



COPPE/UFRJ

**ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DE AÇOS 2,25Cr-1Mo COM ESTRUTURA FERRITA-
PERLITA E FERRITA-BAINITA A PARTIR DA QUANTIFICAÇÃO DE CARBONETOS**

Gláucio Rigueira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadores: Luiz Henrique de Almeida
Heloísa Cunha Furtado

Rio de Janeiro
Julho de 2010

ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DE AÇOS 2,25Cr-1Mo COM ESTRUTURA FERRITA-
PERLITA E FERRITA-BAINITA A PARTIR DA QUANTIFICAÇÃO DE CARBONETOS

Gláucio Rigueira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. Luiz Henrique de Almeida, D.Sc.

Dra. Heloísa Cunha Furtado, D.Sc.

Prof. Dílson Silva dos Santos, D.Sc.

Prof. Luiz Paulo Mendonça Brandão, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2010

Rigueira, Gláucio

Estudo do envelhecimento de aços 2,25Cr-1Mo com estrutura ferrita-perlita e ferrita-bainita a partir da quantificação de carbonetos/ Gláucio Rigueira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

X, 209p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Henrique de Almeida

Heloisa Cunha Furtado

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 116-122

1. Evolução de carbonetos. 2. Aços Cr-Mo para altas temperaturas. 3. Bainita. I. Almeida, Luiz Henrique de, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título

*Ao Enzo, meu filho, que redefiniu pra mim a palavra amor.
Espero que tudo isso sirva de estímulo contínuo para você!*

*À Márcia, minha mulher, por todo o apoio e por ter
ficado sobrecarregada durante a realização deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me permitiu estar cercado das pessoas listadas abaixo. Esclareço que, à exceção da minha família, que está sempre em primeiro lugar, elas **não aparecem** em ordem de importância.

A minha mãe, Célia, que investiu todo o tempo disponível e todo o dinheiro, nem sempre disponível, na minha educação. Espero, um dia, corresponder a tanto esforço. A meu pai, Gilson, meu único e verdadeiro herói, ontem, hoje e amanhã. A meu irmão, Rafael, cuja torcida velada, bem a seu estilo, sempre foi percebida. Amo vocês!

A todo o restante da minha enorme família, simplesmente por existirem, por serem maravilhosamente parciais, por torcerem e se orgulharem tão descaradamente. O que acontecer de bom a todos vocês será pouco!

Ao CEPEL, por ter me dado a oportunidade e o respaldo para investir neste trabalho, atitude bastante coerente com a empresa de ponta que é.

A Heloísa Cunha Furtado, pela amizade fraternal a qualquer prova, estímulo contínuo e pela orientação deste trabalho, carregada de um conhecimento que ainda almejo possuir.

A Luiz Henrique de Almeida, pela orientação, pelo incentivo bastante peculiar e pelas inserções precisas no andamento deste trabalho.

A Eduardo Torres Serra, por ter confiado em minha capacidade e, por isso, ter me dado a certeza de que era capaz de realizar este estudo.

A Ary Vaz Pinto Júnior, que além da postura sempre justa e coerente, investiu dia-a-dia neste trabalho.

A Roberta Martins Santana, por ter ajudado tanto na parte prática da tese. Sem a sua competência, sua dedicação, educação natural e organização, este trabalho simplesmente não existiria.

A Maurício Barreto Lisboa, amigo que me deu a honra de batizar seu filho caçula e que, com sua capacidade argumentativa afiada, me desafiou constantemente e me preparou com folga para este estudo.

A Leonardo dos Santos Reis Vieira, amigo e companheiro de sala que, além de exemplo, foi quem sugeriu a divisão deste trabalho em corpo da tese e anexos, além de ter dado preciosas dicas de Excel.

A minha amiga Fernanda Figueiredo Martins dos Santos, por ter tornado menos árido o período das cadeiras do mestrado e mais divertidas as muitas horas de estudo.

A Igor e Fausto pelo apoio na parte de tratamento de imagens e de contagens, essenciais a este trabalho.

Aos demais amigos do grupo de metalurgia do CEPEL, Michel, Josélio, Bruno, Wagner e Tiago. Todos vocês, de uma forma ou de outra, contribuíram para tudo isso.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DE AÇOS 2,25Cr-1Mo COM ESTRUTURA FERRITA-
PERLITA E FERRITA-BAINITA A PARTIR DA QUANTIFICAÇÃO DE CARBONETOS

GLÁUCIO RIGUEIRA

Julho/2010

Orientadores: Prof. Luiz Henrique de Almeida, D.Sc.
Heloísa Cunha Furtado, D.Sc.

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Os aços 2,25Cr-1Mo são largamente utilizados no parque de geração termelétrica no Brasil, estando em boa parte das caldeiras atualmente em operação, e podem apresentar microestrutura composta de ferrita-perlita ou ferrita-bainita. Submetido à fluência, esse material tem suas propriedades degradadas em serviço através de modificações microestruturais típicas. Dessa forma, é importante conhecer e quantificar essas modificações para fornecer suporte às técnicas de previsão de vida residual de componentes fabricados com esse tipo de material. A degradação do material ferrítico-perlítico é bastante conhecida, mas a literatura ainda não apresenta resultados consistentes quanto à do ferrítico-bainítico. O objetivo deste trabalho é fazer um estudo quantitativo da evolução microestrutural do aço 2,25Cr-1Mo com as duas microestruturas características em temperaturas entre 550 e 600°C até 2.000 h. Através de obtenção de réplicas de extração para microscopia de transmissão, cada precipitado foi identificado individualmente e a fração volumétrica relativa de cada um foi calculada, caracterizando, dessa forma, a evolução microestrutural para essas condições. As propriedades mecânicas foram analisadas através de medições de dureza. Os resultados mostraram que a microestrutura do aço ferrítico-bainítico é mais estável que o ferrítico-perlítico ao longo do envelhecimento embora, para ambos, o indicativo mais seguro da evolução microestrutural seja a formação e o coalescimento dos precipitados M_7C_3 e $M_{23}C_6$.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

AGING EVALUATION OF FERRITIC-PEARLITIC AND FERRITIC-BAINITIC 2.25Cr-1Mo
STEELS BY CARBIDES QUANTIFICATION

GLÁUCIO RIGUEIRA

July/2010

Advisors: Prof. Luiz Henrique de Almeida, D.Sc.
Heloísa Cunha Furtado, D.Sc.

Department: Metallurgical and Materials Engineering

2.25Cr-1Mo steels are widely used in the thermoelectric generation park in Brazil, being present in most of boilers in operation, presenting either ferrite-pearlite or ferrite-bainite microstructures. Under creep conditions, this material has its properties degraded in service through typical microstructural changes. Thus, it is important to understand and quantify these changes to provide technical support to the life assessment of components made of such material. The degradation of ferritic-pearlitic material is well known, but the literature still does not mention ferritic-bainitic. The objective of this work is to make a quantitative study of microstructural evolution of steel 2.25Cr-1Mo with both microstructures at temperatures between 550 and 600°C by 2,000 h. By obtaining extraction replicas for transmission electron microscopy, each precipitate was individually identified and its relative volume fraction was calculated, characterizing, therefore, the microstructural evolution for these conditions. The mechanical properties were evaluated by hardness measurements. The results showed that the ferritic-bainitic microstructure is more stable than the ferritic-pearlitic over aging although, for both, the most important indicator of microstructural evolution is the formation and coarsening of $M_{23}C_6$ and M_7C_3 carbides.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Aços 2,25Cr-1Mo	5
3.2 Efeito dos elementos de liga nos aços Cr-Mo	6
3.3 Desempenho dos aços Cr-Mo em serviço.....	11
3.4 Fluência em aços Cr-Mo	14
3.5 Evolução de carbonetos	17
3.6 Relação entre a dureza e a resistência à fluência	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 Material como recebido.....	26
4.2 Composição química	26
4.3 Metalografia.....	27
4.4 Ensaio de dureza.....	27
4.5 Tratamentos térmicos de envelhecimento.....	27
4.6 Microscopia eletrônica de transmissão	27
4.7 Etapas do estudo	30
4.8 Limitações do método	30
5. RESULTADOS.....	32
5.1 Espectros característicos	32
5.2 Material como recebido.....	34
5.2.1 Ferrita-perlita	34
5.2.2 Ferrita-bainita	39
5.3 Material envelhecido a 550°C.....	43
5.3.1 Ferrita-perlita 100 horas	43
5.3.2 Ferrita-perlita 500 horas	46
5.3.3 Ferrita-perlita 1.000 horas	49
5.3.4 Ferrita-perlita 2.000 horas	50
5.3.5 Ferrita-bainita 100 horas	52
5.3.6 Ferrita-bainita 500 horas	54
5.3.7 Ferrita-bainita 1.000 horas	57
5.3.8 Ferrita-bainita 2.000 horas	59
5.4 Material envelhecido a 575°C.....	61
5.4.1 Ferrita-perlita – 100 horas	61
5.4.2 Ferrita-perlita – 500 horas	63
5.4.3 Ferrita-perlita – 1.000 horas	66

5.4.4 Ferrita-perlita – 2.000 horas	68
5.4.5 Ferrita-bainita – 100 horas	70
5.4.6 Ferrita-bainita – 500 horas	72
5.4.7 Ferrita-bainita – 1.000 horas	74
5.4.8 Ferrita-bainita – 2.000 horas	76
5.5 Material envelhecido a 600°C.....	78
5.5.1 Ferrita-perlita – 100 horas	78
5.5.2 Ferrita-perlita – 500 horas	80
5.5.3 Ferrita-perlita – 1.000 horas	82
5.5.4 Ferrita-perlita – 2.000 horas	84
5.5.5 Ferrita-bainita – 100 horas	87
5.5.6 Ferrita-bainita – 500 horas	89
5.5.7 Ferrita-bainita – 1.000 horas	91
5.5.8 Ferrita-bainita – 2.000 horas	93
6. DISCUSSÃO	95
6.1 Evolução da dureza com o envelhecimento.....	95
6.2 Microscopia ótica.....	98
6.3 Microscopia eletrônica de transmissão	102
6.2 Evolução da precipitação com o envelhecimento.....	105
6.5 Análise da precipitação.....	112
7. CONCLUSÕES	114
8. REFERÊNCIAS	116
Anexo I	120
Anexo II	120
Anexo III	120

1. INTRODUÇÃO

Os aços Cr-Mo são largamente utilizados em aplicações que envolvem exposição à fluência, notadamente nas indústrias petroquímica e de geração de energia elétrica, na forma de vasos de pressão, tubulações de caldeiras e partes estruturais.

São materiais com boa resistência à corrosão e à fluência, além de apresentarem alta tenacidade e boa soldabilidade, com excelente relação custo/benefício. Simultaneamente, apresentam baixa expansão térmica e alta condutividade térmica. Estes fatores, em conjunto, os tornam materiais bastante atrativos para operar sob condições de altas temperaturas e baixas tensões.

O desenvolvimento contínuo dos dados sobre fluência e microestrutura dá respaldo a investigações de análises de falha e a estimativa de vida residual de componentes operando pressurizados e sob altas temperaturas. Embora a estimativa de vida residual de componentes envelhecidos, e ainda operando em plantas térmicas e processos industriais em geral, tenha atraído muita atenção, uma tecnologia de avaliação de integridade efetiva em termos de custo e de competitividade ainda há de ser desenvolvida [1].

O aço 2,25Cr-1Mo, objeto deste trabalho, pode se apresentar com dois tipos de microestruturas: ferrítico-bainítica ou ferrítico-perlítica. A ferrita-bainita resulta de um tratamento térmico de normalização e revenimento, enquanto a estrutura composta por ferrita e perlita decorre de recozimento realizado após a normalização e o revenimento. Esta seqüência de tratamentos foi realizada unicamente para este estudo, não correspondendo à adotada em linhas de produção. Neste caso, o recozimento é feito apenas após a conformação mecânica.

A literatura relativa a esse material mostra critérios de avaliação de degradação microestrutural estabelecidos e consagrados no que se refere à microestrutura ferrítico-perlítica, não existindo, entretanto, critério definido quanto à ferrita-bainita. No que diz respeito à degradação microestrutural, observa-se que o aço com estrutura composta por ferrita e perlita passa por fases muito bem definidas de progressiva esferoidização do Fe_3C , além da correspondente queda nos valores de dureza, facilitando sua classificação [3]. Ao contrário, o material com estrutura ferrítico-bainítica não apresenta alterações microestruturais resolvíveis por microscopia ótica,

mantendo seus valores de dureza no mesmo patamar de um material novo, o que impossibilita sua avaliação utilizando-se as técnicas tradicionais.

Uma vez que a difusão é um fenômeno termicamente ativado, o material envelhecido em forno apresenta alterações na precipitação ao longo do tempo de exposição à temperatura. Dessa forma, buscam-se, neste trabalho, variações estruturais em nível nanométrico utilizando-se microscopia eletrônica de transmissão para avaliar a degradação da estrutura composta por ferrita e bainita.

Neste trabalho, os resultados das análises por microscopia eletrônica de transmissão permitiram correlacionar o grau de degradação das microestruturas à exposição a temperaturas elevadas. Foram constatadas alterações na distribuição, na forma e na estequiometria dos carbonetos presentes ao longo do envelhecimento e, paralelamente, foram comparadas as microestruturas do material ferrítico-bainítico com o composto por ferrita e perlita de forma a se correlacionar as metalografias dos dois tipos de estrutura.

A microestrutura do aço ferrítico-bainítico é mais estável que o ferrítico-perlítico ao longo do envelhecimento. Entretanto, foi observada degradação da bainita com observação por microscopia ótica. Verificou-se que as duas microestruturas, quando degradadas, podem ser bastante similares, impossibilitando a identificação a não ser que haja conhecimento prévio das fases presentes no material novo. Apesar dessa limitação, a utilização de microscopia de transmissão é capaz de solucionar esse problema através da identificação das morfologias e estequiometrias, via análise por dispersão de energia de raios X, dos carbonetos presentes.

Para as duas microestruturas, o indicativo mais seguro da evolução microestrutural é a formação e o coalescimento dos precipitados M_3C_3 e $M_{23}C_6$ nos contornos de grão.

2. OBJETIVO

Chaudhuri [2] diz que “o desenvolvimento contínuo dos dados sobre fluência e microestrutura dá respaldo a investigações de análises de falha e a estimativa de vida residual” de componentes operando pressurizados e sob altas temperaturas.

Segundo o mesmo autor, embora a estimativa de vida residual de componentes envelhecidos, e ainda operando em plantas térmicas e processos industriais em geral, tenha atraído muita atenção, uma tecnologia de avaliação de integridade efetiva em termos de custo e de competitividade ainda há de ser desenvolvida.

Neste estudo, busca-se avaliar a degradação de aços 2,25Cr-1Mo de microestrutura bainítica operando em altas temperaturas e estabelecer um método de diferenciação entre essa estrutura e a perlítica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os aços usados em caldeiras, nos componentes operando sob fluência, são geralmente aços baixa liga com microestrutura formada por ferrita e perlita, ferrita e bainita ou martensita revenida. Devido à longa exposição a temperaturas elevadas, as microestruturas se degradam através da evolução e do coalescimento de carbonetos na bainita acicular ou na martensita revenida ou através da esferoidização das lamelas de perlita, formando carbonetos esferoidizados.

A extensão das mudanças microestruturais representa, nesse caso, perda de resistência mecânica no material. Como existe uma aceleração no grau de degradação com a deformação, que depende da tensão, da temperatura e do tempo, a extensão da deterioração microestrutural pode ser usada como uma medida de dano.

Um dos critérios mais usados é o desenvolvido por Toft e Marsden [3], que estudaram tubos de caldeiras 1Cr-0,5Mo retirados de serviço que possuíam microestrutura composta por ferrita e perlita com diferentes tempos de exposição à temperatura. As amostras foram submetidas a ensaios de fluência, para determinar a vida remanescente e foi observada uma relação entre o grau de esferoidização de carbonetos e a tensão de ruptura. Na prática, isto significa identificar o tipo de microestrutura observada num componente e estimar a extensão do dano e a vida residual. A Figura 1 mostra o critério estabelecido por Toft e Marsden [3] para aços de estrutura composta por ferrita e perlita operando sob fluência.

As propriedades mecânicas das ligas utilizadas em plantas térmicas têm grande importância, uma vez que os componentes das usinas de geração de energia elétrica possuem vida operacional limitada em virtude da exposição a altas temperaturas, tensões e ambientes agressivos. A extensão de vida além da prevista em projeto tem, portanto, grande impacto econômico [4].

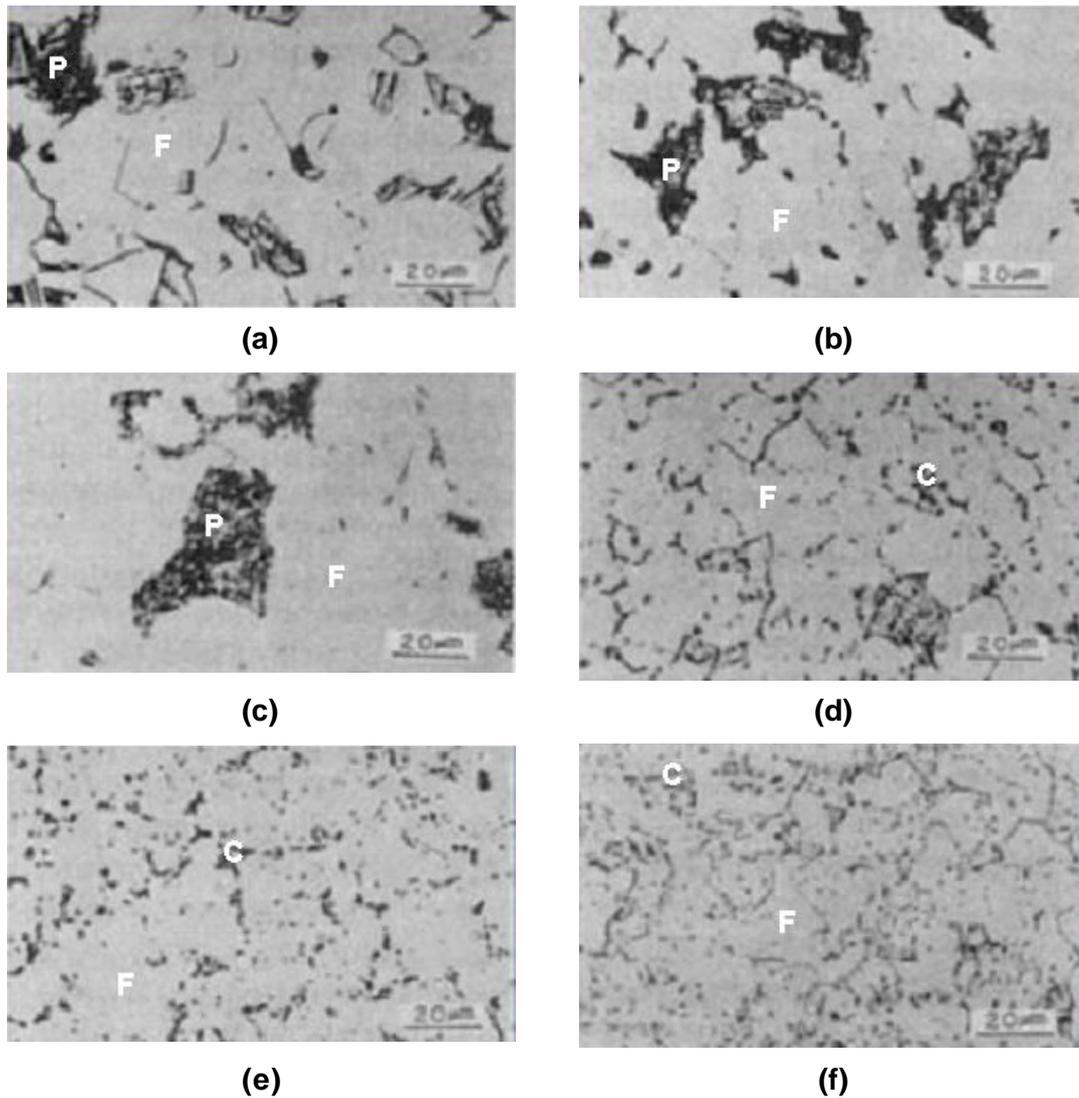


Figura 1 – Critério desenvolvido por Toft e Marsden [extraído e adaptado de 3] para aços de estrutura ferrita-perlita. Pode-se notar a progressiva esferoidização da cementita, inicialmente lamelar (a), até um estágio completamente degradado (f), em função da exposição a altas temperaturas ao longo do tempo. F – ferrita; P – perlita; C – carbonetos.

3.1 Aços 2,25Cr-1Mo

O aço 2,25Cr-1Mo é o mais encontrado em unidades que operam em altas temperaturas, sendo, por esta razão, aquele mais encontrado na literatura.

O aço 2,25Cr-1Mo pode ter estrutura parcialmente bainítica, quando normalizado a 920°C, ou completamente bainítica, quando normalizado a 990°C e revenido a 730°C [5, 6].

Segundo Bhadeshia [7], os principais tipos de aços resistentes à fluência são o 2,25Cr-1Mo, o 1CrMoV e o 0,25CrMoV, sendo o primeiro o mais resistente entre os três.

Este tipo de material é um dos aços resistentes à fluência mais utilizados para aplicações como plantas químicas, nucleares, usinas termelétricas, além da indústria do petróleo [8], sendo que é a resistência à ruptura por fluência que determina a tensão em que o material pode operar. Conseqüentemente, na evolução do comportamento em fluência de aços Cr-Mo, a estimativa de resistência à ruptura após longos períodos de operação é extremamente importante [6].

Na análise de falha de tubos de superaquecedor final, Chaudhuri [6] verificou que as microestruturas do material novo e do que operou sem falha são semelhantes, consistindo de ferrita e bainita. A região falhada, entretanto, apresentava bainita acicular recentemente formada, ou seja, foi verificado que a área da ruptura possuía maior percentual de bainita do que o existente originalmente no material, levando ao aumento localizado de dureza e do limite de resistência à tração, mostrando que, quanto maior a fração volumétrica de bainita, maior será a resistência mecânica do material.

O estudo de Lisboa [9] ratifica o observado por Chaudhuri [6] no que diz respeito à degradação microestrutural da bainita. Lisboa [9] observou que a busca por uma metodologia baseada em microscopia ótica que estabelecesse patamares claros de degradação microestrutural em função da exposição a altas temperaturas das ligas bainíticas usadas em seu trabalho foi inócua. Uma das conclusões de seu trabalho diz que as alterações foram extremamente discretas, restritas ao ligeiro coalescimento em escala nanométrica e à evolução de carbonetos de Cr menos estáveis.

3.2 Efeito dos elementos de liga nos aços Cr-Mo

O carbono é o elemento que mostra o maior potencial para o aumento da resistência à fluência. Como a formação de carbonetos está envolvida com todas as propriedades mecânicas em altas temperaturas, o carbono tem um efeito importante na resistência à fluência decorrente do endurecimento por solução sólida e endurecimento por precipitação. Aumentando o teor de carbono de 0,15 para 0,20%, melhoram as propriedades em fluência sem qualquer efeito significativo na

soldabilidade. A Figura 2 mostra a resistência à ruptura por fluência em função do teor de carbono para um aço 2,25Cr-1Mo. Observa-se que, aumentando a temperatura, o efeito endurecedor do carbono diminui. Essa dependência pode estar relacionada à aceleração do crescimento de carbonetos, à sua evolução, decorrente do próprio aumento da temperatura, e ao empobrecimento da matriz, que perde elementos de liga que alimentam este crescimento.

