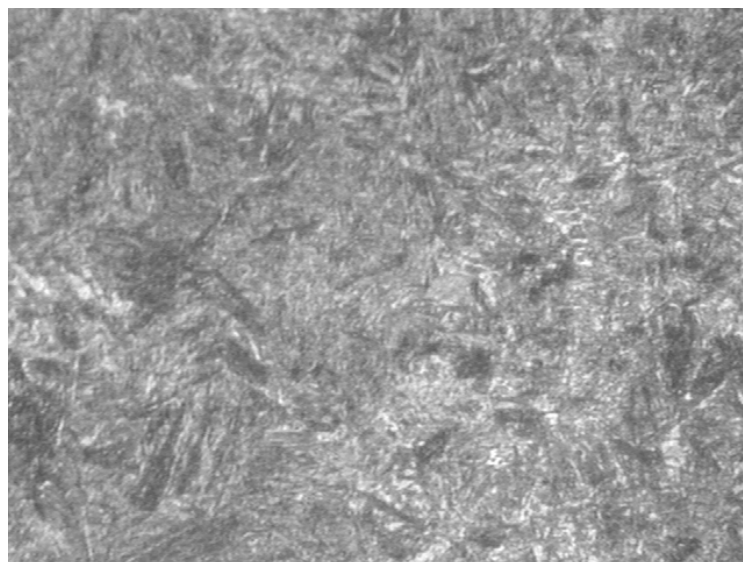


Figura 4.48 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 23 (têmpera 840°C, revenido 680°C seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.49 e 4.50. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.49) e constituída por martensita revenida e traços de bainita (Figura 4.50).

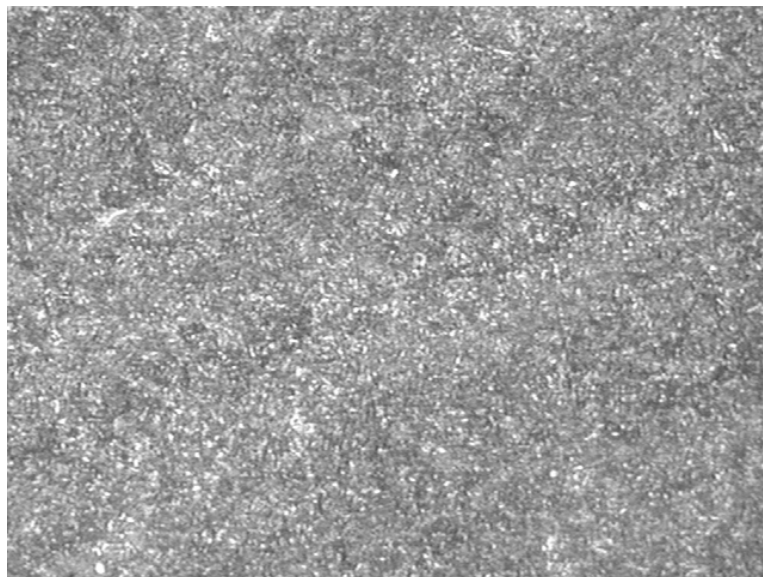


Figura 4.49 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 23. Aumento de 100x.

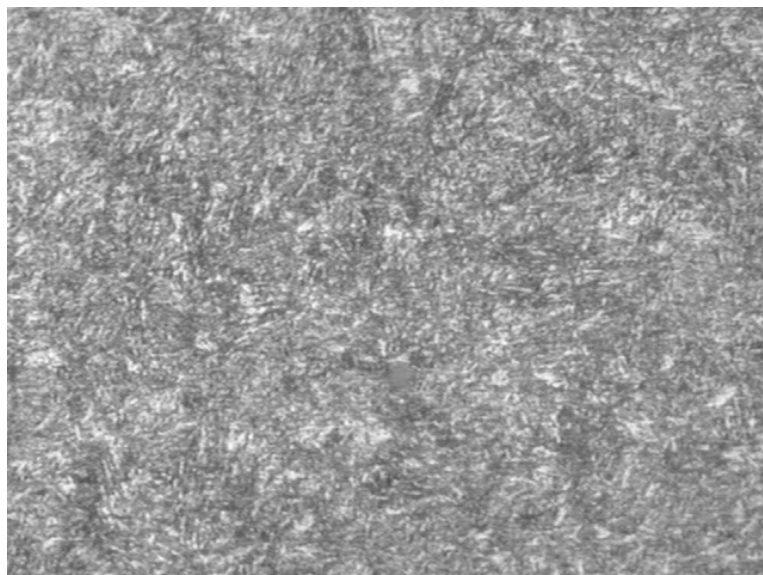


Figura 4.50 – Idem figura anterior. Presença de martensita revenida e traços de bainita (áreas mais claras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 24 (têmpera 900°C, revenido 680°C seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.51 e 4.52. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.51) e constituída por martensita (Figura 4.52).