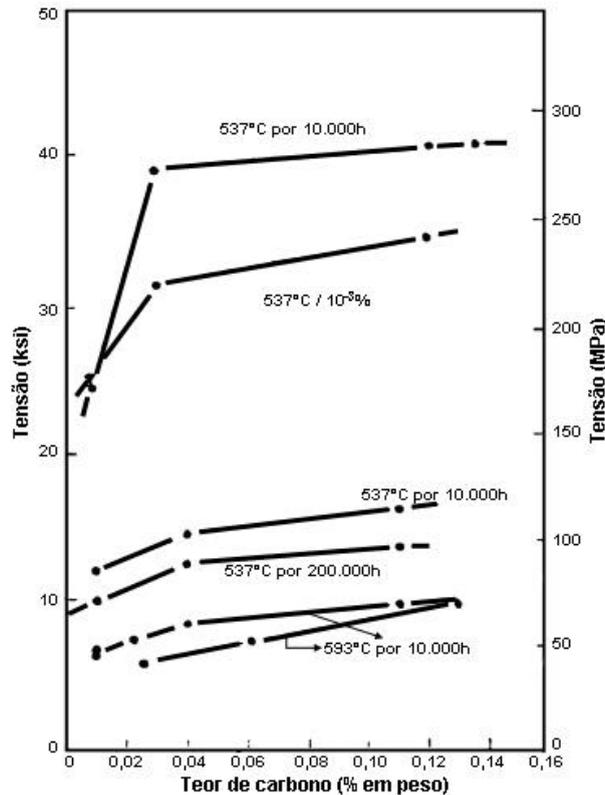


Figura 2 – Efeito do teor de carbono na resistência à ruptura por fluência do aço 2,25Cr-1Mo [extraído e adaptado de 10].

O cromo é um dos principais elementos de liga nos aços Cr-Mo ferríticos para promover resistência à oxidação e tem como papel principal a neutralização da tendência à grafitação promovida pelo Mo [11]. Entretanto, por ser um excelente formador de carbonetos, tende a retirar o C da matriz, reduzindo o endurecimento por solução sólida.

Apesar da perda de resistência à fluência relacionada à formação de carbonetos instáveis, a presença de carbonetos na matriz pode ser benéfica para a tensão de ruptura, principalmente se eles estiverem finamente dispersos e tiverem forma acicular. Os carbonetos formados com cromo (M_7C_3 e $M_{23}C_6$) não são estáveis em altas temperaturas, já que eles esferoidizam facilmente e crescem rapidamente

formando grandes blocos. O espaçamento entre os carbonetos fica maior do que o necessário para reter as discordâncias, diminuindo o seu poder de endurecer a matriz.

O efeito do teor de Cr na resistência à ruptura por fluência é apresentado na Figura 3 [12]. A resistência à fluência (1.000 h) do aço Cr-1Mo decresce rapidamente até atingir 5% e então aumenta levemente para teores de Cr superiores a 5%.

A Figura 4 resume os efeitos dos teores de Cr na tensão de ruptura dos aços Cr-Mo. Verifica-se que teores de Cr mais baixos são mais adequados para efeitos de aumento da resistência mecânica.

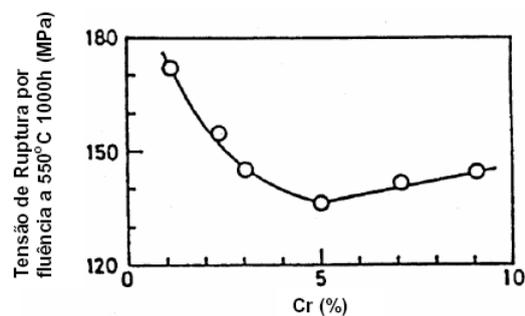


Figura 3 – Efeito dos teores de Cr na resistência à fluência do aço Cr-1Mo a 550°C [extraído e adaptado de 12].

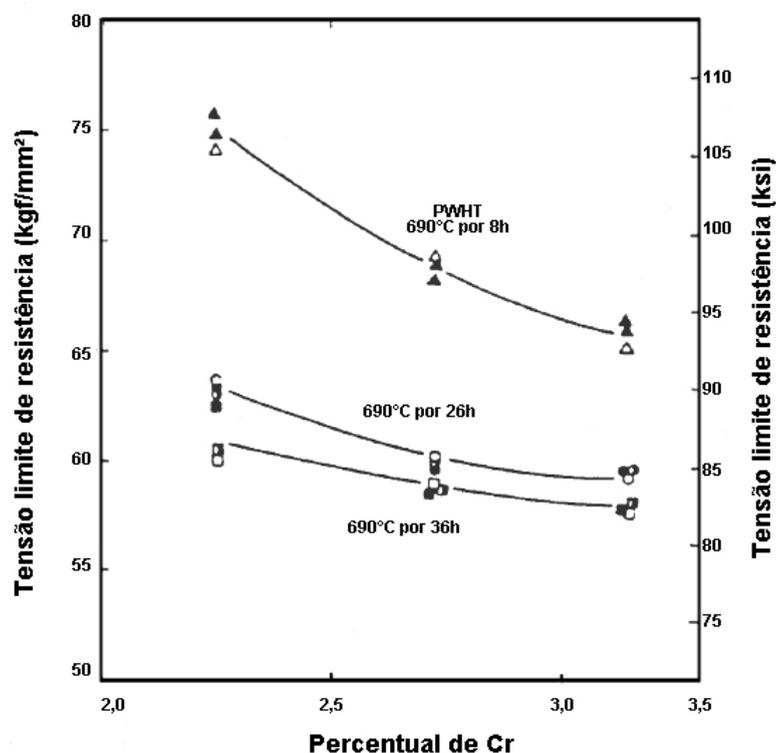


Figura 4 – Efeito do Cr na tensão limite de resistência de aços Cr-Mo [extraído e adaptado de 13].

O molibdênio é o principal elemento responsável pelo aumento da resistência à fluência em aços Cr-Mo. Como no caso do Cr, o Mo aumenta a resistência à fluência quando está presente em solução sólida ou em precipitados. A Figura 5 [13] apresenta o tempo de ruptura em função do teor de Mo no aço 3Cr-Mo em um ensaio à temperatura de 538°C com tensões de 165, 207 e 248 MPa. O aumento progressivo no teor de Mo de 0,8 a 1,6% aumenta a tensão limite de ruptura desses aços. Em aços ferríticos, a presença de 1% em peso de Mo em solução é suficiente para bloquear o movimento de discordâncias. Logo, a adição de mais de 1% de Mo não traz benefícios (assumindo que todo o Mo está em solução sólida).

O endurecimento por solução sólida do Mo pode ser comprometido pela precipitação de carbonetos de Mo, uma vez que ele é um formador de carbonetos tão forte que a precipitação é limitada unicamente pela quantidade disponível de C acima do equilíbrio no aço. Este fato sugere que a precipitação de carbonetos, e a conseqüente diminuição de Mo em solução na matriz, pode ser controlada pela diminuição do teor de C no aço. Alternativamente, outros elementos de liga, com maior afinidade ao C que o Mo, como o Ti, o Nb e o V, podem ser adicionados ao aço. Isso retira C da solução e permite que o Mo permaneça em solução.

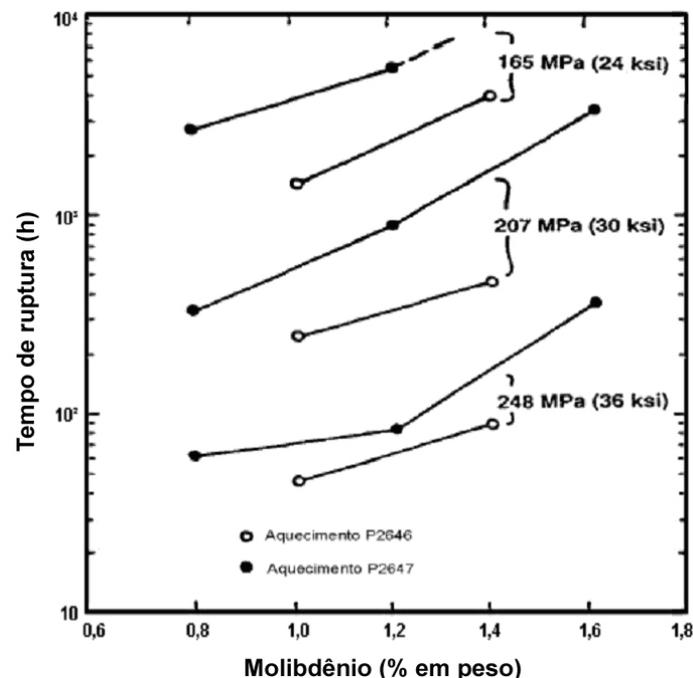


Figura 5 – Efeito do teor de molibdênio no tempo de ruptura (para tensão fixa) do aço 2,25Cr-Mo a 538°C [extraído e adaptado de 13].

A despeito do efeito negativo no endurecimento por solução sólida, a precipitação de carbonetos de Mo aumenta a tensão de ruptura. Este efeito é mais

acentuado com a precipitação do carboneto Mo_2C , que está normalmente presente como uma dispersão fina de precipitados aciculares. Essa morfologia tem sido observada tanto em aços ferríticos quanto em bainíticos [14].

O nióbio é um forte formador de carbonetos. A estabilidade dos carbonetos de Nb em temperaturas elevadas torna esse elemento uma adição interessante com o propósito de refinar o tamanho de grão, estabilizar a microestrutura e aumentar a resistência em altas temperaturas de aços ferríticos [15, 16]. Devido à estabilidade dos carbonetos em temperaturas elevadas e do impedimento da movimentação de discordâncias na microestrutura, a degradação microestrutural durante a fluência ocorre lentamente e a tensão de ruptura é mantida ao longo da vida do material.

O vanádio, da mesma forma, aumenta a resistência, particularmente a tensão de ruptura em aços ferríticos resistentes ao calor [17, 18]. O carboneto de vanádio (V_4C_3) é fino quando precipitado primeiro e é responsável pelo endurecimento. O V_4C_3 é relativamente estável em temperaturas de operação intermediárias e torna-se grosseiro a 600°C . O V tem maior afinidade ao C que o Mo e o Cr. Logo, o V pode reter o C e prevenir a dissolução do Mo para endurecer a matriz.

O efeito do V no tempo de ruptura em fluência e na quantidade de ferrita foi investigado para o aço 9Cr-1Mo modificado [13]. A tensão de ruptura em fluência diminui com o aumento do teor de V. Isso é causado pelo aumento da quantidade de ferrita δ quando o V é adicionado com teores maiores que 0,25%, que pode causar amolecimento do aço e reduzir a resistência mecânica, a resistência à fluência e a tenacidade. A ferrita δ deve ser suprimida em aços contendo muito Cr através da diminuição de elementos α -gênicos (V, Mo, Cr) e aumento de elementos γ -gênicos (Ni, Mn, C, N).

Foi confirmado que o V e o Nb possuem efeito combinado na resistência à fluência do aço 12Cr-1Mo-1W-V-Nb [13]. Nitretos de V finamente dispersos foram observados e contribuíram para a melhoria da tensão de ruptura em fluência. Os teores ótimos de V e Nb são 0,25% e 0,05-0,10%, respectivamente.

O titânio é adicionado aos aços ferríticos para aumentar a resistência, promover a estabilização de carbonetos e a desoxidação. O aumento da resistência pela adição do Ti resulta da formação de finos precipitados TiC na matriz, os quais se apresentam estáveis em altas temperaturas, impedindo a perda da resistência à

fluência pelo seu coalescimento. Pilling *et al.* [19] relataram que uma adição de apenas 0,04% de Ti na liga 2.25Cr-1Mo acarreta um considerável acréscimo da resistência à fluência a 565°C. Entretanto, análises têm revelado que a fração volumétrica de TiC é maior em amostras com baixos teores de C e decresce com o aumento dos teores de C, o que resulta numa redução da resistência à fluência [19].

3.3 Desempenho dos aços Cr-Mo em serviço

Os fatores que controlam as propriedades mecânicas dos aços Cr-Mo incluem a natureza dos mecanismos de endurecimento, a microestrutura, o tratamento térmico e a própria composição química.

A resistência à fluência nos aços Cr-Mo é oriunda do endurecimento por solução sólida da matriz ferrítica pelo C, Cr e Mo e pelo endurecimento por precipitação de carbonetos, que contrabalançam a perda de resistência por solução sólida com a sua precipitação durante a exposição à temperatura [20], como ilustrado na Figura 6. Dessa forma, essa classe de aços é dita de endurecimento secundário.

No primeiro estágio da fluência, os efeitos de solução sólida são a maior contribuição para a resistência. Com o passar do tempo, a precipitação de carbonetos (Mo_2C , no caso de aços ao Mo) contribui mais fortemente para a resistência à fluência. O efeito dos carbonetos diminui com o seu coalescimento, formando estruturas mais estáveis e maiores, provocando perda de resistência mecânica. Ambos os mecanismos de endurecimento se tornam instáveis em temperaturas altas. No endurecimento por solução sólida, um incremento de temperatura aumenta a taxa de difusão dos átomos de soluto e de lacunas no ambiente das discordâncias, facilitando a escalagem. Quando o aquecimento atinge uma temperatura excessivamente alta, pode haver solubilização dos precipitados. Em temperaturas intermediárias, os precipitados podem coalescer, provocando o superenvelhecimento, e se tornarem menos efetivos em impedir o movimento de discordâncias.

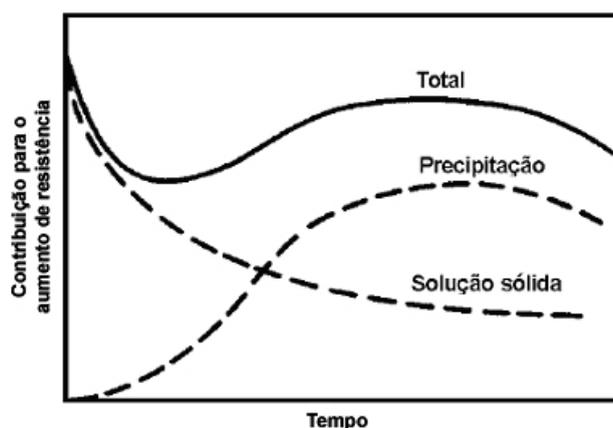


Figura 6 – Mudanças esquemáticas na resistência à fluência a 550°C em aço Cr-Mo normalizado, evidenciando o fenômeno do endurecimento secundário [extraído e adaptado de 21].

O modelo físico do comportamento em fluência em aços de alta resistência, dentro do intervalo de temperaturas e tensões de serviço, assume que a resistência à fluência do material aumenta dependendo das barreiras à escalagem e ao deslizamento cruzado. Uma rede densa de discordâncias, a dispersão de partículas finas e a presença de um campo elástico de deformação na matriz devido à presença de elementos em solução sólida representam barreiras efetivas ao movimento de discordâncias. Mudanças na efetividade destas barreiras levam a mudanças no comportamento em fluência dos materiais [22, 23, 24].

Como resultado das taxas de resfriamento empregadas nos tratamentos térmicos desses aços, as microestruturas podem variar de ferrita-perlita, ferrita-bainita, bainita pura e martensita. A resistência e a tenacidade ao impacto dos aços carbono e Cr-Mo com microestruturas totalmente bainíticas são melhores que a resistência e a tenacidade ao impacto daqueles com microestrutura ferrítico-bainítica. Microestruturas bainíticas também têm melhor resistência à fluência sob alta tensão, em condições de tempo reduzido, mas degradam mais rapidamente em altas temperaturas que as estruturas perlíticas. Assim, materiais ferrítico-perlíticos têm melhor resistência à fluência em tempos intermediários e baixa tensão. Por serem as duas microestruturas eventualmente esferoidizadas, é esperado que após longo tempo de operação as duas converjam para uma resistência à fluência similar [25]. Esta convergência pode ser estimada a ocorrer em torno de 50.000 h a 540°C para o aço 2,25Cr-1Mo [21].

A taxa de esferoidização depende da microestrutura inicial. A esferoidização mais lenta é associada a microestruturas perlíticas, especialmente aquelas com grandes espaços interlamelares. A esferoidização é mais rápida se os carbonetos

estão inicialmente na forma de partículas discretas, como na bainita, e mais rápida ainda se a estrutura inicial for martensita [21].

Entretanto, trabalhos mais recentes, como o de Chaudhuri [6], mostram que a estrutura bainítica não apresenta degradação visível em microscopia ótica. Em sua análise de caso, a falha prematura do tubo de superaquecedor pode ser atribuída às condições de operação, que eram temperatura de 570°C e pressão de 50 MPa, quando a pressão máxima numa caldeira de alta potência no Brasil não passa de 20 MPa. Bhadeshia [7, 26] também não percebeu mudanças microestruturais no aço 2,25Cr-1Mo bainítico. O trabalho de Lisboa [9] também confirma a ausência de degradação de estruturas bainíticas passíveis de observação em microscopia ótica.

Poucas mudanças microestruturais que ocorrem como resultado da exposição à temperatura sugerem uma contribuição para aumentar a resistência à deformação. Algumas reduções no tamanho de subgrão, resultantes dos primeiros estágios do rearranjo de discordâncias e durante alguns estágios do carregamento por fluência, e a precipitação de novas fases podem criar novas barreiras ao movimento das discordâncias. Contudo, as mudanças mais comuns com relação à evolução microestrutural envolvem crescimento de subgrão, coalescimento de partículas e redução dos elementos em solução sólida associada à precipitação de novas fases, resultando em uma redução na resistência e mostrando que a evolução da taxa de fluência está intimamente ligada às mudanças microestruturais, conforme apresentado na Figura 7 [27].

Microestruturas que promovem um elevado aumento da resistência à fluência nos ensaios de curta duração podem ser conseguidas em uma larga variedade de aços e são produzidas de maneira mais simples por revenimento a altas temperaturas, que leva à precipitação de partículas finas e dispersas e à retenção de uma alta densidade de discordâncias. Estas estruturas resultam em elevados valores de limite de resistência, limite de escoamento e resistência à fluência. Contudo, materiais revenidos a temperaturas mais baixas são menos estáveis.

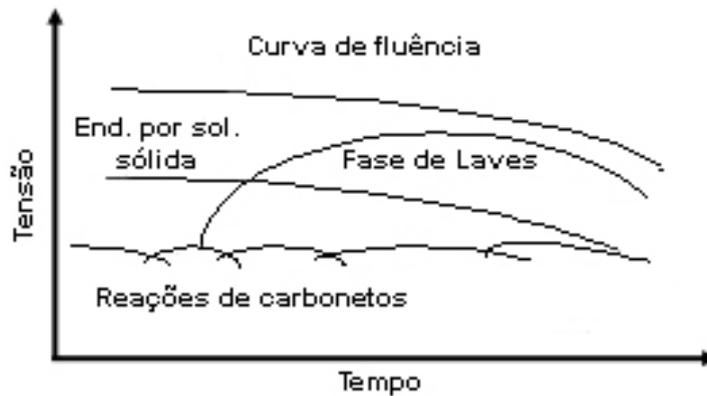


Figura 7 – Efeito das mudanças microestruturais na resistência à fluência dos aços 9-12%Cr [extraído e adaptado de 27].

Atualmente, é largamente aceito que os princípios que guiam os projetos de ligas de alta resistência à fluência são: (i) atingir uma estrutura fina de subgrãos, que é estabilizada através de partículas que bloqueiam as discordâncias e o endurecimento por solução sólida, e (ii) evitar a precipitação de fases que rompam esta estrutura através do coalescimento de partículas ou pela redução do endurecimento por solução sólida.

3.4 Fluência em aços Cr-Mo

O fenômeno de fluência em materiais, que pode ser definido como deformação dependente do tempo sob tensão constante, foi descrito em 1905 por Phillips [28], que identificou uma dependência logarítmica da deformação em relação ao tempo em arames submetidos a um carregamento constante. Entretanto, foi Andrade [29, 30] quem realizou os primeiros estudos quantitativos deste fenômeno, com a finalidade de determinar as leis que governam a deformação por fluência, demonstrando que a tensão de fluência em metais puros e ligas poderia ser representada por uma equação da forma:

$$l = l_0(1 + bt^{1/3}) \exp(kT)$$

onde l_0 é o comprimento inicial da amostra sob carregamento, l é o comprimento da amostra após carregamento durante o tempo t e b e k são constantes dependentes da tensão e da temperatura.

Na época em que Andrade [29, 30] desenvolveu seu trabalho original, a importância prática da deformação por fluência não era muito considerada, sendo tratada principalmente como um assunto de interesse científico. A importância desse fenômeno em componentes de caldeiras, plantas petroquímicas, motores de combustão interna, turbinas a gás e outros equipamentos foi sendo progressivamente reconhecida, na medida em que a temperatura de operação crescia com a demanda da modernidade.

Atualmente, projetos envolvendo fluência são parte integrante de vários códigos e normas utilizadas em caldeiras e vasos de pressão, que operam sob temperaturas elevadas. Diz-se que um material está operando sob regime de fluência quando submetido a carregamento constante e temperaturas acima da homóloga, que pode ser definida aproximadamente como 0,45 vezes a temperatura de fusão do material.

A proporção relativa entre os três estágios de fluência é variável. Para componentes em que a combinação de temperatura e carregamento levam a longos períodos de operação, superiores a 10 anos, como é o caso das caldeiras de usinas termelétricas, o estágio primário é muito pequeno e o secundário representa o maior volume da vida do componente.

Os mecanismos responsáveis pela fluência nos metais e ligas são principalmente a fluência por difusão e a fluência por discordâncias.

A fluência por difusão, que ocorre em elevadas temperaturas e tensões relativamente baixas, é o mecanismo que envolve a difusão dos defeitos pontuais no cristal sob a influência da temperatura.

Na fluência por difusão, as lacunas são dirigidas pela tensão cisalhante aplicada diferindo com relação à trajetória principal de difusão que pode ser através dos grãos, de acordo com Nabarro-Herring, dominante para grandes tamanhos de grão, ou através dos contornos de grão, de acordo com Coble, dominante para pequenos tamanhos de grão [31]. Uma terceira forma de fluência por difusão, que pode ocorrer em temperaturas elevadas e baixas tensões, particularmente para amostras com tamanho de grão elevado, é o mecanismo de Harper e Dorn [32]. Neste caso, a difusão se dá pelo interior do grão, assistida por lacunas, sendo os contornos de subgrão e as discordâncias as fontes e os sumidouros, respectivamente.

A fluência por discordâncias é o mecanismo através do qual as discordâncias superam barreiras, tais como outros defeitos lineares e precipitados, através da tensão aplicada, que favorece o processo de escalagem já que força a discordância para um plano paralelo de forma que ela consiga superar o obstáculo à sua movimentação, como ilustrado na Figura 8 [33]. No caso da movimentação de discordâncias em fluência, a taxa mínima de deformação é uma medida do regime permanente, ou secundário, no qual a geração e a recuperação de discordâncias se compensam e não há mudanças estruturais na rede [34].

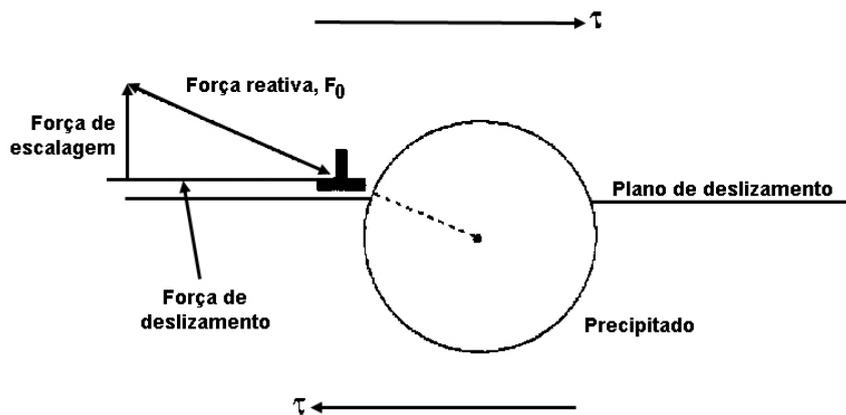


Figura 8 – A força da escalagem atuando na discordância, resolvida em termos da tensão cisalhante [extraído e adaptado de 33].