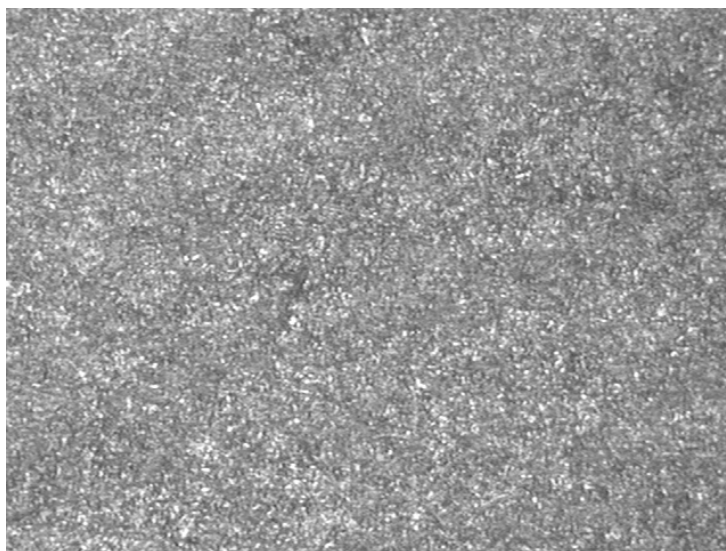


Figura 4.51 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 24. Aumento de 100x.

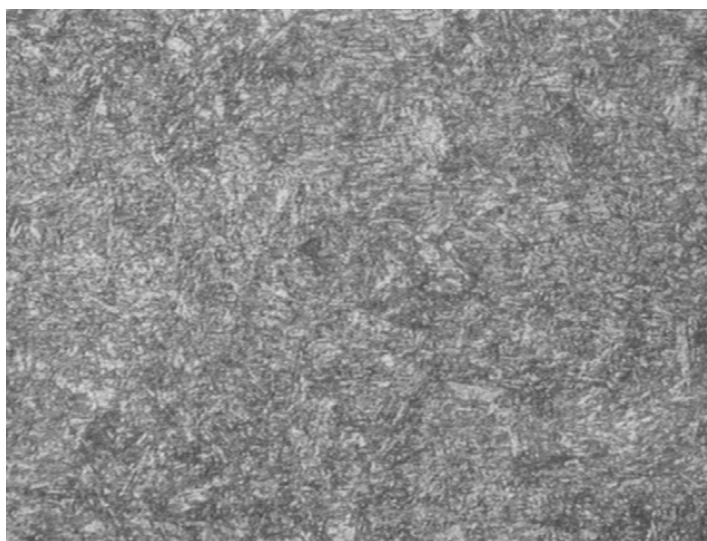


Figura 4.52 – Idem figura anterior. Presença de martensita (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

As microestruturas características do aço SAE 4140 na condição microestrutural 25 (têmpera 870°C, revenido 680°C seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.53 e 4.54. Observa-se que a microestrutura é de granulação fina (Figura 4.53) e constituída por regiões de martensita (Figura 4.54).

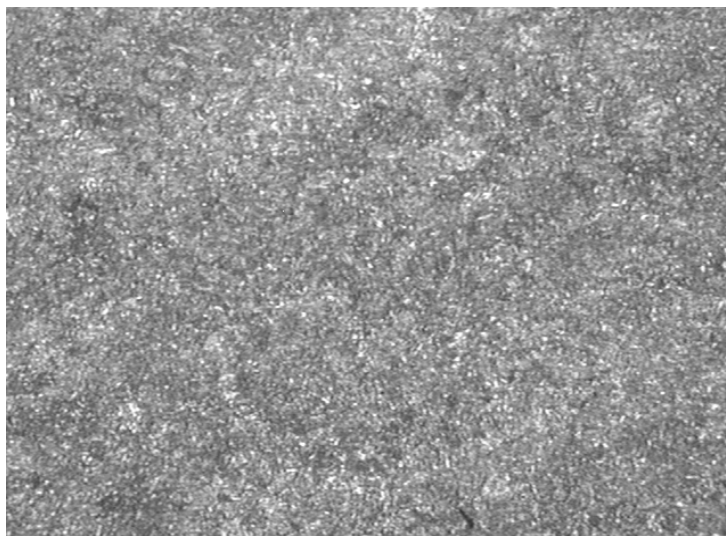


Figura 4.53 – Microestrutura característica do aço SAE 4140 após tratamentos térmicos de têmpera e revenido na condição 25. Aumento de 100x.

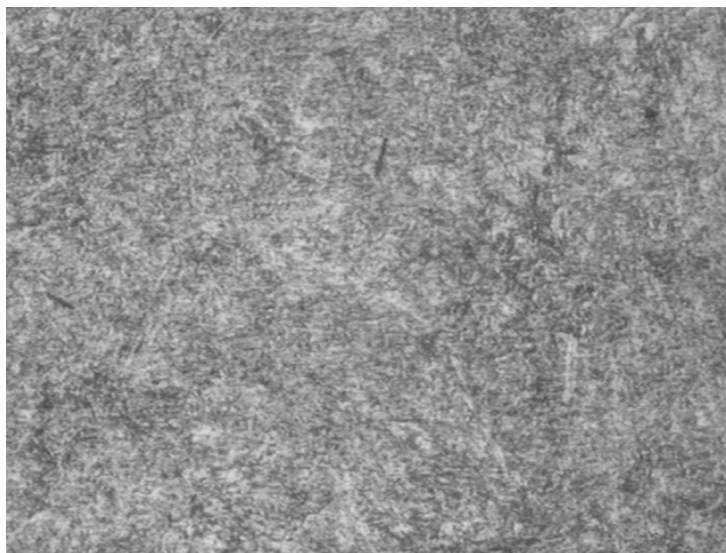


Figura 4.54 – Idem figura anterior. Presença de martensita (áreas mais escuras). Aumento de 500x.