Os dois mecanismos descritos ocorrem simultaneamente no material submetido à temperatura, uma vez que é a difusão de defeitos pontuais, tais como átomos de soluto e lacunas, que permite a movimentação de discordâncias. Isso ocorre através de um mecanismo chamado escalagem, que é um movimento não conservativo em que uma discordância sai do seu plano de deslizamento [23, 24].

O deslizamento cruzado é outro tipo de movimentação, conservativa, de discordâncias em hélice, que tendem a se mover em planos cristalográficos determinados [23, 24].

Embora haja uma classificação de discordâncias em tipos diferentes, na prática toda discordância é mista, apresentando alguns trechos em que a linha de discordância é normal ao vetor de Burgers, sendo então pura aresta, e outros nos quais a linha é paralela ao vetor de Burgers, sendo pura hélice. O fenômeno da escalagem é característico de discordâncias aresta. No caso das discordâncias em hélice, há muita liberdade de movimentação em qualquer plano que contenha a linha

da discordância e o vetor de Burgers (que são paralelos). Para que a discordância em hélice mude de plano de deslizamento, não é necessário que haja difusão, embora seja preciso que a tensão aplicada ou a energia de ativação sejam maiores [23, 24].

3.5 Evolução de carbonetos

O processo de fabricação dos aços ferríticos Cr-Mo prevê a realização de tratamentos térmicos em temperaturas superiores a 500°C de forma a permitir a difusão dos átomos substitucionais num razoável período de tempo, o que promove o crescimento dos precipitados. É estabelecido na literatura que a resistência à fluência do aço 2,25Cr-1Mo é dependente da dispersão de carbonetos nos grãos, o que mostra que a análise de precipitados é um método promissor para avaliação estrutural de componentes críticos de caldeiras [8, 35, 36, 37].

A cementita e outros carbonetos de ferro podem precipitar por um mecanismo que é dependente apenas da difusão de átomos de carbono. Tais carbonetos podem precipitar em temperaturas da ordem de 200°C. Como consequência, verifica-se a ocorrência desta precipitação prioritariamente àquela oriunda dos demais carbonetos metálicos como Mo_2C , por exemplo. O resultado deste processo é, em um primeiro momento, o amolecimento do aço a partir da retirada do carbono da solução sólida pelos carbonetos de ferro, porém, ocorre um novo endurecimento à medida que os demais carbonetos metálicos começam a precipitar às expensas dos menos estáveis carbonetos de ferro. Por esta razão estes aços são chamados aços de endurecimento secundário.

Sabe-se que, nos aços Cr-Mo operando sob fluência, estão presentes diversos tipos de carbonetos precipitados como MC (apenas em presença de nióbio e/ou vanádio), M_2C , M_6C , M_7C_3 , M_{23}C_6 e M_6C . Estas fases diferem na composição química, na estrutura cristalina, na distribuição e na eficácia com que impedem a movimentação de discordâncias.

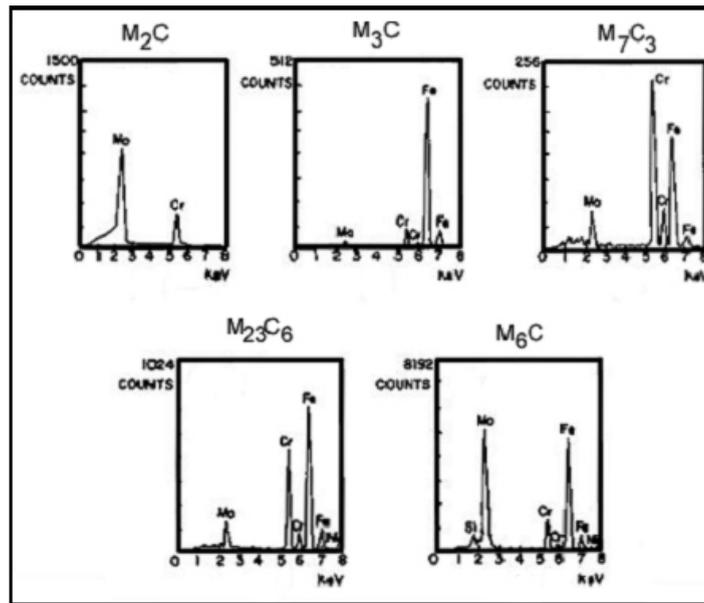
Quando os precipitados começam a se formar a partir de uma solução sólida supersaturada, eles são coerentes com a matriz e as discordâncias podem atravessá-los; caso os precipitados tenham perdido a coerência em um estágio inicial da exposição à temperatura, o envelhecimento posterior facilita a movimentação de discordâncias uma vez que aumenta a distância entre os carbonetos.

Portanto, o momento em que os carbonetos são mais eficazes em impedir a movimentação de discordâncias é logo após perderem a coerência com a matriz, já que, além de incoerentes, ainda estão muito próximos uns dos outros [24].

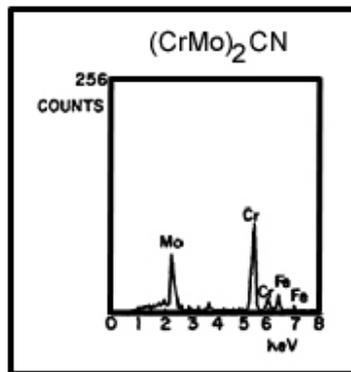
Os carbonetos e nitretos são, com relação à estrutura cristalina, de dois tipos: cúbicos de face centrada e hexagonais. Andrews [38], através do uso da técnica de raios-X, identificou os carbonetos hexagonais e nitretos presentes nos aços. Essas fases são caracterizadas pela fórmula M_2X . Os interstícios ocupados por C ou N não precisam estar completamente ocupados e a solução sólida pode também ter a fórmula M_3X ou outras proporções simples.

Como apontado por Rundle [39], muitas fases não podem ser vistas como soluções sólidas simples ou como elementos intersticiais, mas sim como compostos intersticiais, que podem possuir composição variável. Isso não significa que cada fase só pode ser nucleada pela fase anterior; pode haver nucleação independente e pode haver um período de tempo considerável no qual duas ou mais fases existem simultaneamente. Da mesma forma, nem todo estágio está presente em todos os aços. Assim, o M_7C_3 é baseado no Cr_7C_3 (o Mn_7C_3 é isomorfo a ele) e geralmente é formado apenas quando o Cr está presente. O passo final para o M_7C usualmente requer a presença de molibdênio ou tungstênio, embora sua formação na presença de nióbio (ou tântalo) seja possível.

A Figura 9 apresenta os espectros-padrão de dispersão de energia (EDS) dos principais carbonetos e de um carbonitreto extraídos de réplicas a partir de experiências de Pilling *et al.* [40] e Todd [41].



(a)



(b)

Figura 9 – Espectros EDS de (a) carbonetos extraídos de aço 2,25Cr-1Mo [42] e (b) carbonitreto $(CrMo)_2CN$ encontrado em aço 2,25Cr-1Mo [extraído e adaptado de 41].

Nos aços Cr-Mo baixa liga, a formação de carbonetos inclui formas aciculares de Mo_2C na ferrita pró-eutetóide e diversas fases na bainita, incluindo as variações estequiométricas M_7C_3 e $M_{23}C_6$. A fase M_3C desaparece rapidamente em temperaturas de alívio de tensões pós-soldagem. Esta estrutura mista bainita/ferrita confere boa resistência à fluência em tempos curtos. Entretanto, estas fases são metaestáveis, e alterações ocorrem em função da exposição a altas temperaturas de serviço e dos efeitos da fluência. As alterações microestruturais ocorrem lentamente podendo ter efeito após 20 anos de operação em temperaturas na faixa de 520 a 560°C. Estas modificam as propriedades mecânicas, como a resistência à fluência, por exemplo.

O MC tem uma estrutura cúbica típica do NaCl aparecendo nestes materiais quando da adição de nióbio ($a_0=4,47\text{Å}$), titânio ($a_0=4,36\text{Å}$) e vanádio ($a_0=4,16\text{Å}$) [43].

O M_2C é usualmente um carboneto rico em molibdênio com uma estrutura hexagonal compacta ($a_0= 3,00\text{\AA}$ e $c_0= 4,72\text{\AA}$) e alta solubilidade para o cromo e o vanádio. É tipicamente acicular e fino, quando ocorre de maneira intragranular, e levemente globular, quando aparece em contorno de grãos (intergranular). Nucleia-se inicialmente coerente com a matriz ferrítica [43].

O M_3C é um carboneto rico em ferro, apresentando a estrutura ortorrômbica da cementita ($a_0= 4,52\text{\AA}$, $b_0= 5,09\text{\AA}$, $c_0= 6,74\text{\AA}$). Cromo e molibdênio têm solubilidade limitada no M_3C . São essencialmente carbonetos primários, já que não ocorre precipitação adicional após sua formação na matriz nem mudança de sua forma original, à exceção de coalescimento pouco acentuado. Com o revenimento, a concentração de cromo na cementita aumenta, tendendo a formar carbonetos mais estáveis [43].

O M_7C_3 é um carboneto rico em cromo com estrutura pseudo-hexagonal ($a_0=13,98\text{\AA}$ e $c_0= 4,51\text{\AA}$). Ferro e manganês têm alta solubilidade neste carboneto. É encontrado na forma acicular na matriz e globular quando presentes no contorno de grão. A nucleação do M_7C_3 ocorre a partir do M_3C , tanto dentro quanto na interface ferrita-carboneto. O teor de cromo do M_3C aumenta antes da formação do M_7C_3 [43].

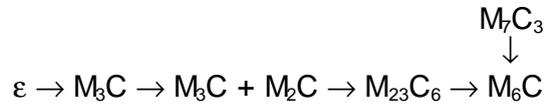
O $M_{23}C_6$ é um carboneto rico em cromo com estrutura cúbica de face centrada complexa ($a_0= 10,62\text{\AA}$) e tem alta solubilidade de ferro e carbono. Da mesma forma que o M_7C_3 , a nucleação do $M_{23}C_6$ ocorre a partir do M_3C , tanto dentro quanto na interface ferrita-carboneto. Em aços 2,25Cr-1Mo temperados e revenidos, o $M_{23}C_6$ forma-se na matriz martensítica, enquanto na condição normalizado e revenido somente nas regiões bainíticas [43]. Koseschnik e Holzer [44] apontam que a indicação mais clara de degradação em amostras ensaiadas sob fluência a 650°C por 2.000 e 7.000 horas é o coalescimento dos carbonetos $M_{23}C_6$.

O M_6C é essencialmente carboneto de ferro e molibdênio, podendo apresentar teores relativamente altos de outros elementos, como o silício, por exemplo. Apresenta-se na forma cúbica de face centrada com $a_0=11,08\text{\AA}$. Aparece na forma globular e nucleia nos contornos de grão na interface matriz-carbonetos. É um carboneto estável [43].

As sequências de precipitação de carbonetos no revenimento em diferentes temperaturas e tempos para o aço 2,25Cr-1Mo foram estudadas sistematicamente por

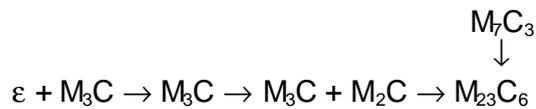
Baker e Nutting [42] conforme mostrado abaixo:

(a) Sequência de precipitação de carbonetos em aços temperados e revenidos

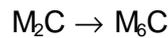


(b) Sequência de mudanças em carbonetos no aço normalizado e revenido

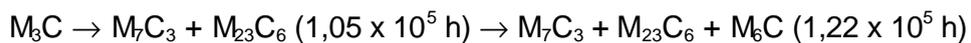
1. Bainita



2. Ferrita (formada da solução sólida)



Varin e Hafteck [45] estudaram a sequência de precipitação nos contornos de grão da ferrita do aço A335-P11 (aço 1Cr-0,5Mo) durante exposição por tempos prolongados em temperaturas de 520°C (1,05 a 1,22 x 10⁵ horas). A sequência de precipitação de carbonetos observada foi a seguinte:



Eles apontaram que o surgimento de M₆C nos contornos de grão da ferrita após 1,22x10⁵ horas de operação a 520°C poderia ser um fator importante na estimativa de vida residual, já que este carboneto precisa de um grande número de átomos de molibdênio e, assim, sua nucleação e crescimento podem levar à dissolução do Mo₂C na matriz ferrítica, reduzindo o efeito de endurecimento por precipitação.

Bhadeshia [7], revisitando Baker e Nutting [42], dividiu os carbonetos existentes em fases que coexistem durante longos tempos de envelhecimento no aço 2,25Cr-1Mo. As observações dos autores [7, 42] têm em comum o fato do M₆C aparecer somente nos tempos equivalentes ao fim da vida operacional do material e não estar

presente para tempos curtos. A Figura 10 mostra os carbonetos observados por Bhadeshia em função do tempo de exposição à temperatura.

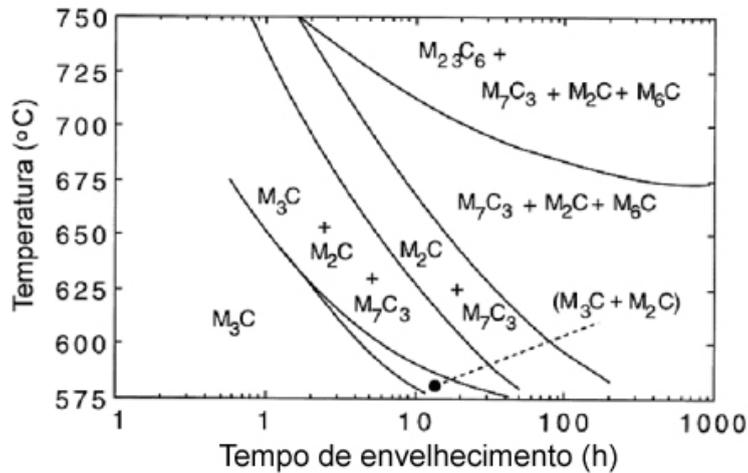
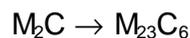


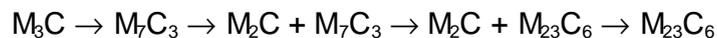
Figura 10 – Versão feita por Bhadeshia [extraído e adaptado de 7] do diagrama clássico de estabilidade de carbonetos de Baker e Nutting [extraído e adaptado de 42] para o aço 2,25Cr-1Mo.

Yang *et al* [46], ao investigar as mudanças microestruturais do aço 2,25Cr-1Mo devido à operação por 5 ou 18 anos em uma temperatura de 542°C com uma pressão interna nominal de 17,4 MPa, estabeleceu a seguinte sequência de precipitação de carbonetos nas áreas de ferrita e perlita.

Na ferrita:



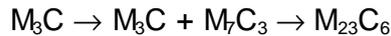
Na perlita:



Essa sequência não é totalmente consistente com a proposta por Baker e Nutting [42] e Varin e Hafteck [45]. Das e Joarder [47], em seu estudo, obtiveram a sequência de precipitação de carbonetos nos aços 5Cr-0,5Mo observados após 172.000 e 220.000 horas de operação como sendo:



ou



ou



Os carbonetos observados nas microestruturas originais do estudo de Das e Joarder [47] foram M_2C , M_6C e M_7C_3 . Estes carbonetos sofreram transformações para $M_{23}C_6$.

Furtado *et al.* [48, 49, 50], estudando o aço 2,25Cr-1Mo perlítico com Nb e V, observaram uma sequência de precipitação em que se formava o carboneto mais estável M_6C . Entretanto, o carboneto $M_{23}C_6$ não estava presente.

Como exemplificado, os diversos trabalhos envolvendo a determinação da sequência de evolução de carbonetos que buscam definir as sequências exatas de precipitação, ou além, a correlação entre a fração em peso de determinado tipo de carboneto e a exposição em serviço, indicam uma tendência genérica, porém não apontam para uma correlação exata. Acredita-se que esta falta de correlação seja resultado do efeito da combinação de variáveis, como o teor de carbono, a fração de bainita/ferrita pró-eutetóide, o tamanho de grão, a percentagem dos carbonetos nos contornos de grão ou no seu interior, a composição química e os tratamentos térmicos sofridos pelos materiais estudados.

Apesar dos resultados observados nas quantificações, as análises qualitativas envolvendo técnicas de EDS e difração de raios-X, vêm apresentando bons resultados, principalmente em análises comparativas como as almejadas neste trabalho [51].

3.6 Relação entre a dureza e a resistência à fluência

A dureza tem sido utilizada como um método simples de ensaio mecânico não destrutivo para estimar a perda de resistência mecânica e de resistência à fluência. Embora seja empírica, se revela um complemento útil aos métodos metalográficos de avaliação. Entretanto, esforços têm sido feitos para relacionar os valores de dureza de aços ferríticos com a resistência à fluência [52, 53, 54].

Além disso, este tipo de medida também pode ser utilizado para que se estime a temperatura a que o componente foi submetido quando há falta de dados disponíveis [1]. Isso é feito relacionando a dureza medida com o parâmetro de Larson-Miller, como apresentado na Figura 11.

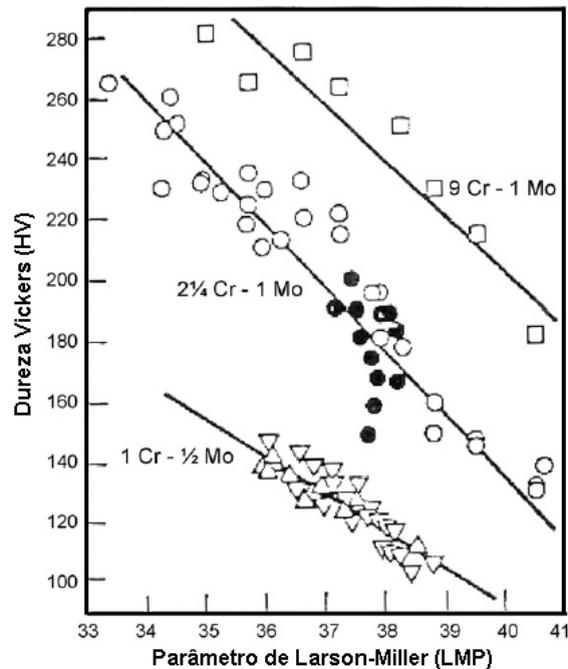


Figura 11 – Relação entre dureza Vickers e parâmetro de Larson-Miller para os aços 1Cr-0,5Mo, 2,25Cr-1Mo e 9Cr-1Mo [extraído e adaptado de 1].

A dureza é definida como resistência à deformação, o que quer dizer que suas medidas podem ser usadas para estimar a extensão de danos que ocorreram num material exposto à temperatura e à tensão por um tempo longo. Desta forma, a dureza pode ser usada para uma estimativa dos danos por fluência. Para aços baixa liga, como os usados em plantas de geração, ocorrem perdas de resistência principalmente pelo coalescimento e mudanças morfológicas nos carbonetos.

A recuperação de aços pode ser descrita em termos de um parâmetro tempo-temperatura denominado parâmetro de Hollomon-Jaffee [55], que é equivalente ao parâmetro de Larson-Miller [56] usado para fluência. Pode ser desenvolvida uma relação entre o parâmetro de Larson-Miller, $P = (C + \log tf)$, e as mudanças na dureza: se a dureza inicial no tempo $t = 0$ é conhecida e igual a H_0 , o material pode ser envelhecido à temperatura T e os valores de H podem ser medidos em tempos diferentes para obter a relação $H = f(P)$ para um material em particular. Para medidas de dureza em campo de componentes que estiveram em operação por muito tempo, o valor efetivo ou principal da temperatura à qual eles foram expostos pode ser

estimado, desde que os parâmetros P e H_0 sejam conhecidos. Como na maioria dos casos, H_0 é desconhecido, ele pode ser estimado através de dados conhecidos de materiais similares.

Outra aplicação para as medidas de dureza é relacioná-las com observações microestruturais. Regiões localmente degradadas do material terão uma dureza mais baixa e essas medidas podem fornecer indicações suplementares úteis do estado geral de danos por fluência do material, desde que este apresente microestrutura composta de ferrita e perlita.

Lisboa [9], estudando ligas de Fe-Cr-W(V) de microestrutura bainítica, verificou que a tentativa de correlacionar diretamente os valores de dureza Vickers à degradação por fluência não surtiu efeito, uma vez que a perda da resistência das ligas usadas em seu trabalho não encontraram correspondência com uma redução consistente de dureza.

Da mesma forma, Ray *et al.* [57], estudando o aço 2,25Cr-1Mo, bainítico, que havia operado por 17 anos a 540°C e 40 MPa, concluiu que “a exposição prolongada do material às condições de operação não produziu qualquer redução relevante de dureza”.

Finalmente, a literatura mostra que qualquer critério de degradação de aços bainíticos operando sob regime de fluência deve contemplar, para estimativa de vida remanescente e de final de vida operacional, a presença de $M_{23}C_6$ coalescido [44, 46, 47] e de M_6C [7, 42, 43, 45].

Ao mesmo tempo, a operação sob fluência produz redução de dureza mensurável no aço 2,25Cr-1Mo quando este possui microestrutura composta de ferrita e perlita [52, 53, 54], mas o mesmo não ocorre quando o material é bainítico [9, 57].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material como recebido

O aço estudado foi o 2,25Cr-1Mo, de classe ferrítica para aplicação em altas temperaturas, recebido em forma de oito tubos, sendo quatro com microestrutura composta por ferrita-perlita e quatro com estrutura ferrítico-bainítica. Este material é codificado pela ASTM como sendo o aço A 335 – grau 22.

De acordo com o fabricante, para originar a microestrutura ferrítico-bainítica, o material foi submetido à normalização e revenimento, condição padrão de fornecimento, enquanto, para a obtenção de estrutura composta por ferrita e perlita, foi realizado recozimento após os processos mencionados anteriormente.

4.2 Composição química

A composição química do aço 2,25Cr-1Mo recebido para este trabalho e sua comparação com a composição nominal [58], codificado pela ASTM como A335 grau 22 estão apresentadas na Tabela 1. As análises foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas do CEPEL em uma amostra de estrutura ferrítico-bainítica e outra de estrutura composta por ferrita e perlita.

A medida dos teores dos elementos utilizou os seguintes métodos analíticos: combustão direta para o carbono e enxofre, volumetria para o fósforo, gravimetria para o silício e espectrofotometria de absorção atômica no caso do molibdênio, manganês e cromo.

Tabela 1 – Composição química do aço utilizado neste trabalho e segundo a norma ASTM A 355 G22 [58]. Os valores são expressos em percentagem em peso.

	C	Cr	Mo	Mn	S	P	Si
Ferrita + perlita	0,11	1,90	0,93	0,39	< 0,001	0,009	0,21
Ferrita + bainita	0,11	1,91	0,94	0,38	< 0,001	0,013	0,21
ASTM A 355 G22	0,05 – 0,15	1,9 – 2,6	0,87 – 1,13	0,3 – 0,6	0,025 máx.	0,025 máx.	0,5 máx.

4.3 Metalografia

As análises metalográficas foram conduzidas no laboratório de metalografia do CEPEL, a partir de amostras embutidas em resina epóxi, submetidas a processos de desbaste com lixas: 80, 120, 220, 400, 600 e 1.000. Em seguida, as amostras foram polidas utilizando-se pastas de diamante nas granulometrias 9 e 1 μm e atacadas com uma solução para ataque químico de nital 2%.

As amostras foram analisadas por microscopia de luz visível num banco ótico de platina invertida Olympus GX71.

4.4 Ensaio de dureza

Os ensaios de dureza Vickers – carga de 10 kgf – foram realizados na máquina universal de ensaios Instron Wolpert, modelo Testor 930, no laboratório de metalografia do CEPEL, obedecendo às especificações contidas na norma ASTM E92-82 (2003).

Em cada uma das amostras preparadas para metalografia, foram realizadas vinte medições de dureza Vickers.

4.5 Tratamentos térmicos de envelhecimento

Foram retiradas seções longitudinais de cada tubo, que foram envelhecidas em forno do tipo Tubular, marca Lindberg, tipo 59548-B, localizado no Laboratório de Supercondutividade do CEPEL.

As amostras foram submetidas a envelhecimento, utilizando-se três temperaturas diferentes (550, 575 e 600°C), e sendo retiradas do forno com tempos definidos de exposição (100, 500, 1.000 e 2.000 horas).

4.6 Microscopia eletrônica de transmissão

A caracterização de precipitação, englobando distribuição, morfologia e

estequiometria dos carbonetos presentes, foi a principal etapa deste trabalho. Através da análise usando microscopia eletrônica de transmissão, foram estudadas as características dos precipitados presentes para cada condição de ensaio descrita no item 4.5, tais como, morfologia, estequiometria, fração volumétrica e distribuição.

O microscópio utilizado foi o FEI Tecnai G20, do CEPEL, mostrado na Figura 12, e a análise seguiu o seguinte procedimento:

1. Preparação de réplicas de extração das amostras envelhecidas e como recebidas;
2. Observação de campos das réplicas em MET e identificação dos precipitados nele contidos através de EDS;
3. Registro dos campos através de fotos;
4. Tratamento de imagem no programa *Adobe Photoshop CS2* das fotos já digitalizadas e atribuição de uma cor para cada tipo de precipitado. As cores são: M_2C – verde, M_3C – azul, M_7C_3 – amarelo, $M_{23}C_6$ – preto e M_6C – vermelho;
5. Contagem da área total (em *pixels*) de cada precipitado, através do programa *Image Pro 4.5*, no campo observado;
6. Cálculo da área de cada tipo de precipitado em relação à área total observada. Nas regiões perlíticas e bainíticas, calculou-se a fração relativa entre carbonetos de forma a minimizar o erro inerente à escolha dos campos; já nas áreas ferríticas e de contorno, fez-se fração absoluta, visando a medir o aumento da densidade de precipitação.



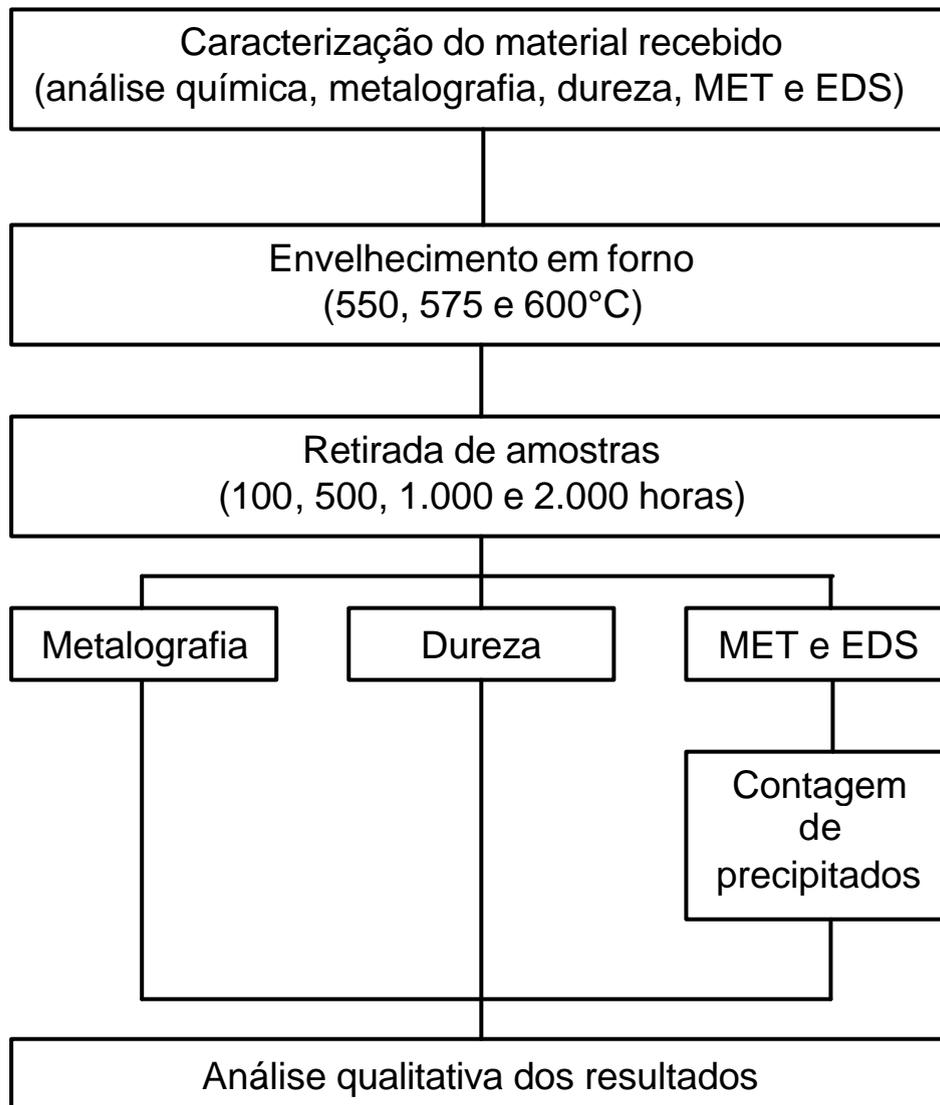
Figura 12 – Microscópio eletrônico de transmissão utilizado nas análises, FEI Tecnai G20.

A obtenção das réplicas de carbono é feita a partir das amostras com preparação metalográfica. Estas sofrem um novo desbaste com lixas 600 e 1000 e um novo polimento com pasta de diamante 9 e 1 μ m sendo, a seguir, atacadas por pincelamento com nital 5% por 30 segundos.

A seguir, efetua-se a deposição de uma camada de carbono com aproximadamente 1.000 μ m de espessura, no equipamento de recobrimento Polaron SC 500, nas condições de vácuo a 10⁻⁴ mbar e corrente elétrica de 60 A. Após esta etapa, efetuam-se cortes ortogonais entre si sobre a superfície das amostras, empregando-se um estilete, e procede-se um novo ataque, agora por imersão, com duração de 120 segundos, com reagente de Villela para extração do filme depositado.

Finalmente, as amostras são cuidadosamente imersas em um *becher* contendo água destilada. Nesta etapa, pequenas lâminas quadradas de filme de carbono se desprendem e são capturadas com uma grade de cobre, com dimensões padrão para MET, com $\varnothing=3$ mm e 100 mesh. As pequenas lâminas de carbono contêm, aderidos à sua superfície, precipitados e inclusões.

4.7 Etapas do estudo



4.8 Limitações do método

As técnicas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho apresentam limitações inerentes a qualquer método de medição.

A principal restrição que pode ser descrita diz respeito à representatividade estatística. Foi analisada uma amostra submetida a cada condição de envelhecimento, o que compromete a interpretação quantitativa das análises. Dessa forma, o enfoque dado e as conclusões obtidas devem ser tomadas qualitativamente.

As escolhas dos campos a serem analisados via microscopia eletrônica de transmissão são fortemente dependentes do operador. Para que se minimizasse esse erro, foi feita contagem de fração relativa de precipitados nos campos perlíticos e bainíticos. Esse método considera os percentuais de cada tipo de carboneto em relação aos outros presentes e não em relação à área total da imagem. No caso de campos em regiões ferríticas ou de contorno de grão, a contagem foi absoluta, considerando-se a área completa. Essa decisão foi tomada em virtude da observação do aumento de densidade de precipitados nessas regiões.

As amostras não foram submetidas à tensão. Assim, nada se pôde dizer a respeito da manutenção ou não da resistência à fluência do aço estudado.

5. RESULTADOS

5.1 Espectros característicos

As Figuras 13 a 17 mostram os espectros característicos obtidos em diferentes amostras deste trabalho, de cada tipo de precipitado passível de surgir no aço 2,25Cr-1Mo, tanto novo quanto envelhecido, sendo relativas ao M_2C , M_3C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$ e M_6C , respectivamente. Estes espectros foram considerados padrões para as identificações de todas as réplicas.

Todos os espectros apresentados neste trabalho foram filtrados em 0,2 keV.

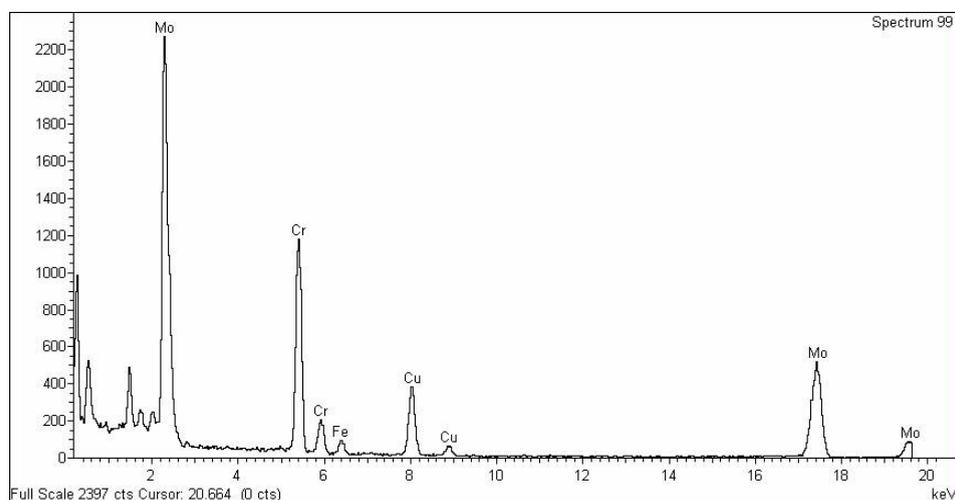


Figura 13 – Espectro característico do carboneto do tipo M_2C .

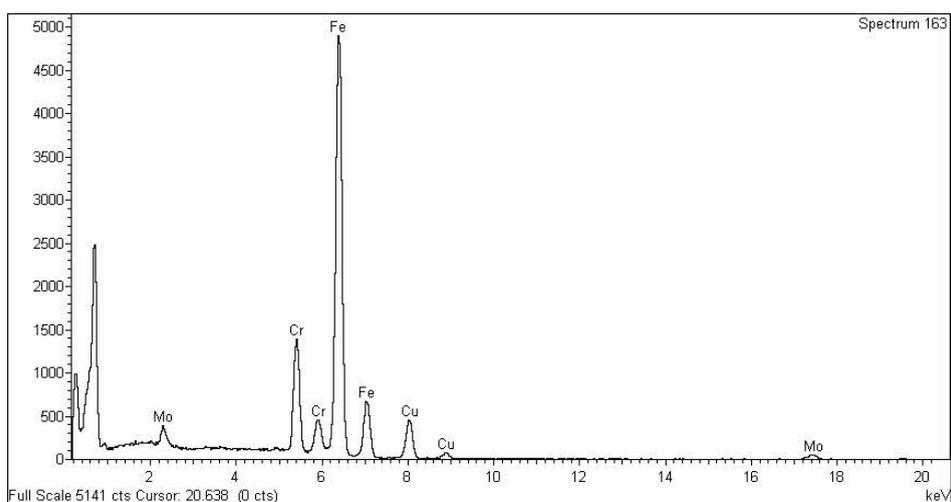


Figura 14 – Espectro característico do carboneto do tipo M_3C .

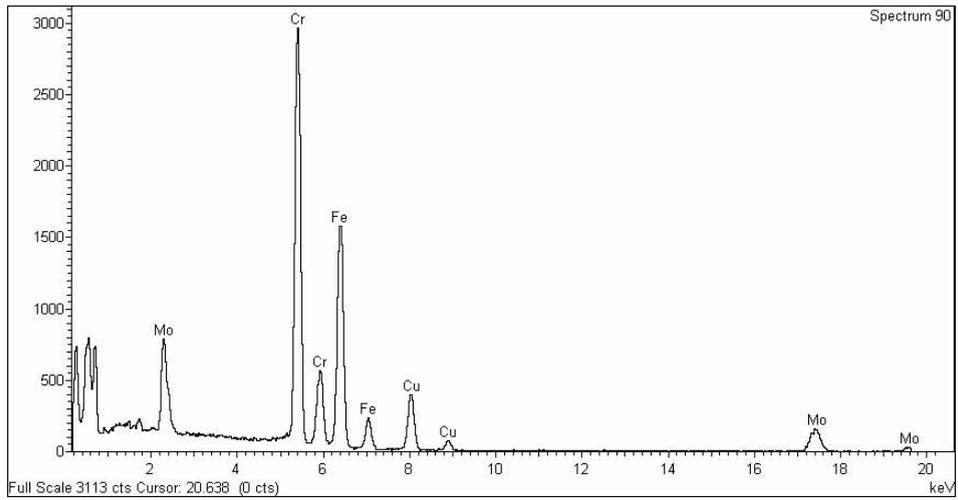


Figura 15 – Espectro característico do carboneto do tipo M_7C_3 .

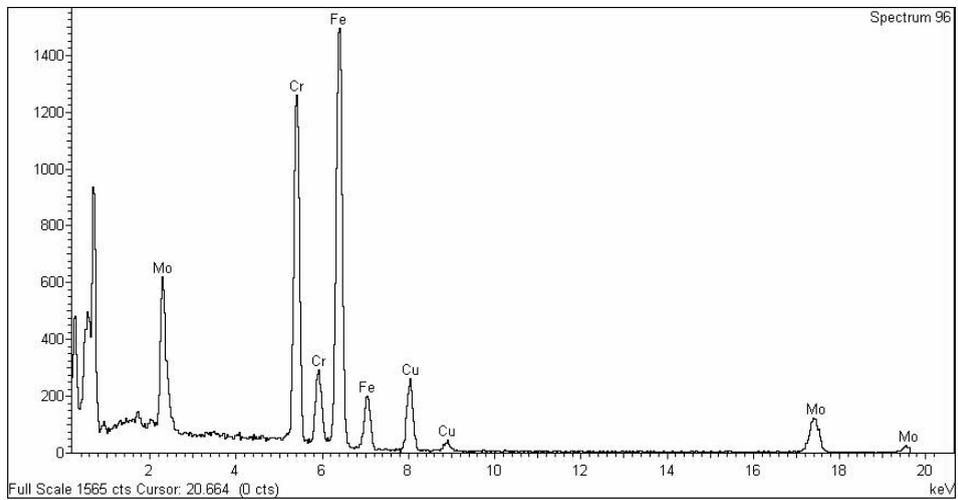


Figura 16 – Espectro característico do carboneto do tipo $M_{23}C_6$.

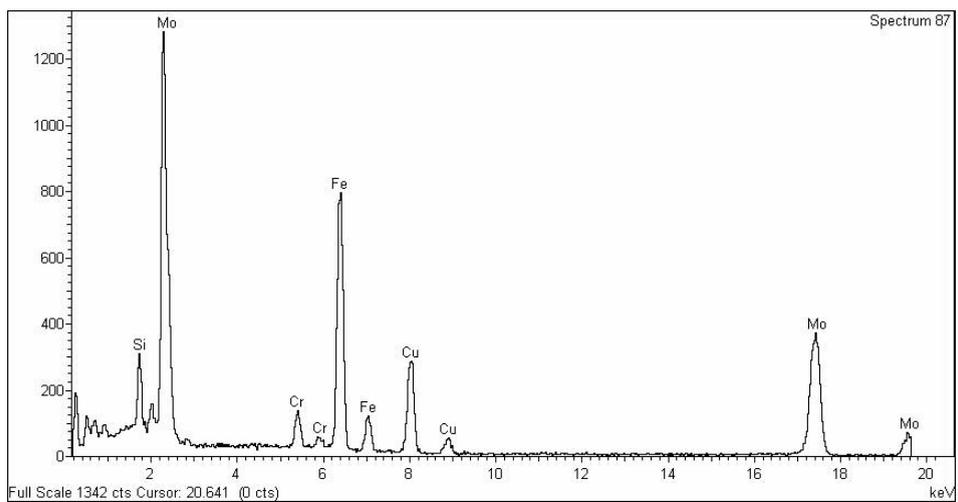


Figura 17 – Espectro característico do carboneto do tipo M_6C .

5.2 Material como recebido

No caso do material como recebido, tanto de estrutura composta por ferrita e perlita quanto o ferrítico-bainítico, a análise é mostrada completa no presente item. Os resultados de microscopia eletrônica de transmissão se encontram completos nos anexos deste trabalho.

5.2.1 Ferrita-perlita

A estrutura metalográfica do material na condição como recebido é mostrada na Figura 18. Como esperado, é composta de ferrita e perlita sem sinais de degradação, que pode ser classificada como pertencente ao estágio A de degradação segundo o critério de Toft e Marsden [3]. A dureza foi medida em dez pontos da região analisada e apresentou média de 139 ± 4 HV.

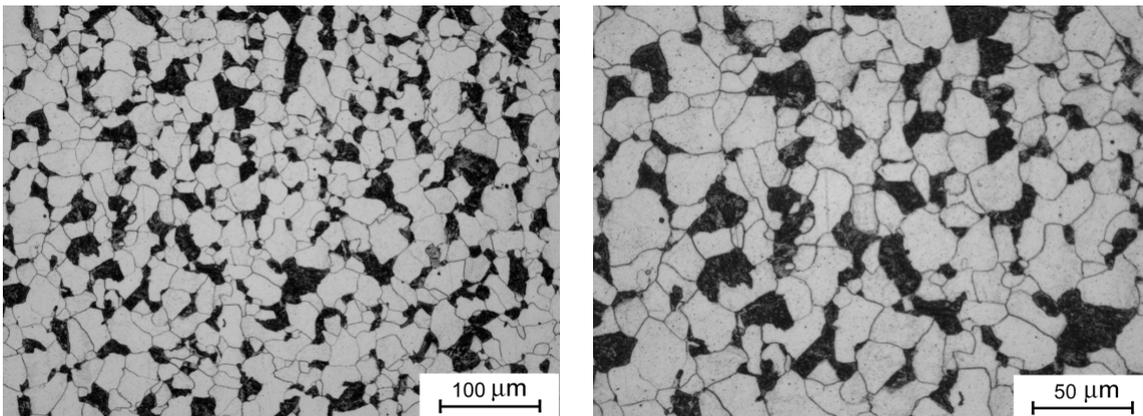


Figura 18 – Estrutura metalográfica do material novo, apresentando ferrita e perlita, com ataque por nital 2%.

A análise por microscopia de transmissão obedeceu ao descrito no item 3.7. Foram selecionados cinco campos, sendo dois em grãos perlíticos, dois em grãos ferríticos e um em um contorno de grão ferrítico, mostrados na Figura 19 e na Figura 23.

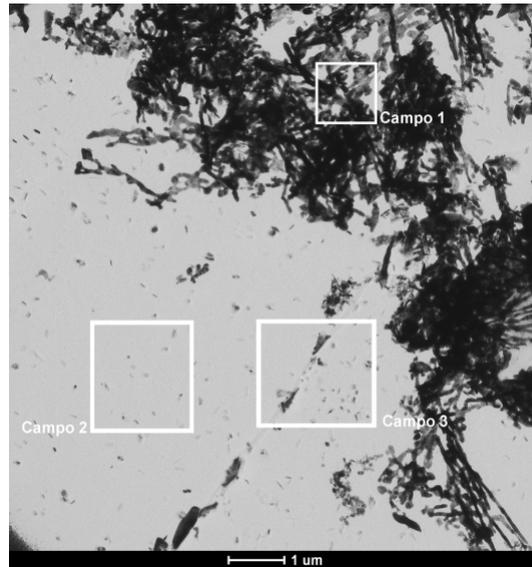
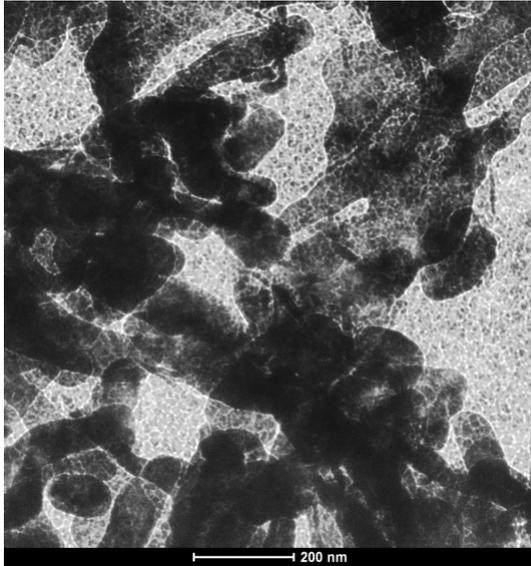


Figura 19 – Imagem de réplica da amostra composta por ferrita e perlita, com aumento de 5.000 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

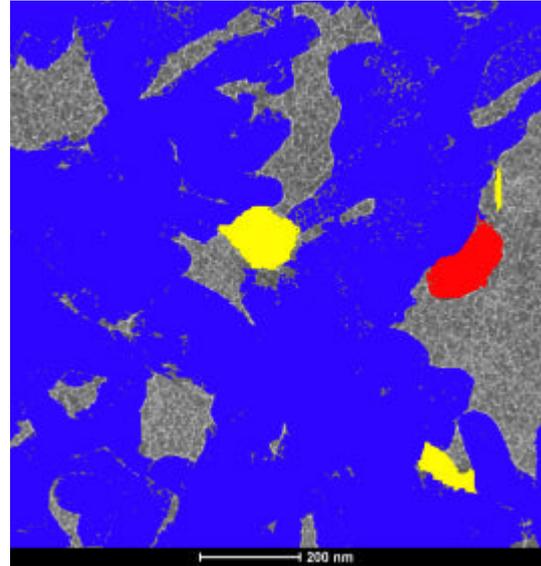
A partir da definição dos campos mostrados na Figura 19, fez-se a identificação dos carbonetos presentes em cada um. Cada tipo de precipitado recebeu uma cor, como descrito anteriormente no item 5.6, para que se pudesse fazer a contagem de fases. As Figuras 20, 21, 22, 24 e 25 mostram cada campo em detalhe e a atribuição de cores a cada tipo de precipitado.

As observações por microscopia eletrônica de transmissão foram coerentes com o esperado para o material ferrítico-perlítico. Foi verificada a presença maciça de M_3C nos grãos perlíticos, com muito poucos carbonetos de outras estequiometrias, enquanto, nos grãos ferríticos, há M_2C predominantemente.

Em alguns casos, quando todos os precipitados presentes em determinado campo são do mesmo tipo, a atribuição de cor não se faz necessária, uma vez que o *software* utilizado para as contagens (*Adobe Photoshop CS2*) é capaz de diferenciar os tons de cinza diferentes entre carbonetos de matriz.



(a)



(b)

Figura 20 – Detalhe do campo 1, delimitado dentro do grão perlítico e mostrado na Figura 19, com aumento de 43.000 X. Os carbonetos azuis são do tipo M_3C ; os amarelos são M_7C_3 enquanto o vermelho é M_6C .