4.4. Caracterização Fractográfica

A seguir são apresentadas as superfícies de fratura dos corpos de prova de algumas condições microestruturais. Todas as micrografias foram tiradas a uma distância de 0,5mm do entalhe.

As superfícies de fratura da condição microestrutural 8 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 575°C na condição aberta em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.55 e 4.56. Observa-se que a superfície de fratura é constituída por cavidades características de fratura dúctil (dimples) tanto nas Figuras 4.55 e 4.56.

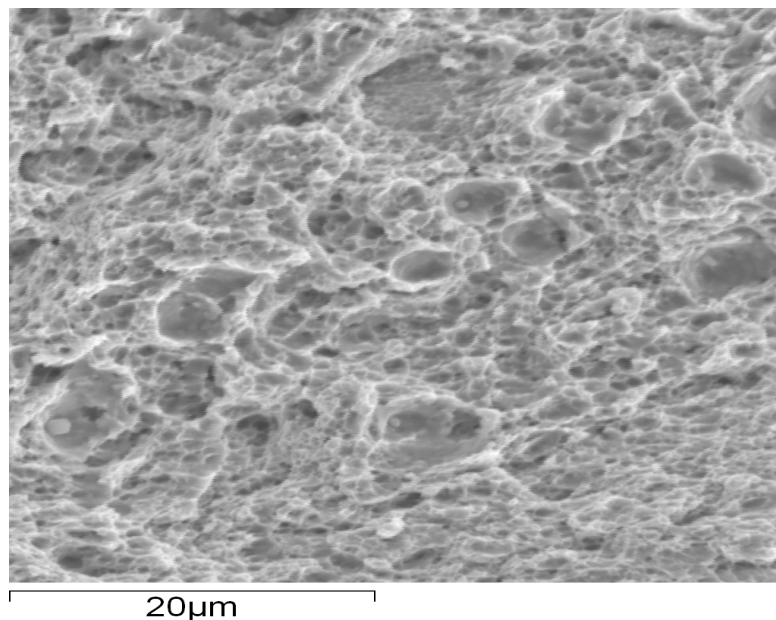


Figura 4.55 – Superfície de fratura da condição 8. Aumento de 2000x.

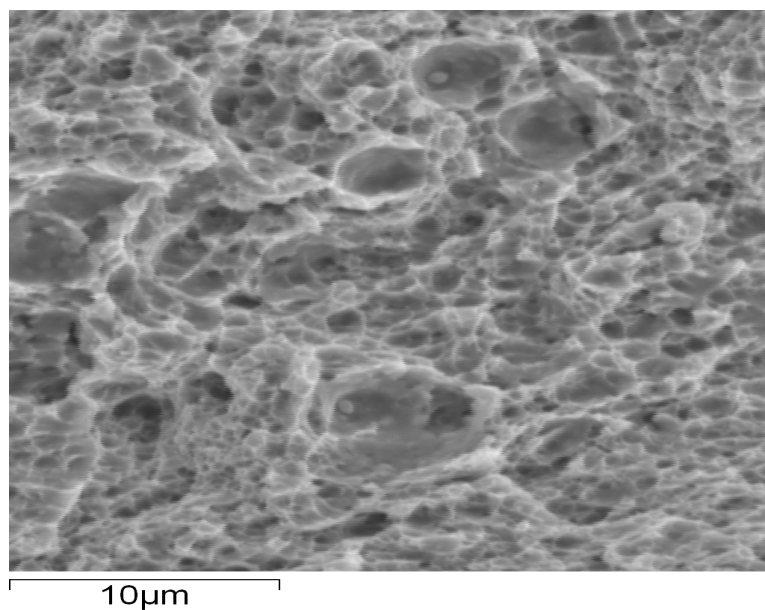


Figura 4.56 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.

As superfícies de fratura da condição microestrutural 16 (têmpera 870°C, revenido 650°C durante 1 hora seguido de resfriamento a 400°C na condição aberta em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.57 e 4.58. Observa-se que a superfície de fratura é constituída por regiões de clivagem e por partículas soltas (Figura 4.57) e apresenta trincas secundárias (Figura 4.58).