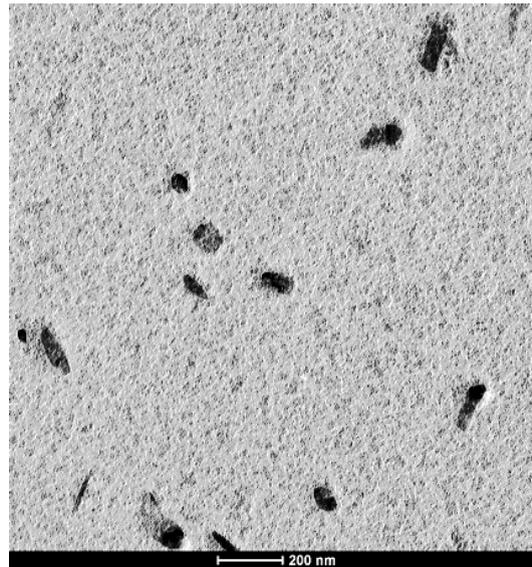


Figura 21 – Detalhe do campo 2, delimitado dentro do grão ferrítico e mostrado na Figura 19, com aumento de 29.000 X. Todos os carbonetos mostrados na imagem são do tipo M_2C .

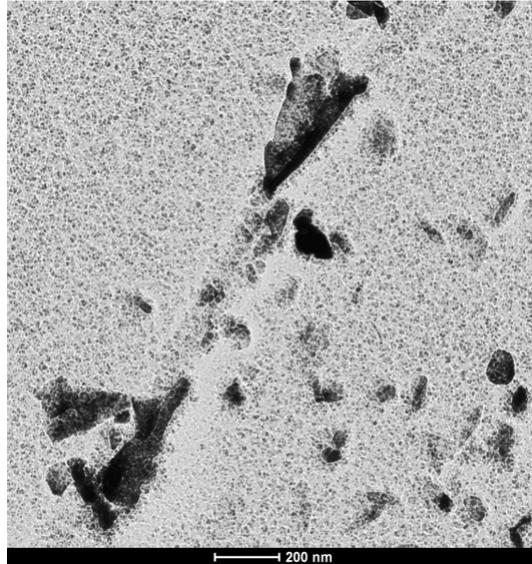


Figura 22 – Detalhe do campo 3, delimitado no contorno entre dois grãos ferríticos e mostrado na Figura 19, com aumento de 29.000 X. Todos os carbonetos mostrados na imagem são do tipo M₂C.

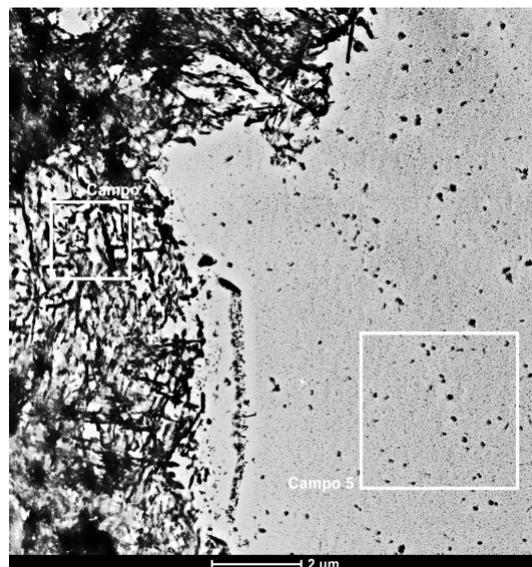


Figura 23 – Imagem de réplica da amostra composta por ferrita e perlita, com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 4 e 5.

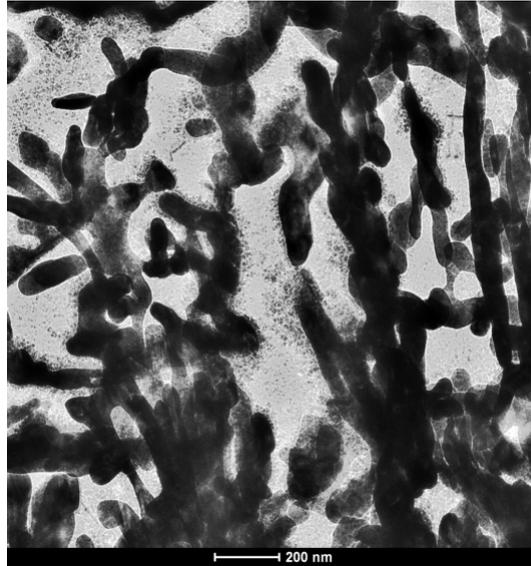
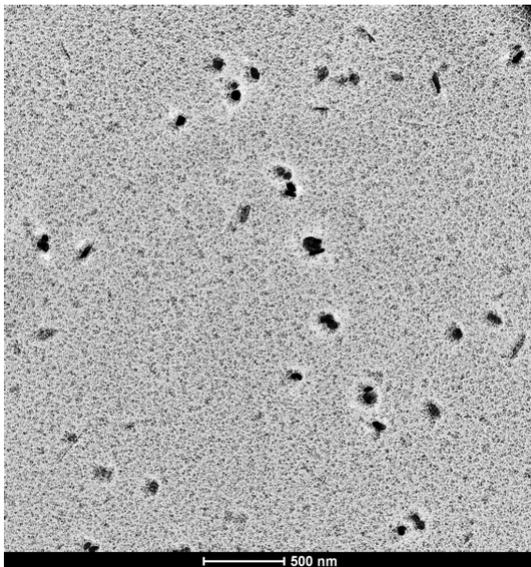
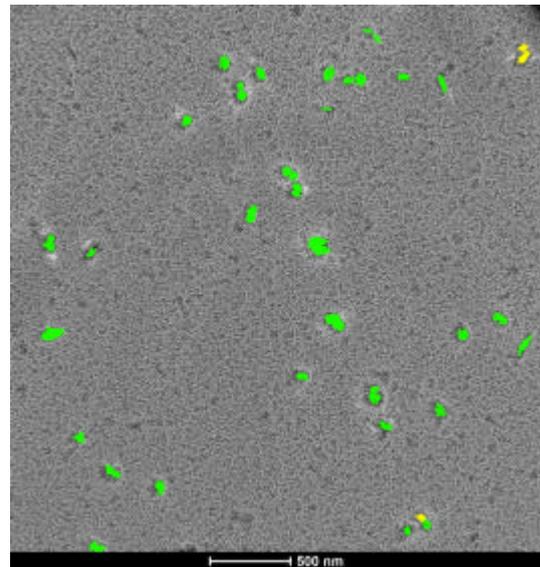


Figura 24 – Campo 4, dentro do campo perlítico e mostrado na Figura 23, com aumento de 38.000 X. Todos os carbonetos presentes são do tipo M_3C .



(a)



(b)

Figura 25 – (a) Campo 5, dentro do grão ferrítico e mostrado na Figura 23, com aumento de 15.000 X. Nota-se que a maioria dos carbonetos é do tipo M_2C (verde), embora apareça uma pequena quantidade de M_7C_3 (amarelo).

A Tabela 2 mostra os percentuais de cada tipo de precipitado presente no material ferrítico-perlítico novo.

Tabela 2 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita sem envelhecimento.

Campos	Região	M ₂ C	M ₃ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Perlita	–	74,24	0,08	1,64	1,15	22,88
2	Ferrita	1,69	–	–	–	–	98,31
3	Contorno	6,38	–	–	–	–	93,62
4	Perlita	–	84,80	–	–	–	15,20
5	Ferrita	1,14	–	0,06	–	–	98,79

5.2.2 Ferrita-bainita

A Figura 26 mostra a estrutura metalográfica do material ferrítico-bainítico sem envelhecimento. Pode-se notar a presença de bainita granular e ferrita em toda a região. A dureza medida teve média de 119±2 HV.

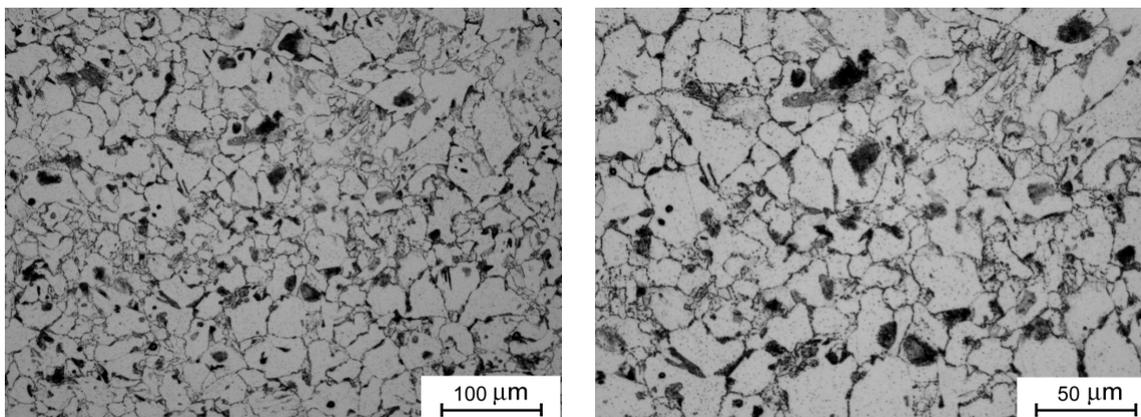


Figura 26 – Estrutura metalográfica do tubo na condição como recebido, apresentando bainita granular e regiões ferríticas, com ataque por nital 2%.

Em virtude do tamanho e da distribuição dos carbonetos presentes nos contornos de grão ferríticos e dentro da ferrita, os campos 1, 2 e 3, mostrados na Figura 27, foram grandes, de forma a se ter uma quantidade razoável de precipitados em cada um deles; já os campos 4 e 5, mostrados na Figura 31 e localizados dentro do emaranhado de carbonetos – que formam o grão bainítico –, são pequenos e contemplam quantidades equivalentes, ou até maiores, de precipitados. A Tabela 3 mostra os percentuais de cada tipo de precipitado presente no material de estrutura bainítica sem envelhecimento.

Nas regiões bainíticas, o carboneto mais comum no grão bainítico é o M₂₃C₆, que aparece com uma distribuição semelhante à da cementita no material perlítico, em forma de lamelas entrelaçadas e em meio a poucas quantidades de M₂C e de M₇C₃.

Na ferrita, o M_2C também é comum, como no caso do material ferrítico-perlítico, mas além dele aparecem os precipitados M_7C_3 , em pouca quantidade, e $M_{23}C_6$, de variados tamanhos. No contorno de grão analisado, de novo há $M_{23}C_6$, como no grão bainítico, mas coalescido. Muito próximos a esses carbonetos, há M_2C , no contorno e no grão ferrítico.

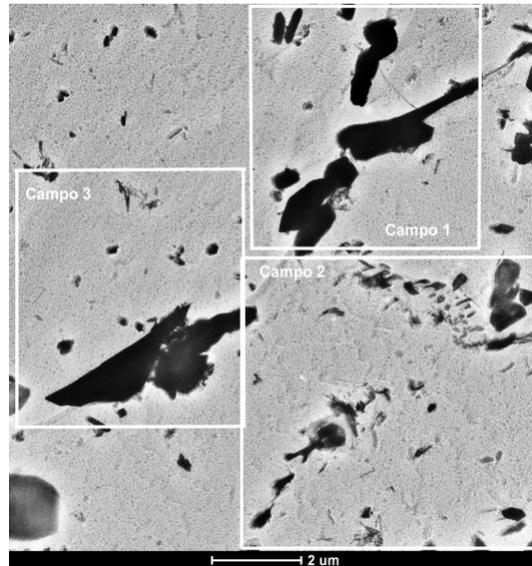


Figura 27 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica, sem envelhecimento e com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

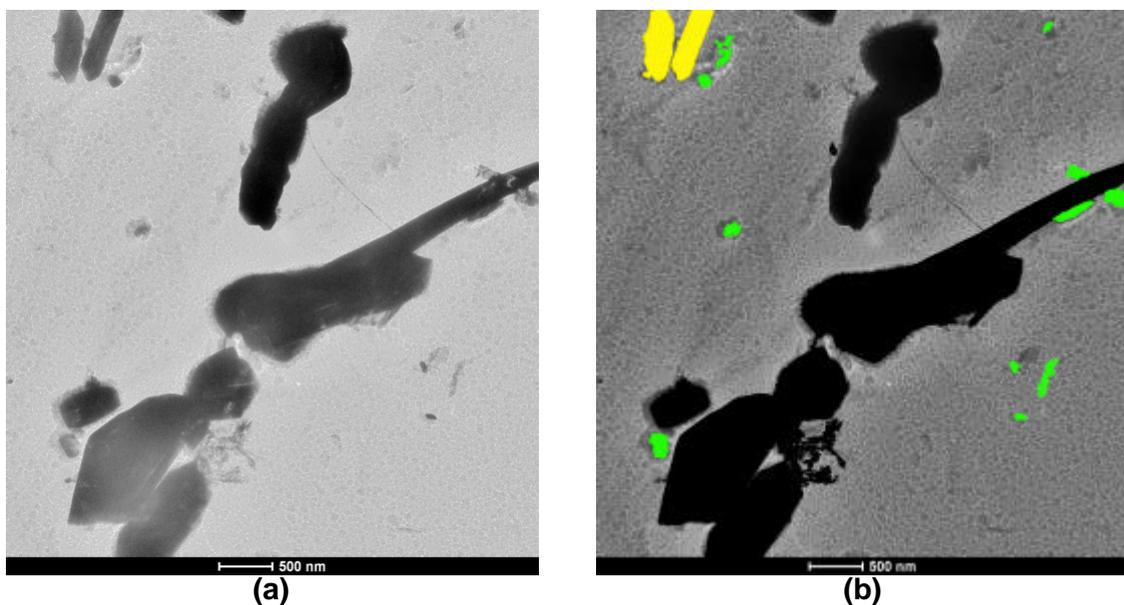


Figura 28 – (a) Campo 1 da Figura 27, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Podem-se notar precipitados do tipo $M_{23}C_6$ (preto), grandes e localizados no contorno de grão, além de M_2C (verde) e M_7C_3 (amarelo).

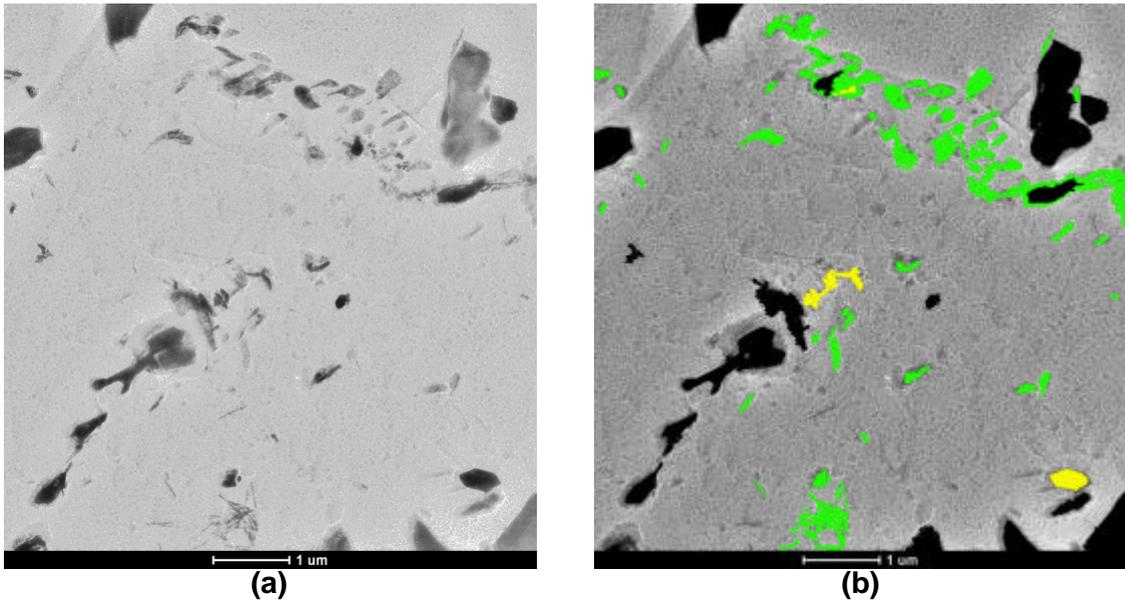


Figura 29 – (a) Campo 2 da Figura 27, com aumento de 7.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Tanto o $M_{23}C_6$ (preto) quanto o M_2C (verde) aparecem em grande quantidade, mas o M_2C se encontra finamente disperso. Além deles, há uma pequena quantidade de M_7C_3 .

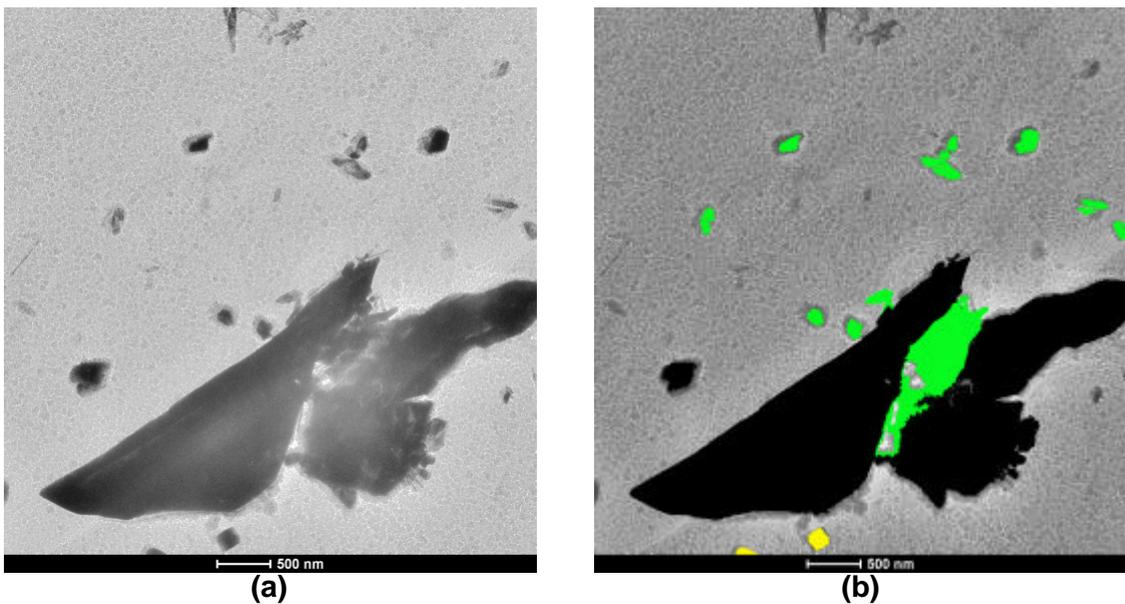


Figura 30 – (a) Campo 3 da Figura 27, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes: $M_{23}C_6$ (preto) grande e no contorno de grão, M_2C (verde) disperso e M_7C_3 (amarelo) em pequena quantidade.

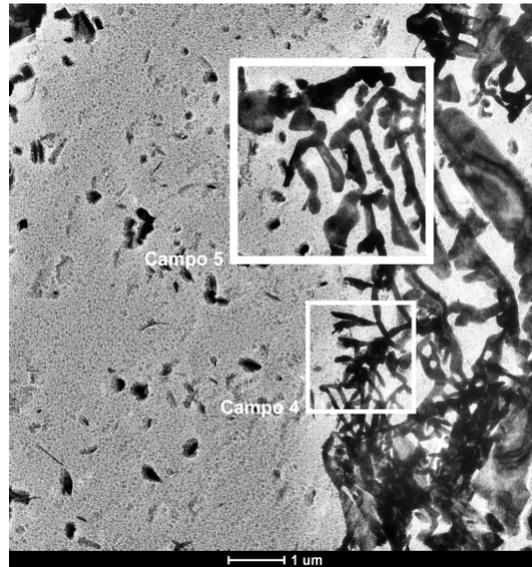


Figura 31 – Imagem de réplica da amostra composta por ferrita e bainita, sem envelhecimento e com aumento de 5.000 X, mostrando os campos 4 e 5.

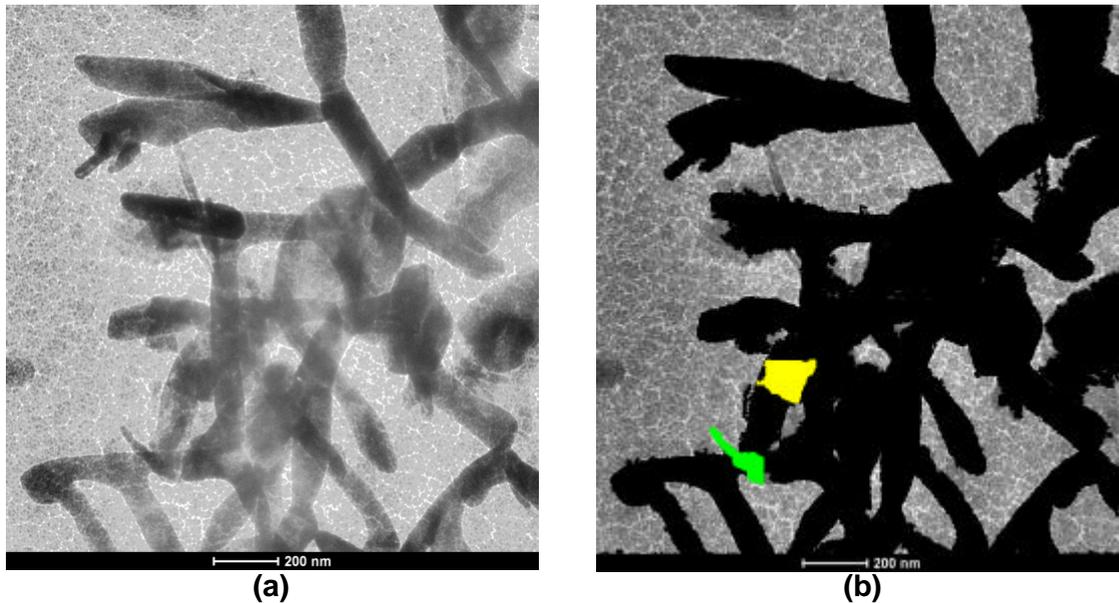


Figura 32 – (a) Campo 4 da Figura 31, com aumento de 29.000 X, e (b) carbonetos presentes. Nota-se grande quantidade de $M_{23}C_6$ (preto), além de M_2C (verde) e M_7C_3 (amarelo).

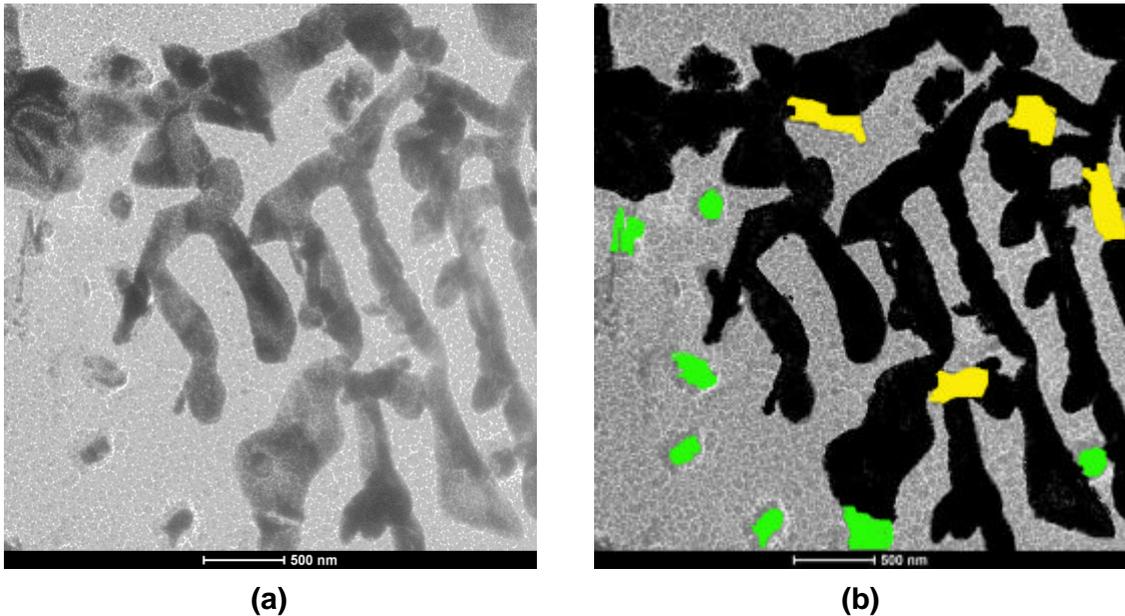


Figura 33 – (a) Campo 5, mostrado na Figura 31, com aumento de 15.000 X, mostrando grande quantidade de $M_{23}C_6$ (preto), além de M_2C (verde) e M_7C_3 (amarelo).