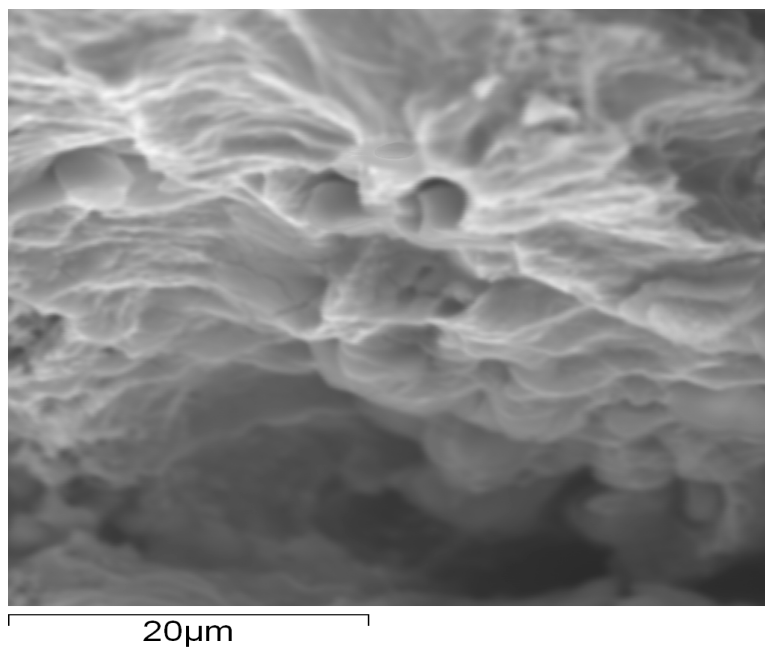


Figura 4.57 – Superfície de fratura da condição 16. Aumento de 2000x.

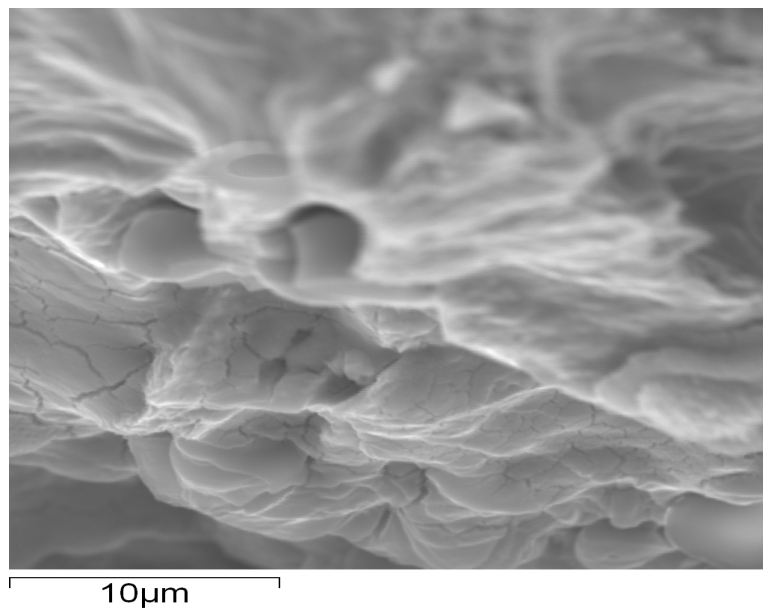


Figura 4.58 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.

As superfícies de fratura da condição microestrutural 19 (têmpera 870°C, revenido 560°C durante 1 hora seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.59 e 4.60. Observa-se que a superfície de fratura apresenta regiões de clivagem (Figuras 4.59 e 4.60).

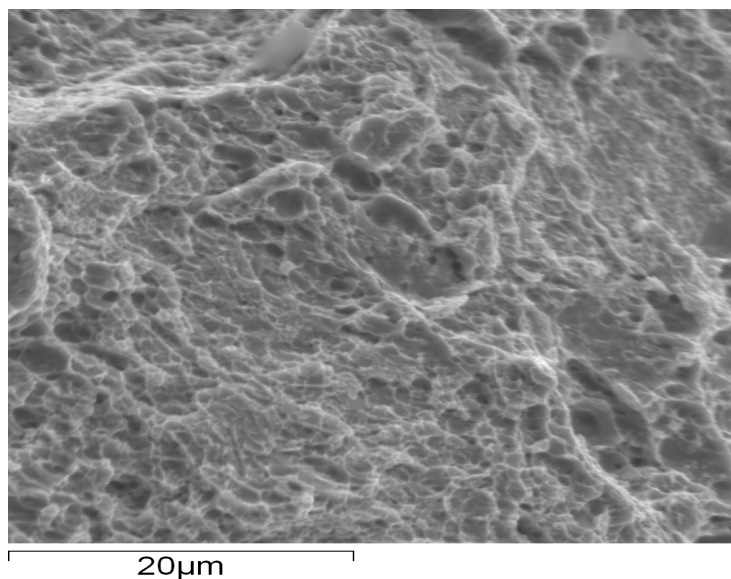


Figura 4.59 – Superfície de fratura da condição 19. Aumento de 2000x.

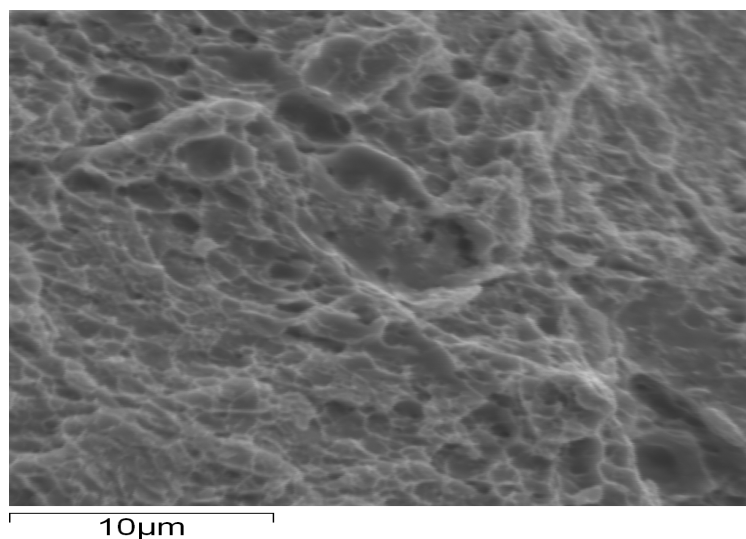


Figura 4.60 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.