Tabela 3 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita sem envelhecimento.

Campos	Região	M_2C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Contorno	0,84	1,14	18,47	–	79,55
2	Ferrita	4,55	0,47	6,00	–	88,98
3	Ferrita	2,82	0,13	17,96	–	79,10
	Contorno	4,17	0,26	32,88	–	62,69
4	Bainita	1,01	–	52,73	–	46,26
5	Bainita	2,05	2,53	51,07	–	44,35

5.3 Material envelhecido a 550°C

5.3.1 Ferrita-perlita 100 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico envelhecido a 550°C por 100 horas é mostrada na Figura 34. Não se notam sinais de degradação da perlita ou de precipitação nos contornos de grão e o material pode ser classificado como no estágio A de degradação segundo o critério de Toft e Marsden [3], o que se deve à temperatura, mais baixa entre as três utilizadas, e ao tempo curto de exposição, insuficiente para promover qualquer degradação perceptível. Foram realizadas dez medições de dureza Vickers, que apresentaram média de 139 ± 1 HV.

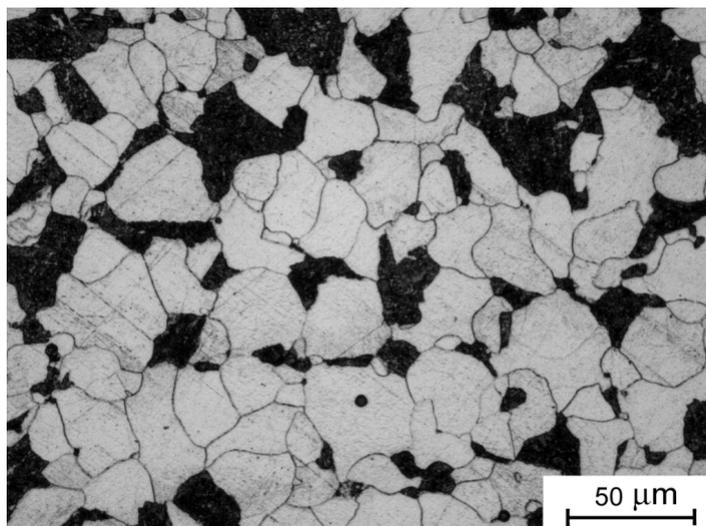


Figura 34 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita, após envelhecimento a 550°C por 100 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 35 e a Figura 36 mostram seis campos analisados, sendo dois em grãos perlíticos, um em grão ferrítico, um em um ponto tríplice e dois em contornos de grão. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo I.

A Tabela 4 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Nas regiões perlíticas, predomina o carboneto do tipo M_3C , o que está coerente com o observado por microscopia ótica. Na região ainda perlítica, mas mais próxima ao contorno de grão, a relação entre os precipitados presentes é levemente alterada: o M_3C continua sendo o mais comum, mas aparecem também o M_2C , o M_7C_3 , o $M_{23}C_6$ e o M_6C , todos em pequenas quantidades. Já no grão ferrítico, o carboneto mais comum é o M_2C . Também foram verificados os contornos de grão, sendo duas regiões em contornos simples entre dois grãos ferríticos e uma em um ponto tríplice. Nesta, se observa maioria de M_2C , tanto no contorno quanto na ferrita adjacente, um pequeno M_7C_3 e $M_{23}C_6$ coalescido. A mesma situação se repete no campo 5, sendo que o M_7C_3 também aparece coalescido.

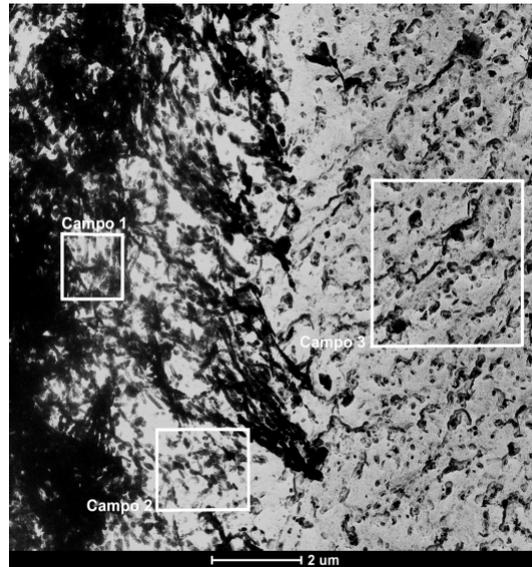


Figura 35 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por perlita e ferrita, envelhecida por 100 horas a 550°C, com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

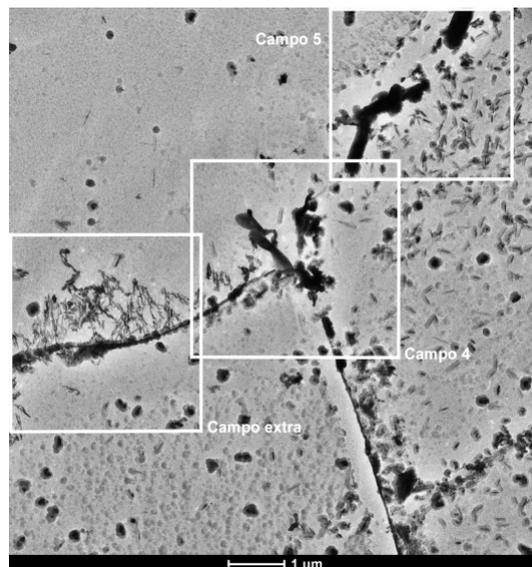


Figura 36 – Imagem de réplica da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida por 100 horas a 550°C, com aumento de 5.000 X, apresentando os campos 4, 5 e campo extra.

Tabela 4 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 100 horas a 550°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₃ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Perlita	–	85,91	–	0,93	0,46	12,70
2	Perlita	1,30	39,81	2,22	3,79	0,41	52,47
3	Ferrita	3,70	0,26	–	0,40	–	95,63
4	Contorno	15,42	–	0,04	3,90	–	80,64
5	Contorno	4,17	–	0,26	32,88	–	62,69
	Ferrita	8,53	–	–	–	–	91,47
6	Contorno	22,59	–	–	0,30	–	77,11

Na presente condição, há um sexto campo analisado em vez dos cinco convencionalmente escolhidos. Isso se deve à particular distribuição dos carbonetos observada no chamado campo extra da Figura 36 e mostrado em detalhes na Figura 37. Os precipitados se apresentam aglomerados na mesma direção. Há apenas um carboneto do tipo $M_{23}C_6$, muito pequeno e localizado no contorno de grão, enquanto todos os outros precipitados que aparecem no campo são do tipo M_2C , tanto os que estão no contorno quanto os localizados dentro dos grãos ferríticos.

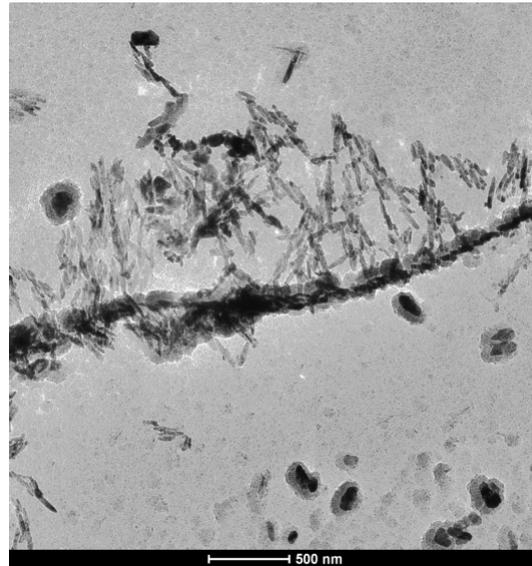


Figura 37 – Campo extra da Figura 36, com aumento de 15.000 X, mostrando a distribuição peculiar de precipitados M_2C alinhados em direção ao contorno de grão.

5.3.2 Ferrita-perlita 500 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico envelhecido a $550^{\circ}C$ por 500 horas é mostrada na Figura 38. Pode-se notar que começa a surgir precipitação nos contornos de grão e o processo de esferoidização da perlita já se iniciou. Dessa forma, o material pode ser classificado como estágio B de degradação segundo o critério de Toft e Marsden [3]. A dureza medida na amostra apresentou média de 141 ± 2 HV.

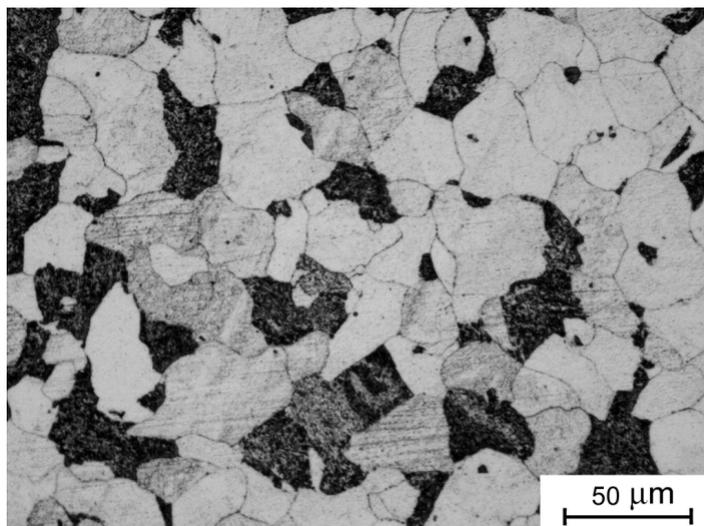


Figura 38 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita, após envelhecimento a 550°C por 500 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 39 e a Figura 40 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em grãos perlíticos, um exclusivamente em grão ferrítico, um em contorno entre perlita e ferrita, englobando maior parte de grão ferrítico e um em contorno entre dois grãos ferríticos. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo I.

A Tabela 5 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Nos campos perlíticos, há predominância absoluta de M_5C , embora suas lamelas se encontrem levemente fragmentadas em relação ao material novo e ao envelhecido por 100 horas, junto a quantidades muito pequenas de M_2C e desprezíveis de M_7C_3 e de M_6C . Nas áreas ferríticas, não há mudanças em relação às condições anteriores: a quase totalidade dos precipitados é do tipo M_2C , bem como nos contornos de grão. Duas regiões de contorno de grão foram analisadas. Entre dois grãos ferríticos, os precipitados são todos M_2C ; já entre um grão perlítico e um ferrítico, há, essencialmente, M_7C_3 e $M_{23}C_6$, coalescidos.

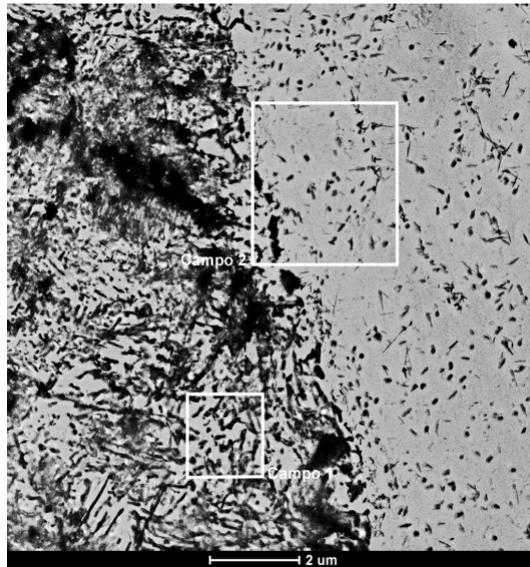


Figura 39 – Imagem de réplica da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 500 horas, com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1 e 2.

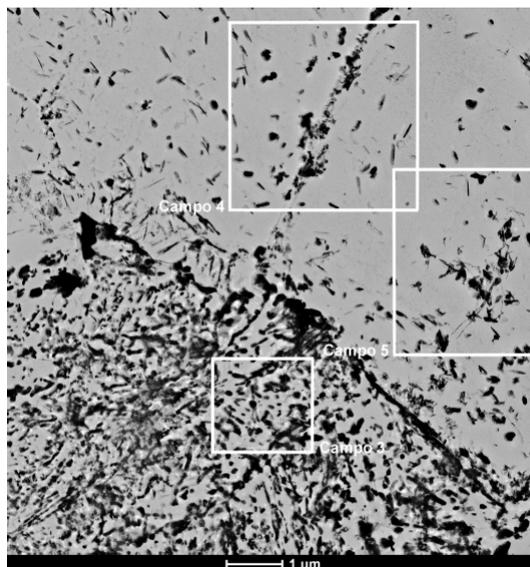


Figura 40 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 500 horas, com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 3, 4 e 5.

Tabela 5 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 500 horas a 550°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₃ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Perlita	2,04	58,07	0,44	–	1,98	37,47
2	Ferrita	7,30	0,27	–	–	–	92,44
	Contorno	1,06	4,50	4,80	5,24	0,16	84,25
3	Perlita	2,37	55,01	–	–	–	42,63
4	Contorno	10,05	1,16	0,16	–	–	88,64
5	Ferrita	10,71	–	0,02	0,40	–	88,88

5.3.3 Ferrita-perlita 1.000 horas

A estrutura metalográfica do material envelhecido a 550°C por 1.000 horas é mostrada na Figura 41. Não há mudanças significativas em relação à condição anterior, de envelhecimento por 500 horas. Nota-se a continuidade dos processos de precipitação nos contornos e de esferoidização da perlita, embora ambos ainda estejam em início. Nesse caso, o material ainda pode ser classificado como estágio B de degradação segundo o critério de Toft e Marsden [3]. A dureza da amostra teve média de 142 ± 2 HV.

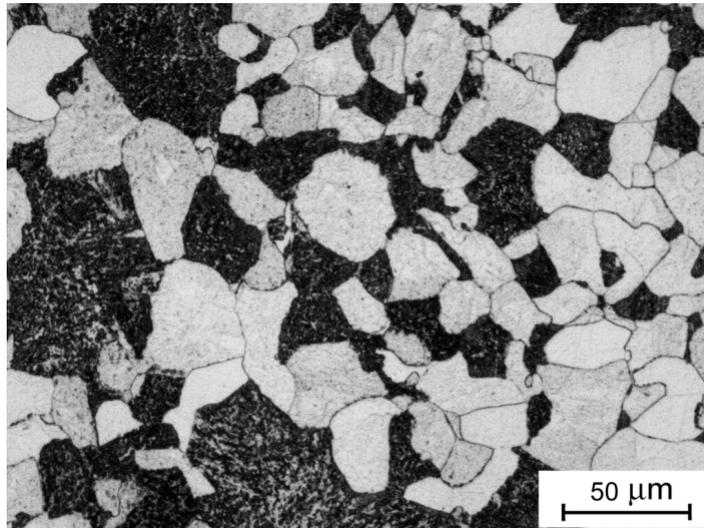


Figura 41 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita, após envelhecimento a 550°C por 1.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 42 mostra os cinco campos analisados, sendo dois em regiões perlíticas, um em contorno entre um grão perlítico e um ferrítico, um em um ponto tríplice entre três grãos ferríticos e um em área completamente ferrítica. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo I.

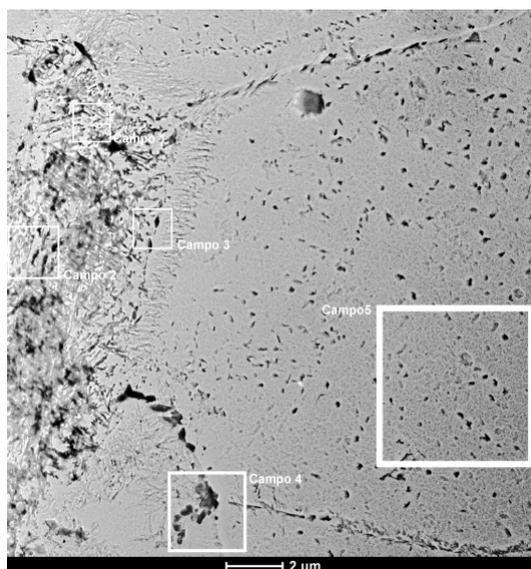


Figura 42 – Imagem da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 1.000 horas e com aumento de 2.550 X, mostrando os campos analisados.

Ao longo dos contornos entre o grão perlítico e os ferríticos e também entre duas regiões ferríticas, aparece uma distribuição de carbonetos semelhante à mostrada na Figura 37: os precipitados M_2C se encontram alinhados em direção ao contorno. Nas regiões próximas aos campos 3 e 4, há áreas empobrecidas em precipitação seguidas da grande concentração de M_2C .

A Tabela 6 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Nas regiões perlíticas, há predominância de M_3C e pequenas quantidades de M_2C e de M_6C . Na ferrita, aparece apenas o M_2C , enquanto, nos contornos observados, há mais M_2C , M_7C_3 e $M_{23}C_6$, além de quantidade muito pequena de M_3C e de M_6C .

Tabela 6 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 1.000 horas a 550°C.

Campos	Região	M_2C	M_3C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Perlita	3,84	47,52	–	–	0,83	47,81
2	Perlita	1,83	62,93	–	–	0,71	43,52
3	Contorno	1,92	1,60	6,82	–	–	66,66
4	Contorno	11,32	–	2,90	15,45	0,93	69,40
5	Ferrita	17,20	–	–	–	–	96,80

5.3.4 Ferrita-perlita 2.000 horas

A Figura 43 mostra a estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico

envelhecido a 550°C por 2.000 horas. Não se notam diferenças significativas entre esta e as microestruturas anteriores e o material ainda pode ser classificado como estágio B de degradação segundo o critério de Toft e Marsden [3]. A dureza se mantém estável, com média de 146±2 HV.

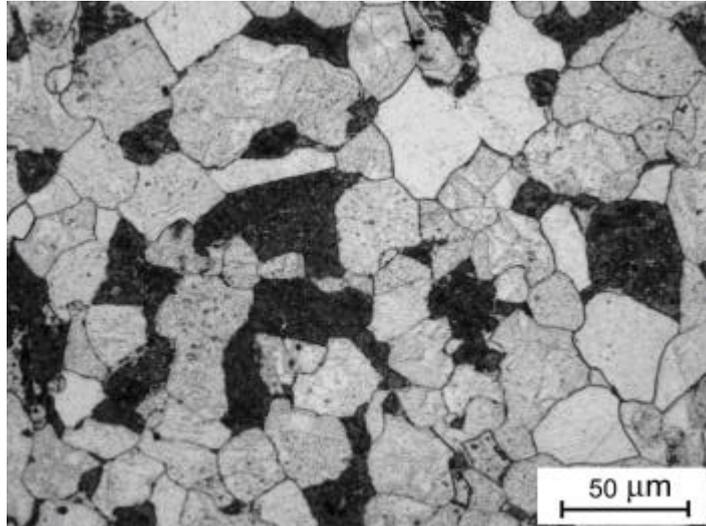


Figura 43 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-perlítica, após envelhecimento a 550°C por 2.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 44 e a Figura 45 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em regiões perlíticas, dois em áreas ferríticas e um em contorno de grão. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores a cada tipo de carboneto podem ser vistos no Anexo I.

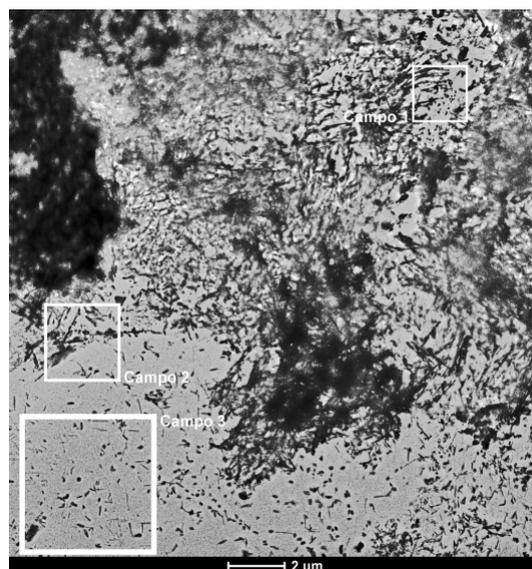


Figura 44 – Imagem de réplica da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 2.000 horas, com aumento de 2.550 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

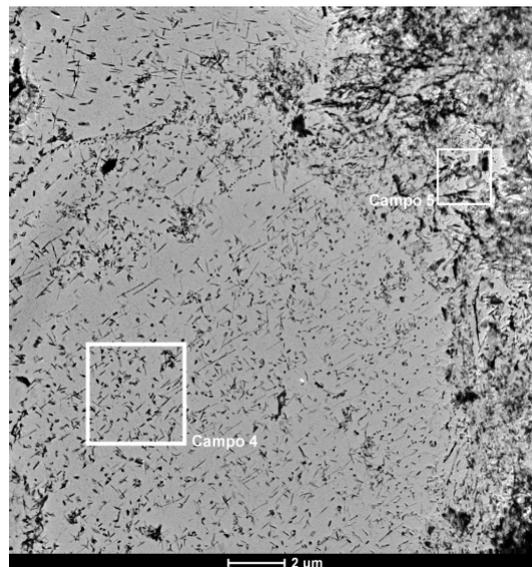


Figura 45 – Imagem de réplica da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 2.000 horas, com aumento de 2.550 X, mostrando os campos 4 e 5.

A Tabela 7 apresenta os resultados das contagens de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos analisados. Pode-se observar que, na perlita, predomina o M_3C , que aparece junto a quantidades razoáveis de M_2C e poucos carbonetos M_7C_3 e M_6C . Já na ferrita, há M_2C e muito pouco M_7C_3 . No contorno, estão presentes M_2C , M_3C e $M_{23}C_6$.

Tabela 7 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 2.000 horas a 550°C.

Campos	Região	M_2C	M_3C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Perlita	13,40	53,55	–	–	–	54,87
2	Contorno	2,96	10,47	–	1,60	–	60,19
3	Ferrita	11,00	–	0,94	–	–	91,02
4	Ferrita	22,20	–	–	–	–	77,80
5	Perlita	14,16	40,13	6,17	–	5,23	34,30

5.3.5 Ferrita-bainita 100 horas

A Figura 46 mostra a estrutura metalográfica do material ferrítico-bainítico envelhecido a 550°C por 100 horas. Nota-se que toda a região é bastante uniforme, apresentando bainita granular com emaranhados de precipitados, não apresentando diferenças em relação à do material novo que sejam perceptíveis com microscopia ótica. A dureza da amostra nessa condição apresentou média de 126 ± 1 HV, superior à

verificada no material bainítico novo.