As superfícies de fratura da condição microestrutural 20 (têmpera 870°C, revenido 590°C durante 1 hora seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.61 e 4.62. Observa-se que a superfície de fratura apresenta dimples com partículas dentro da matriz (Figuras 4.61 e 4.62).

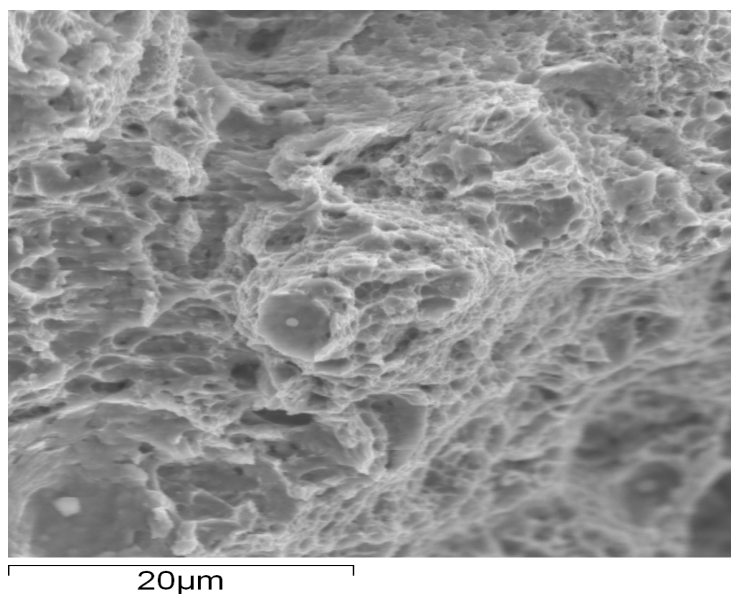


Figura 4.61 – Superfície de fratura da condição 20. Aumento de 2000x.

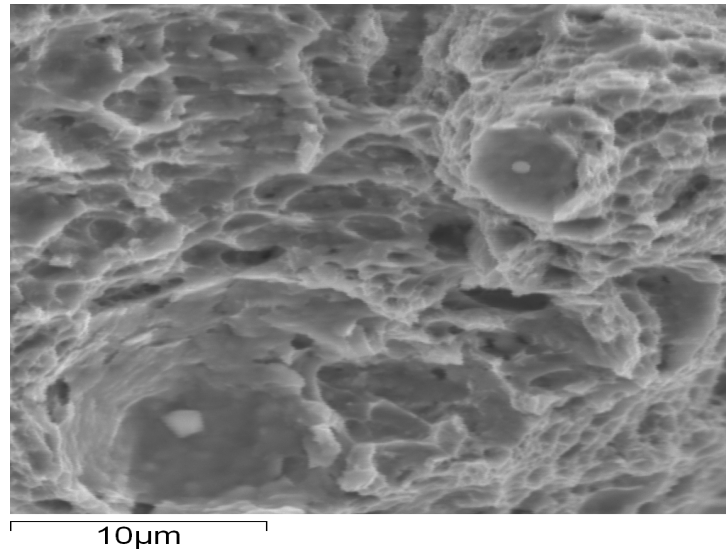


Figura 4.62 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.

As superfícies de fratura da condição microestrutural 21 (têmpera 870°C, revenido 620°C durante 1 hora seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.63 e 4.64. Observa-se que a superfície de fratura apresenta regiões de clivagem (Figuras 4.63 e 4.64).

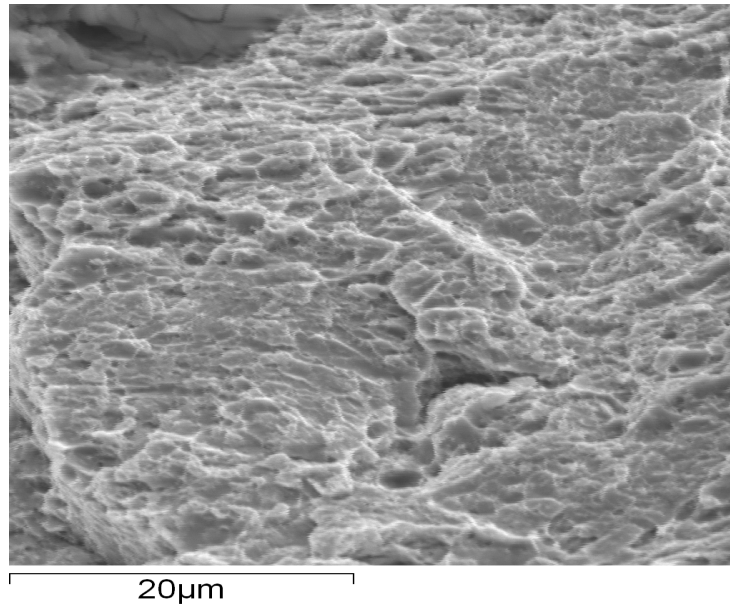


Figura 4.63 – Superfície de fratura da condição 21. Aumento de 2000x.