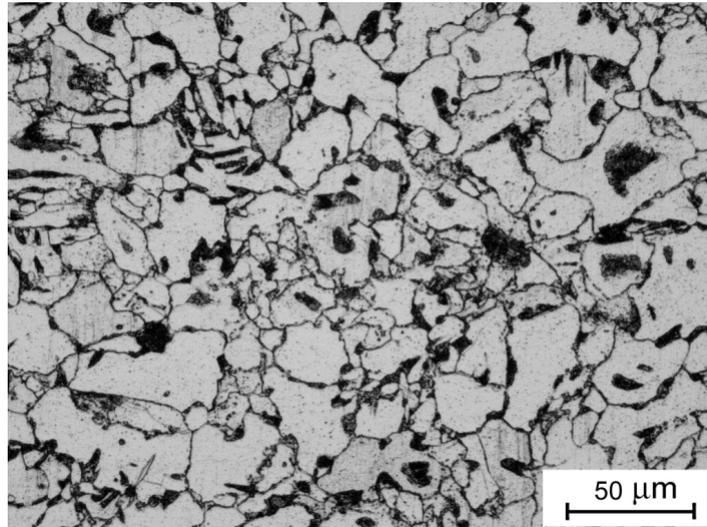


Figura 46 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-bainítica, após envelhecimento a 550°C por 100 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 47 e a Figura 48 mostram os cinco campos analisados. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo I. A Tabela 8 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados.

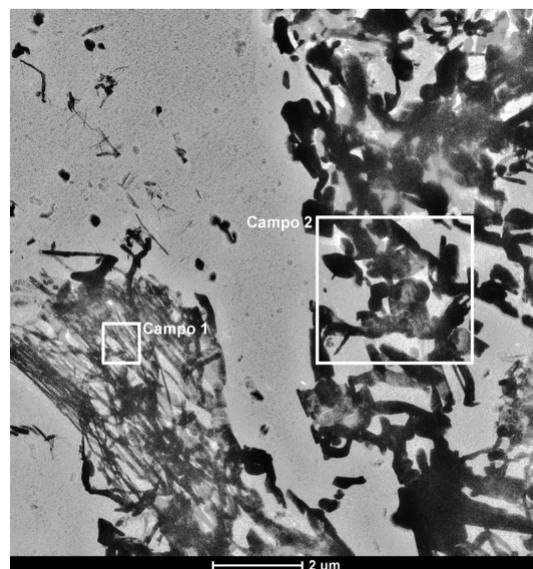


Figura 47 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por bainita e ferrita, envelhecida a 550°C por 100 horas e com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1 e 2.

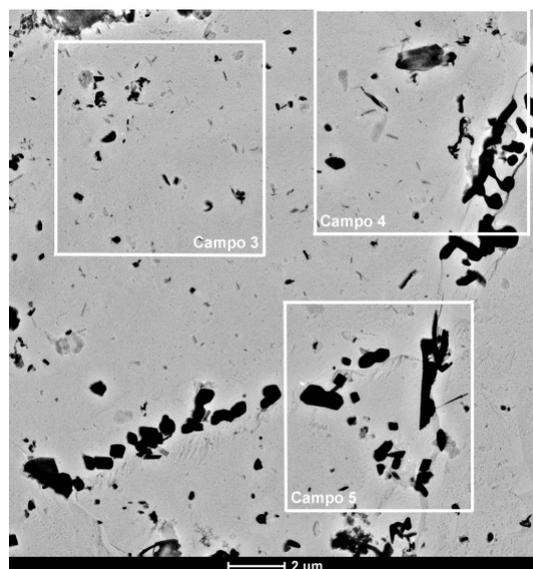


Figura 48 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por bainita e ferrita, envelhecida a 550°C por 100 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 3, 4 e 5.

Tabela 8 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 100 horas a 550°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Bainita	0,89	2,95	74,82	–	21,34
2	Bainita	–	–	68,52	–	31,47
3	Ferrita	2,63	6,5 x 10 ⁻⁴	0,84	–	96,50
4	Ferrita	0,01	–	6,16	–	93,83
	Contorno	0,07	–	32,62	–	67,31
5	Contorno	0,63	0,51	10,03	–	88,83

Nos grãos bainíticos, está presente o carboneto do tipo M₂₃C₆ predominantemente, com poucas quantidades de M₂C e de M₇C₃. Na ferrita, diferentemente do material ferrítico-perlítico, não há hegemonia completa do M₂C. Também estão presentes o M₇C₃ e o M₂₃C₆, o carboneto mais comum no material bainítico (em torno de 70% na bainita e de 11% na ferrita). Nos contornos de grão analisados, também predomina o M₂₃C₆, em forma de blocos e emaranhados, com pouca presença de M₂C e de M₇C₃. O M₆C não apareceu em nenhum dos campos analisados.

5.3.6 Ferrita-bainita 500 horas

A Figura 49 apresenta a estrutura metalográfica do material ferrítico-bainítico envelhecido a 550°C por 500 horas. Com microscopia ótica, é possível observar um

sutil aumento de precipitação nos grãos ferríticos e nos contornos de grão em comparação com o material envelhecido a 550°C por 100 horas (Figura 46). A dureza relativa a essa condição de envelhecimento teve média de 129 ± 1 HV.

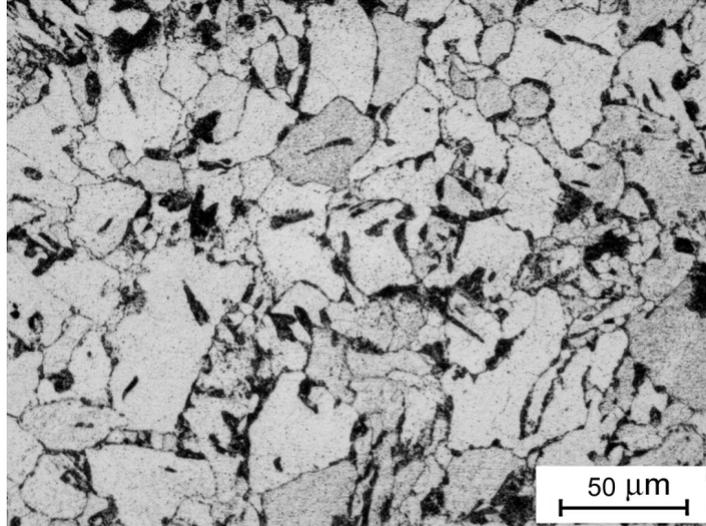


Figura 49 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-bainítica, após envelhecimento a 550°C por 500 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 50 e a Figura 51 mostram os cinco campos selecionados para análise, sendo dois em grãos bainíticos, dois em grãos ferríticos e um em contorno de grão. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo I.

A Tabela 9 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos campos escolhidos. A predominância de $M_{23}C_6$ nas áreas bainíticas ainda é marcante, mas a quantidade de M_2C aumentou em comparação com o envelhecimento por 100 horas; também há a presença de M_3C e de pequenas quantidades de M_7C_3 e de M_6C . Dentro da ferrita, a configuração é a mesma das condições anteriores para o material bainítico: há M_2C disperso, fino e em forma de emaranhados, junto ao $M_{23}C_6$, que aparece em forma de blocos, e a poucas quantidades de M_7C_3 .

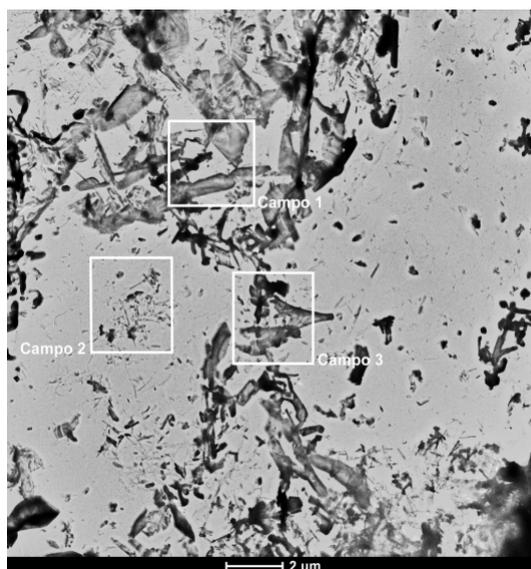


Figura 50 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e bainita, envelhecida a 550°C por 500 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

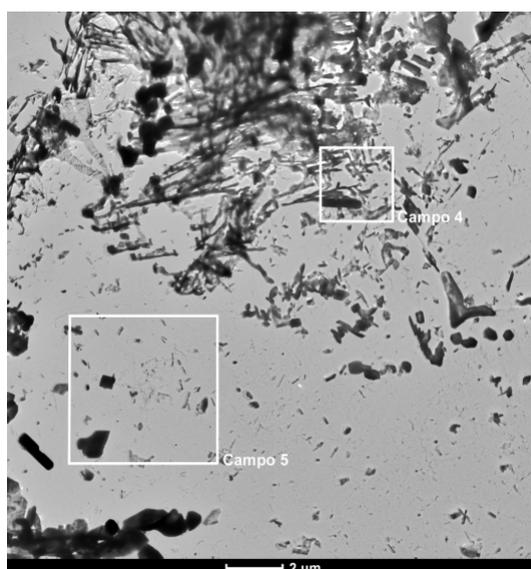


Figura 51 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e bainita, envelhecida a 550°C por 500 horas e com aumento de 2.250X, mostrando os campos 4 e 5.

Tabela 9 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 500 horas a 550°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Bainita	22,82	1,41	34,26	–	41,34
2	Ferrita	14,33	–	0,97	–	84,69
3	Contorno	2,74	1,46	31,50	–	64,30
4	Bainita	3,37	–	65,85	0,42	30,78
5	Ferrita	2,99	1,00	5,35	–	90,64

5.3.7 Ferrita-bainita 1.000 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-bainítico envelhecido a 550°C por 1.000 horas é mostrada na Figura 52. A região em questão se apresenta uniforme, com grãos ferríticos grandes e emaranhados de carbonetos, não apresentando diferenças em comparação com a condição do item anterior. A dureza da amostra submetida a essa condição de envelhecimento apresentou média de 129±2 HV.

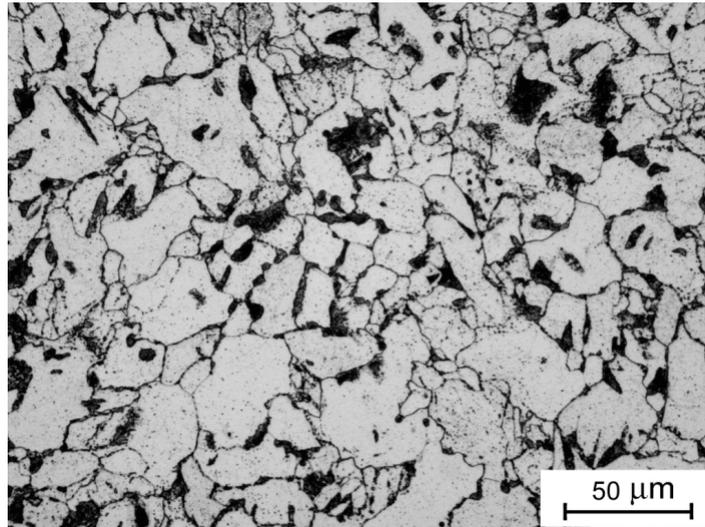


Figura 52 – Metalografia da amostra de estrutura bainítica, após envelhecimento a 550°C por 1.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 53 e a Figura 54 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em grãos bainíticos, dois em regiões de contorno e um em área ferrítica. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo I.

A Tabela 10 apresenta os resultados das contagens de cada tipo de precipitado presente nos campos analisados. Na bainita, predomina o $M_{23}C_6$ com poucos carbonetos dos tipos M_2C e M_6C . Na ferrita, há M_2C , que aparece junto a pequenas quantidades de M_4C_3 e de $M_{23}C_6$. No contorno, as proporções são semelhantes às medidas nas regiões bainíticas, com a adição de pequena quantidade de M_6C .

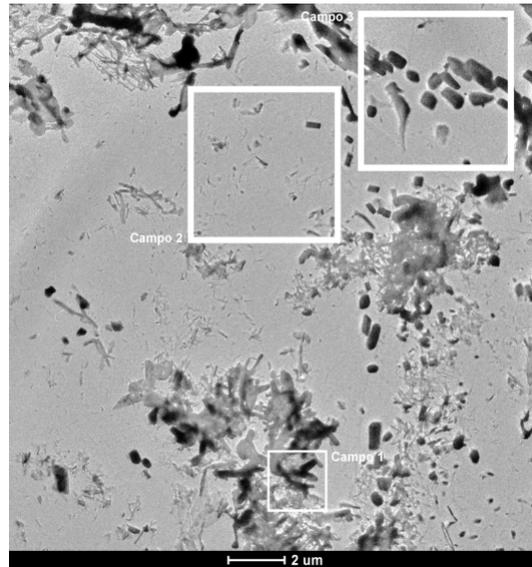


Figura 53 – Imagem da amostra composta por bainita envelhecida a 550°C por 1.000 horas e com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

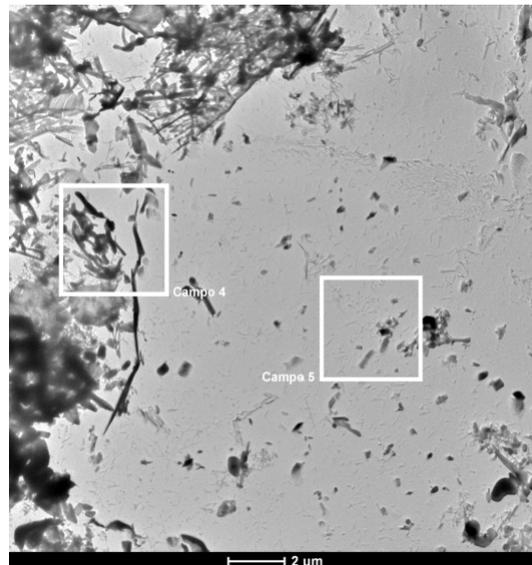


Figura 54 – Imagem da amostra composta por bainita envelhecida a 550°C por 1.000 horas e com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 4 e 5.

Tabela 10 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 1.000 horas a 550°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Bainita	7,21	1,28	63,97	–	27,55
2	Ferrita	5,97	0,84	0,47	–	92,71
3	Contorno	2,49	0,55	27,36	0,39	77,27
4	Bainita	1,75	3,97	23,67	0,19	56,90
5	Ferrita	11,67	1,21	4,68	–	82,44

5.3.8 Ferrita-bainita 2.000 horas

A Figura 55 mostra a estrutura metalográfica do material bainítico envelhecido a 550°C por 2.000 horas. Podem-se observar apenas diferenças sutis em comparação às condições anteriores, notadamente, aumento de precipitação nas regiões ferríticas. A dureza da amostra submetida a essa condição de envelhecimento apresentou média de 132±1 HV.

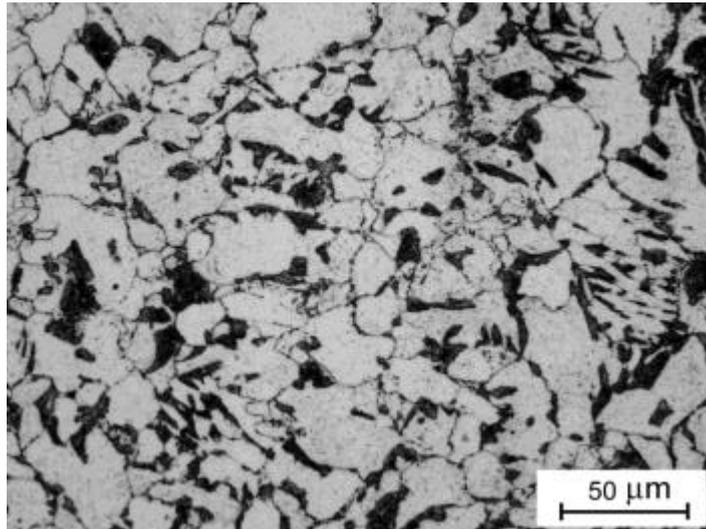


Figura 55 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-bainítica, após envelhecimento a 550°C por 2.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 56 e a Figura 57 mostram os cinco campos analisados da amostra de estrutura ferrítico-bainítica envelhecida a 550°C por 2.000 horas. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados podem ser vistos no Anexo I.

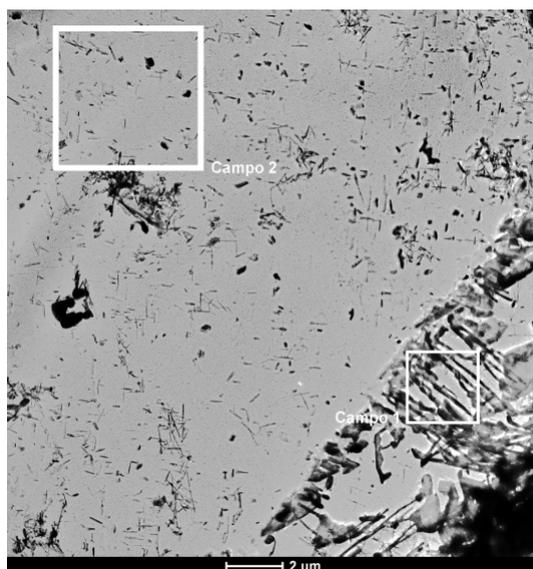


Figura 56 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecida a 550°C por 2.000 horas, com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 1 e 2.

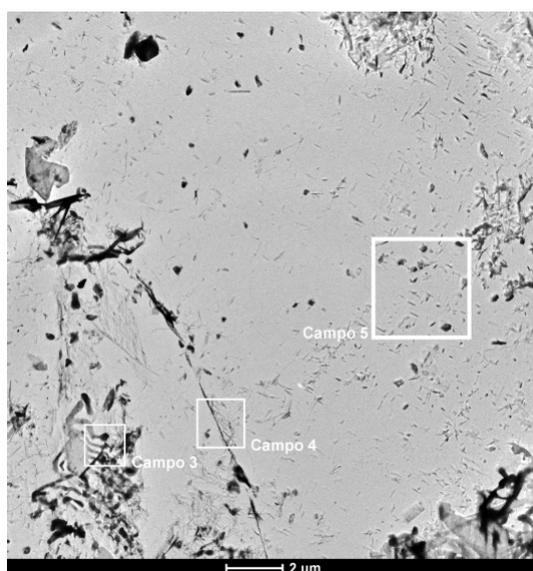


Figura 57 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecida a 550°C por 2.000 horas, com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 3, 4 e 5.

No campo 4, apresentado em detalhes na Figura 58, foi observada, novamente, a distribuição de aglomerados alinhados de carbonetos do tipo M_2C , tal qual a mostrada para o material ferrítico-perlítico envelhecido a 550°C por 100 horas e descrita no item 5.3.1.

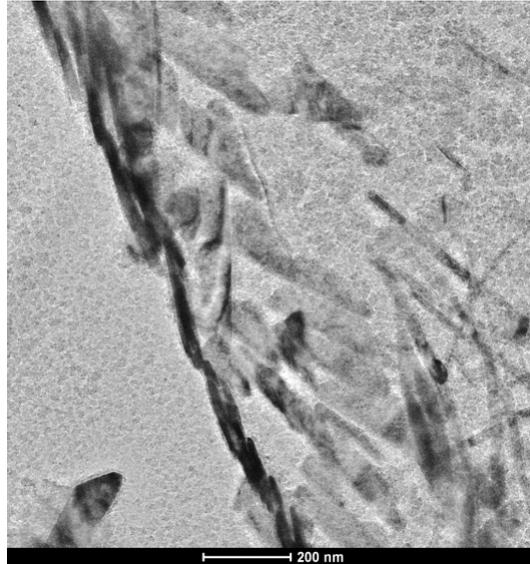


Figura 58 – Campo 4 da Figura 57, com aumento de 38.000 X, mostrando a distribuição do M_2C aglomerados e alinhados.

A Tabela 11 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos campos escolhidos. Nos campos selecionados dentro dos grãos bainíticos, o carboneto mais comum é o $M_{23}C_6$, com a presença de pequenas quantidades de M_2C . Na ferrita, a configuração é inversa: o M_2C é o mais comum e há pequenas quantidades de $M_{23}C_6$.

Tabela 11 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 2.000 horas a 550°C.

Campos	Região	M_2C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Bainita	1,62	–	52,44	–	32,83
2	Ferrita	4,03	0,04	1,57	–	94,37
3	Bainita	16,92	13,78	39,73	–	29,58
4	Contorno	33,59	–	13,11	–	66,44
5	Ferrita	10,69	–	1,15	–	88,16

5.4 Material envelhecido a 575°C

5.4.1 Ferrita-perlita – 100 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico envelhecido a 575°C por 100 horas é mostrada na Figura 59. A região apresenta início do processo de esferoidização da cementita e de precipitação em contornos de grão e pode ser

classificada como estágio B de degradação segundo o critério de Toft e Marsden [3]. A dureza da amostra apresentou média de 140 ± 1 HV.

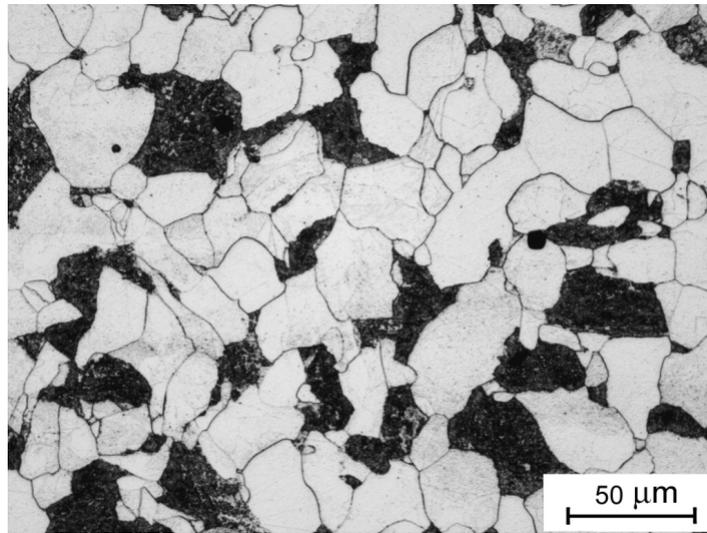


Figura 59 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita, após envelhecimento a 575°C por 100 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 60 mostra os cinco campos analisados, sendo dois em regiões perlíticas, dois em grãos ferríticos e um em contorno. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo II.

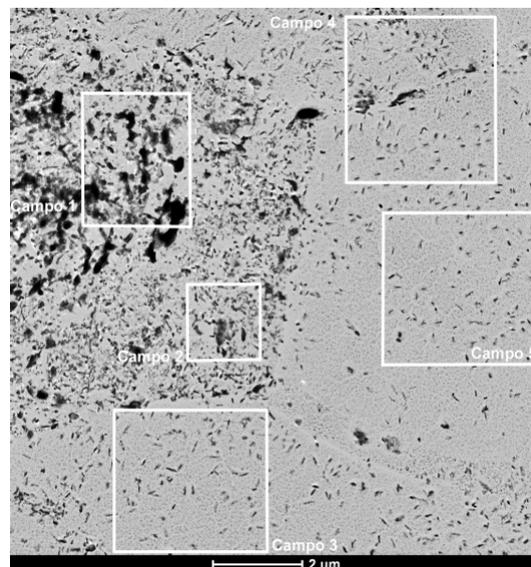


Figura 60 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 100 horas, com aumento de 4.000 X, apresentando cinco campos.

A Tabela 12 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos campos escolhidos. Nos campos selecionados dentro dos grãos

perlíticos, a cementita se encontra muito fragmentada, ainda que seja o precipitado mais presente. Também aparecem o M_2C , o M_7C_3 , o $M_{23}C_6$ e o M_6C , sendo que, destes, o $M_{23}C_6$ é o mais comum. Ainda no grão perlítico, mas próximo ao contorno, há pouca quantidade de cementita. Nesta região, o carboneto mais comum é o $M_{23}C_6$, que se encontra coalescido e disperso na matriz ferrítica. Além dele, aparecem os carbonetos M_2C , M_7C_3 e o M_6C . Na ferrita, predomina o M_2C junto a quantidades muito pequenas de $M_{23}C_6$ e de M_6C . Já no contorno de grão analisado, aparecem apenas o M_2C e pequena quantidade de M_6C .

Tabela 12 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 100 horas a 575°C.