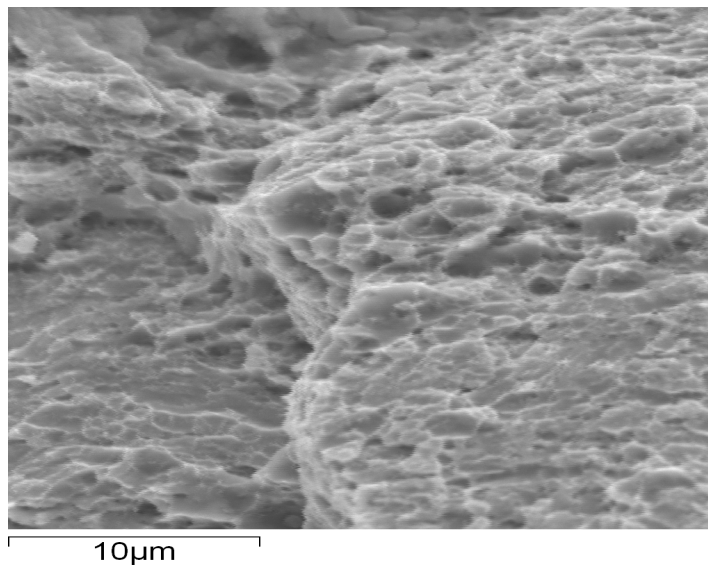


Figura 4.64 –Idem figura anterior. Aumento de 3000x.

As superfícies de fratura da condição microestrutural 22 (têmpera 870°C, revenido 680°C durante 1 hora seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.65 e 4.66. Observa-se que a superfície de fratura apresenta dimples profundos (Figuras 4.65 e 4.66).

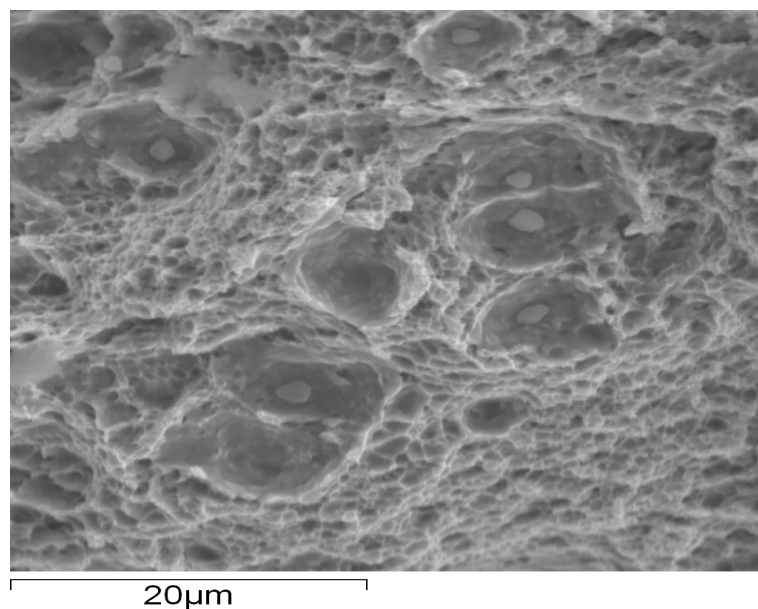


Figura 4.65 – Superfície de fratura da condição 22. Aumento de 2000x.

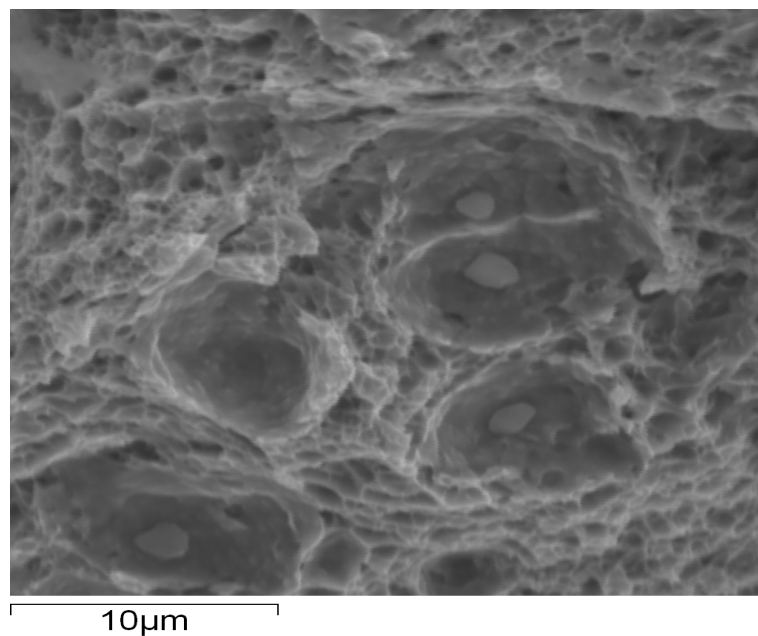


Figura 4.66 – Idem figura anterior. Aumento de 3000x.

As superfícies de fratura da condição microestrutural 23 (têmpera 840°C, revenido 680°C seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.67 e 4.68. Observa-se que a superfície de fratura apresenta partículas dentro da matriz (Figuras 4.67 e 4.68).

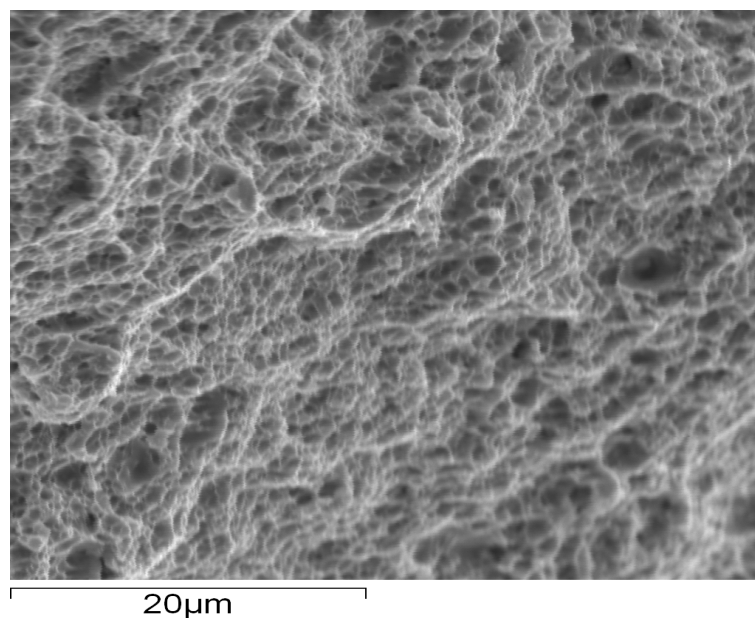


Figura 4.67 – Superfície de fratura da condição 23. Aumento de 2000x.

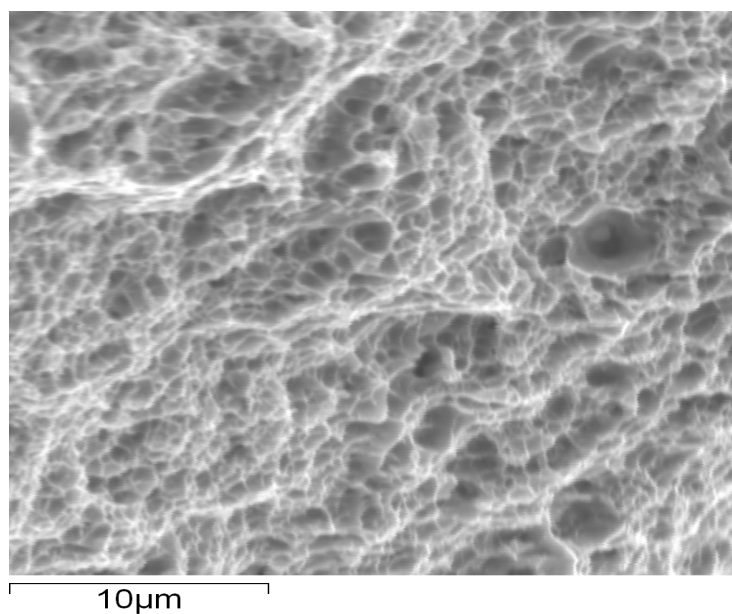


Figura 4.68 –Idem figura anterior. Aumento de 3000x.

As superfícies de fratura da condição microestrutural 24 (têmpera 900°C, revenido 680°C seguido de resfriamento imediato em óleo) estão mostradas nas Figuras 4.69 e 4.70. Observa-se que a superfície de fratura apresenta dimples bem profundos e partículas dentro da matriz (Figuras 4.69 e 4.70).

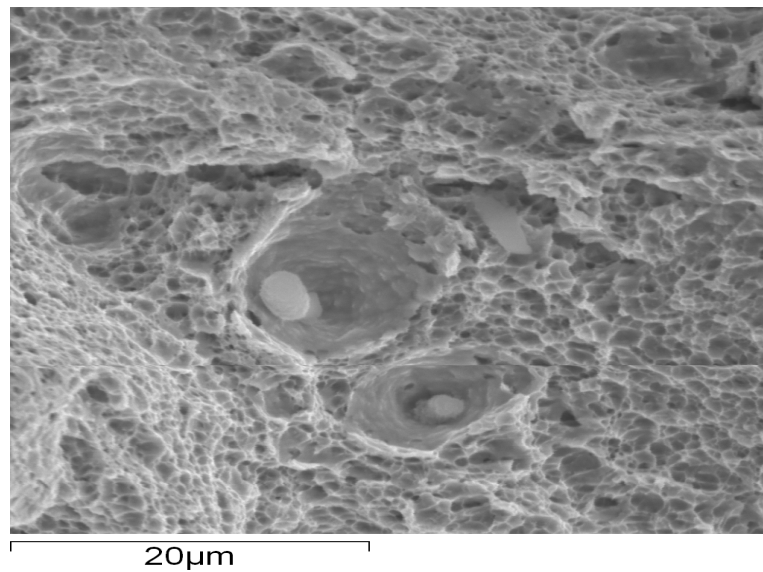


Figura 4.69 – Superfície de fratura da condição 24. Aumento de 2000x.

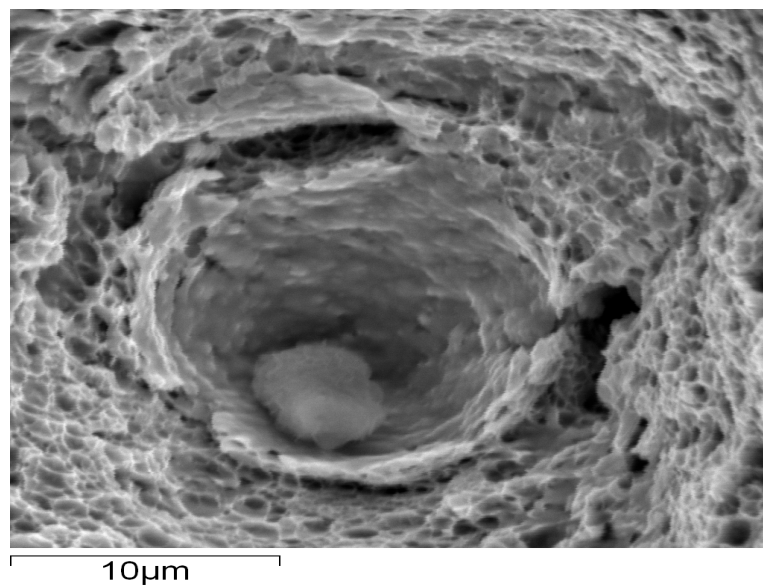


Figura 4.70 –Idem figura anterior. Aumento de 3000x.

4.5. Considerações Finais

Tendo em vista os resultados obtidos algumas observações devem ser consideradas. A microestrutura influencia a susceptibilidade a fragilização no revenido e resulta em aumento do grau de fragilização. Isto se deve ao fato de que as impurezas e elementos de liga são segregados no contorno de grão da austenita original [42,43]. Estas interações, entretanto, não são muito claras devido ao grande número de variáveis envolvidas.

A microestrutura da matriz torna-se importante porque ela controla propriedades mecânicas nos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) como a tenacidade tanto para aços fragilizados como não fragilizados. Há de ressaltar que a fragilização no revenido tem sido desenvolvida na maior parte dos casos para aços martensíticos, porém poucos resultados tem sido comparados para uma variedade de microestruturas em função da dureza. Em geral, a martensita revenida é mais susceptível do que a bainita revenida a fragilização no revenido, porém bainita revenida é mais susceptível do que microestruturas ferrítico-perlítico. Esta análise é algo que pode induzir ao erro, contudo, porque a martensita revenida não fragilizada é muito mais tenaz do que a bainita não fragilizada com mesma dureza, e após fragilização a martensita revenida continua mais tenaz que a bainita revenida. Isto também torna - se verdade ao comparar microestruturas bainíticas e ferrítico-perlítico.

Há de mencionar também que a fragilização no revenido difere da fragilização da martensita revenida na resistência do material e na faixa de temperatura de exposição. Na fragilização no revenido, o aço é geralmente revenido a altas temperaturas, produzindo baixa resistência e dureza e a fragilização ocorre a lentas taxas de resfriamento após revenido e durante serviço a temperaturas dentro da faixa de fragilização. Na fragilização da martensita revenida, o aço é revenido dentro da faixa de fragilização, e exposto em serviço geralmente a uma temperatura clássica. Portanto, a fragilização no revenido é geralmente denominada fragilização no revenido em duas etapas, enquanto a fragilização da martensita revenida é geralmente denominada fragilização no revenido em uma etapa.

Por causa disto os aços liga, como o SAE 4140 estudado neste trabalho, que são tratados termicamente para formar martensita e podem ser revenidos dentro da faixa de fragilização, este problema tem sido largamente referenciado como fragilização da martensita revenida. Enquanto outras microestruturas diferentes da martensita não são fragilizadas por revenido nesta região, é bem conhecido que bainita inferior é fragilizada quando revenida nesta região. Outras microestruturas, como bainita superior e ferrita/perlita, não são fragilizadas por revenido nesta região.

Enquanto a fragilização no revenido é desenvolvida pela mudança de temperatura de transição dúctil-frágil, muitos estudos de fragilização da martensita revenida têm se desenvolvidos somente pela mudança da energia de impacto a uma temperatura clássica. Em geral, quando os aços liga temperados são revenidos, a tenacidade a uma temperatura clássica aumenta com temperatura de revenido a cerca de 200°C. Contudo, com aumentos adicionais em temperatura de revenido, a tenacidade diminui. Então, com aumento de temperatura de revenido a cerca de 400°C a tenacidade aumenta novamente. Esta mudança em tenacidade com temperatura de revenido, não é aparente quando examinamos dados de dureza e resistência à tensão que geralmente diminuem com aumento de temperatura de revenido.