Campos	Região	M_2C	M_3C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Perlita	1,95	33,99	0,42	12,10	2,80	48,74
2	Perlita	9,48	3,99	3,95	16,70	2,22	63,64
3	Ferrita	4,43	–	–	–	–	95,57
4	Contorno	6,76	–	–	–	0,87	92,37
5	Ferrita	2,79	–	–	0,06	0,08	97,08

5.4.2 Ferrita-perlita – 500 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico envelhecido a 575°C por 500 horas é mostrada na Figura 61. Não se notam diferenças em relação à condição anterior e a classificação, segundo o critério de Toft e Marsden [3], ainda é de estágio B de degradação. A dureza do material submetido a essa condição apresentou média de 144 ± 2 HV.

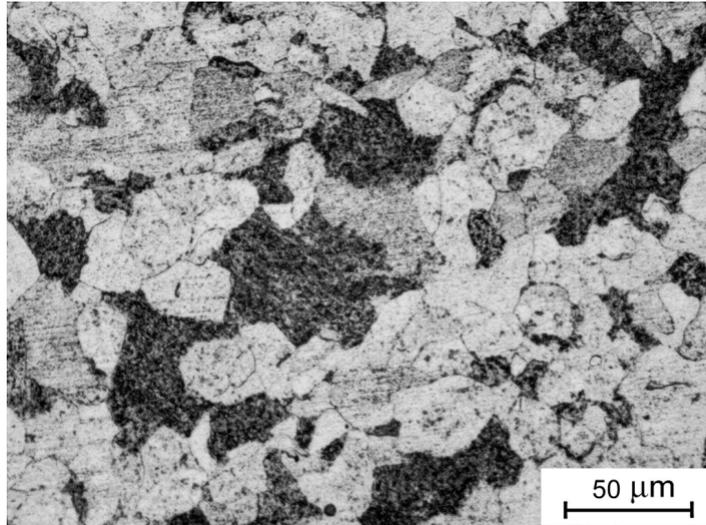


Figura 61 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita, após envelhecimento a 575°C por 500 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 62 e a Figura 64 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em grãos perlíticos, dois em regiões ferríticas e um englobando um ponto tríplice e partes de perlita e de ferrita. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo II.

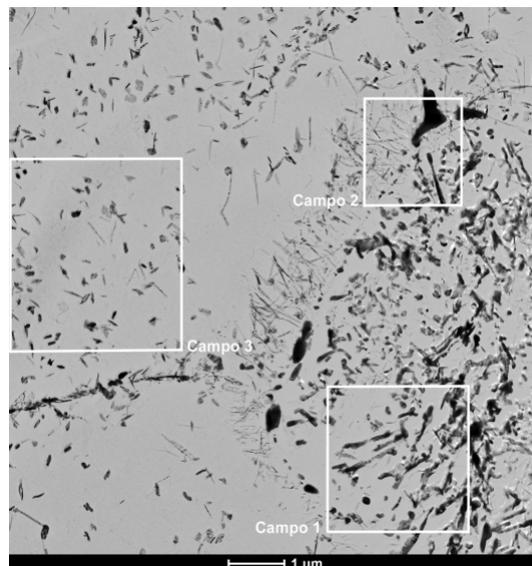


Figura 62 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 500 horas, com aumento de 5.000 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

No campo 2, pode-se observar a mesma configuração de distribuição de carbonetos do campo extra da ferrita-perlita envelhecida a 550°C por 100 horas. Dentro dos grãos ferríticos, há uma região empobrecida em precipitação, seguida de distribuição de carbonetos dos tipos M_2C , que predomina e aparece em forma de

aglomerados alinhados, e M_7C_3 , também alinhado em direção ao contorno entre o grão ferrítico e o perlítico.

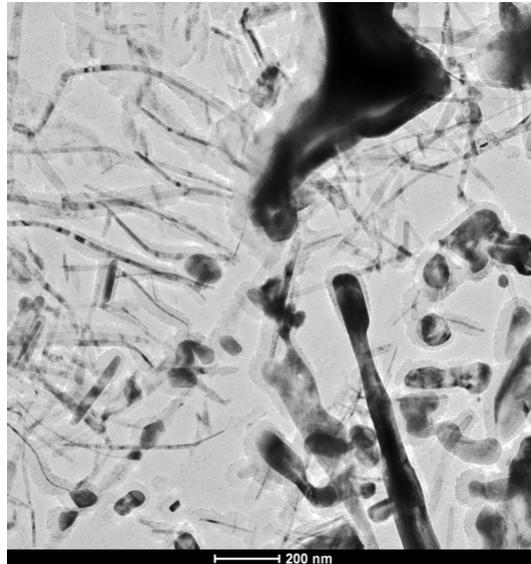


Figura 63 – Campo 2 da Figura 62, com aumento de 29.000 X, mostrando o alinhamento do M_2C em direção ao contorno de grão.

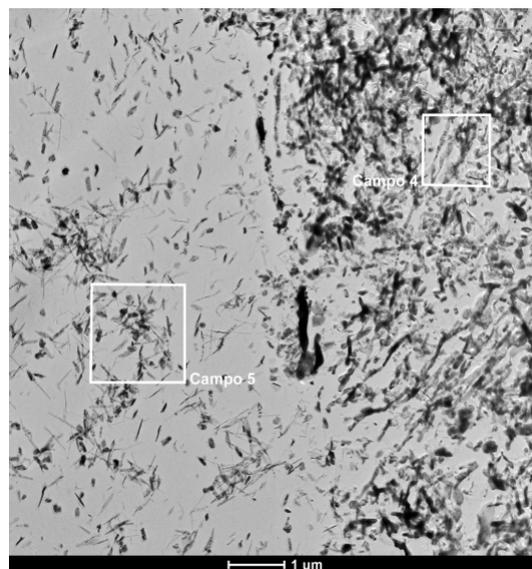


Figura 64 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 500 horas, com aumento de 5.000 X, apresentando os campos 4 e 5.

A Tabela 13 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos campos escolhidos. Nos campos selecionados dentro dos grãos perlíticos, predominam os carbonetos M_3C , fragmentados e formando lamelas, com razoáveis quantidades de M_2C ; na ferrita, predomina o M_2C junto a quantidades desprezíveis de M_3C e de $M_{23}C_6$. Já no contorno de grão analisado, aparecem apenas

o M_2C e M_7C_3 .

Tabela 13 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 500 horas a 575°C.

Campos	Região	M_2C	M_3C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Perlita	13,38	23,23	–	4,47	–	61,15
2	Contorno	2,23	0,09	8,18	–	–	85,04
3	Ferrita	13,30	0,06	–	0,17	–	88,70
4	Perlita	7,35	53,72	1,23	0,14	–	37,57
5	Ferrita	41,31	–	–	–	–	58,69

5.4.3 Ferrita-perlita – 1.000 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico envelhecido a 575°C por 1.000 horas é mostrada na Figura 65. Em comparação com a condição anterior, já se pode notar que não há mais lamelas de cementita, o que, segundo o critério de Toft e Marsden [3], permite que se classifique a estrutura entre os estágios C e D de degradação. A dureza do material submetido a essa condição apresentou média de 145 ± 1 HV.

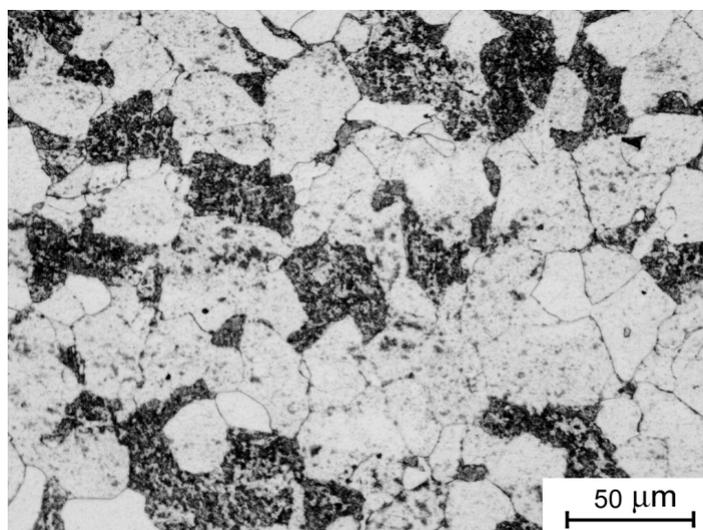


Figura 65 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-perlítica, após envelhecimento a 575°C por 1.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 66 e a Figura 67 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em grãos perlíticos, dois em regiões ferríticas e um num contorno entre um grão ferrítico e um perlítico. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo II.

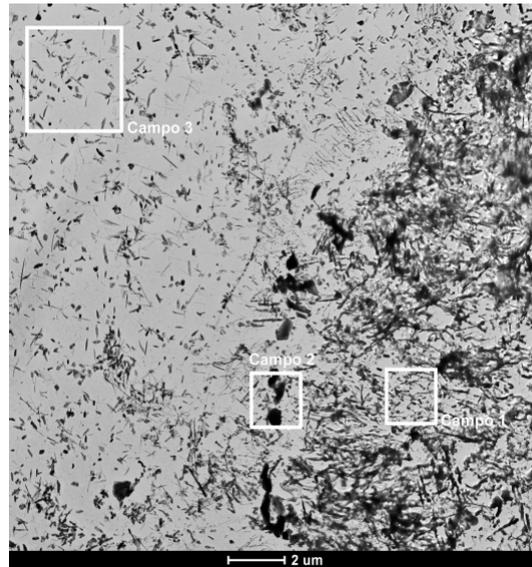


Figura 66 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 1.000 horas, com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

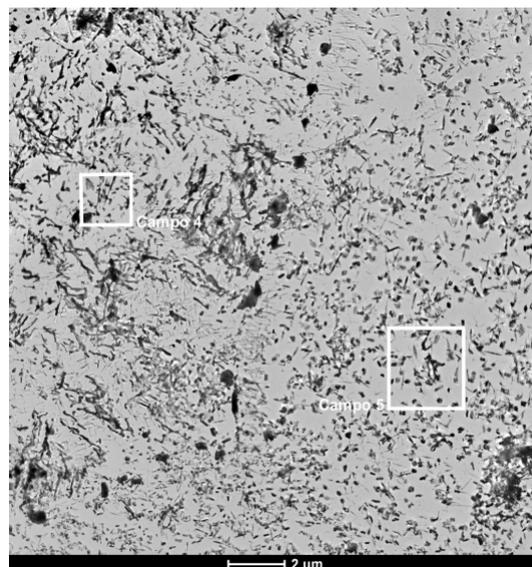


Figura 67 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 1.000 horas, com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 4 e 5.

A Tabela 14 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Nos grãos perlíticos, o M_3C se encontra espaçado e fragmentado. Os carbonetos do tipo M_2C aumentaram em quantidade em comparação às condições anteriores, aparecendo em forma acicular em meio à cementita, e os do tipo M_7C_3 e $M_{23}C_6$ aparecem em pouca quantidade, mas maiores. Nos grãos ferríticos, continuam predominando os precipitados M_2C , com pouca quantidade de M_3C , de M_7C_3 e de $M_{23}C_6$. No contorno de grão analisado, aparecem os carbonetos M_3C e $M_{23}C_6$ coalescidos e associados à presença de M_2C , de forma

semelhante ao descrito nos itens anteriores.

Tabela 14 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 1.000 horas a 575°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₃ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Perlita	17,24	45,49	–	–	–	37,26
2	Contorno	29,87	19,85	14,04	9,12	–	27,12
3	Ferrita	17,54	0,91	0,45	0,16	–	80,94
4	Perlita	14,85	26,23	–	3,35	–	55,58
5	Ferrita	25,47	1,07	–	2,83	–	70,64

5.4.4 Ferrita-perlita – 2.000 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico envelhecido a 575°C por 2.000 horas é mostrada na Figura 68. De acordo com o critério de degradação de Toft e Marsden [3], a microestrutura pode ser classificada como pertencente ao estágio E devido à esferoidização completa da cementita. A dureza da amostra submetida a essa condição de envelhecimento apresentou média de 144±2 HV.

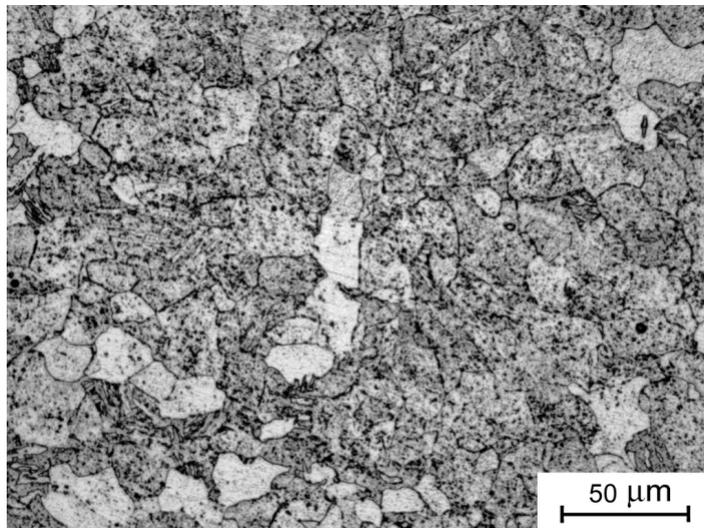


Figura 68 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-perlítica, após envelhecimento a 575°C por 2.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 69 e a Figura 70 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em grãos ferríticos, dois em regiões perlíticas degradadas e um em contorno de grão. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados podem ser visualizados no Anexo II.

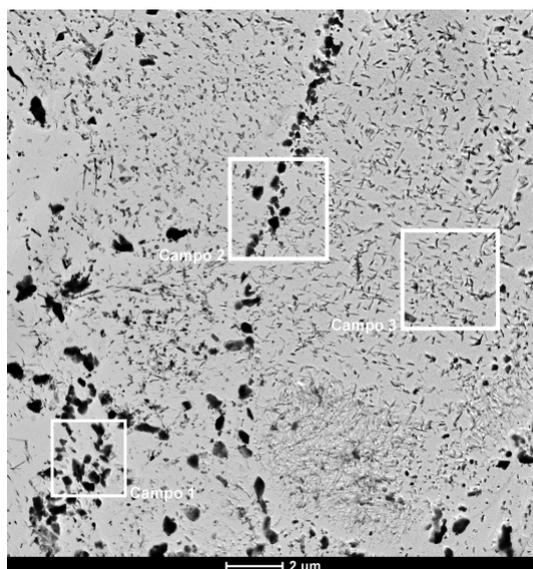


Figura 69 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 2.000 horas, com aumento de 2.550 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

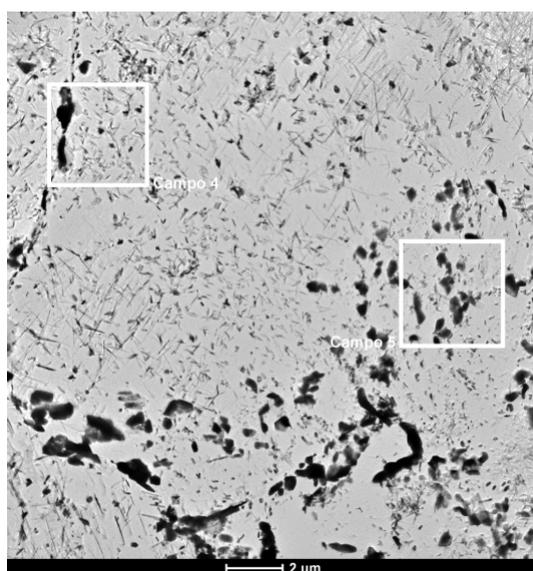


Figura 70 – Imagem de réplica da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 2.000 horas, com aumento de 2.550 X, apresentando os campos 4 e 5.

A análise por MET mostrou que as regiões que eram originalmente perlíticas, já não apresentam nenhum sinal da estrutura lamelar característica da cementita, como pode ser visto nas Figuras acima. A diferenciação entre estas áreas e os grãos ferríticos se dá, primeiramente, pela morfologia dos carbonetos, que são globulares na perlita degradada e continuam aciculares na ferrita, e pela estequiometria dos mesmos, posteriormente verificada via EDS.

A Tabela 15 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Nas regiões anteriormente compostas por perlita, há pouca quantidade de M_2C junto a quantidades equivalentes de M_3C , de M_7C_3 e de $M_{23}C_6$. Na ferrita, predomina o M_2C com teores muito baixos dos outros tipos de precipitados. No contorno, não aparece o M_6C e há quantidades equivalentes das outras estequiometrias.

Tabela 15 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 2.000 horas a 575°C.

Campos	Região	M_2C	M_3C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Perlita	10,57	0,13	5,70	27,97	5,40	50,23
2	Contorno	6,22	–	9,02	10,80	3,05	71,69
3	Ferrita	29,83	1,44	2,31	–	–	78,28
4	Ferrita	30,09	0,50	–	0,40	0,32	68,70
	Contorno	20,90	–	22,23	–	–	56,87
5	Perlita	16,13	–	19,77	–	–	64,10

5.4.5 Ferrita-bainita – 100 horas

A Figura 71 apresenta a estrutura metalográfica do material ferrítico-bainítico envelhecido a 575°C por 100 horas, composta por bainita granular, com precipitação grosseira nos contornos de grão e emaranhados de carbonetos. A média das medições de dureza foi de 125 ± 1 HV.

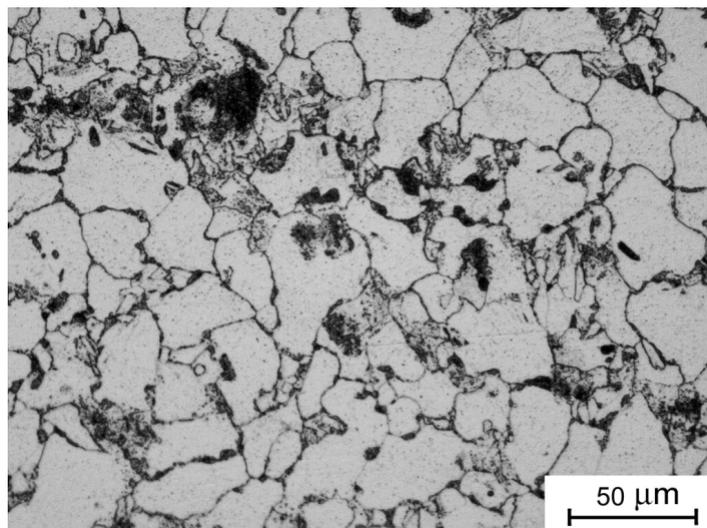


Figura 71 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-bainítica, após envelhecimento a 575°C por 100 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 72 e a Figura 73 mostram os cinco campos selecionados para análise, sendo três em regiões bainíticas, um em grão ferrítico e um em contorno de grão, englobando os precipitados do contorno e do grão ferrítico adjacente. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo II.

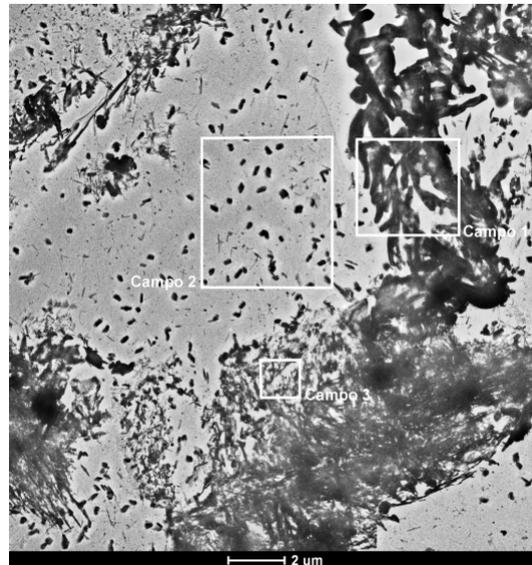


Figura 72 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica, envelhecida a 575°C por 500 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

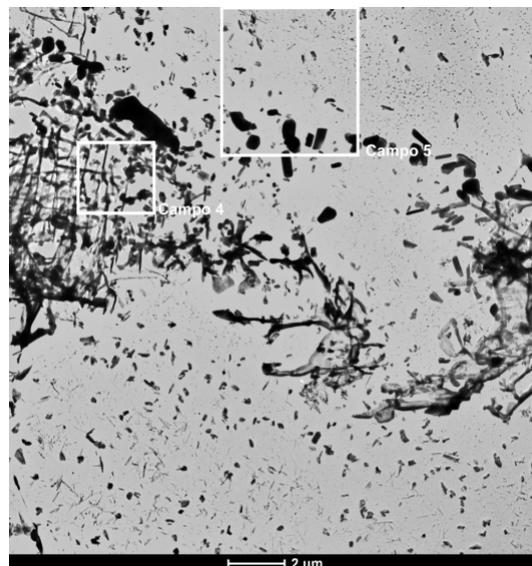


Figura 73 – Imagem de réplica da amostra bainítica, envelhecida a 575°C por 100 horas, com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5.

A Tabela 16 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos campos escolhidos. Nos grãos bainíticos, predomina o carboneto $M_{23}C_6$, que aparece em forma de lamelas fragmentadas e espaçadas. Junto a ele, também há precipitados dos tipos M_2C , M_6C , M_7C_3 e M_6C , todos em razoáveis quantidades. Na

ferrita, predomina o M_2C com pouca quantidade de M_7C_3 e de $M_{23}C_6$, enquanto, no contorno, aparecem o M_7C_3 e o $M_{23}C_6$ coalescidos

Tabela 16 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 100 horas a 575°C.

Campos	Região	M_2C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Bainita	2,08	–	71,99	–	25,92
2	Ferrita	22,94	4,37	2,45	–	70,24
3	Bainita	13,72	1,71	53,74	6,46	24,37
4	Bainita	2,25	–	57,15	1,21	39,39
5	Ferrita	11,07	–	1,01	–	87,91
	Contorno	5,04	13,56	8,02	–	73,37

5.4.6 Ferrita-bainita – 500 horas

A Figura 74 apresenta a estrutura metalográfica do material bainítico envelhecido a 575°C por 500 horas. Em meio à bainita, que compõe toda a região mostrada, há precipitação intensa entre os grãos, formando grandes aglomerados de carbonetos. A diferença entre esta e a condição descrita no item anterior é um aumento na densidade de precipitação na ferrita. A média das medições de dureza realizadas nessa região foi de 127±2 HV.

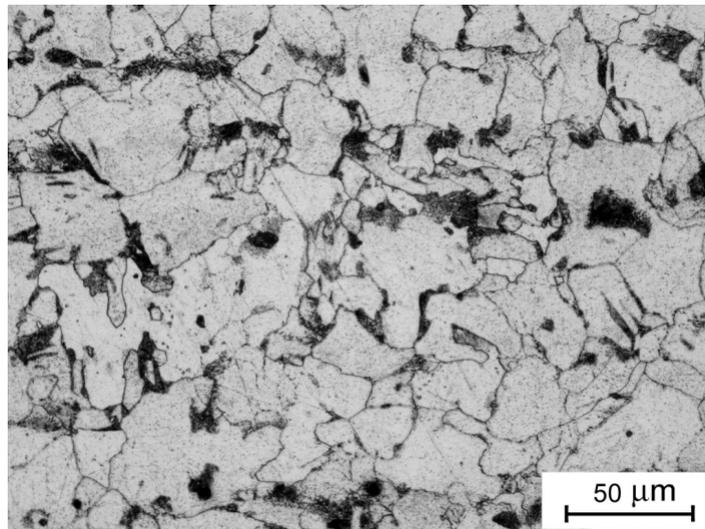


Figura 74 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e bainita, após envelhecimento a 575°C por 500 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 75 e a Figura 76 mostram os cinco campos selecionados para análise, sendo três em grãos bainíticos e dois em grãos ferríticos. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo II.

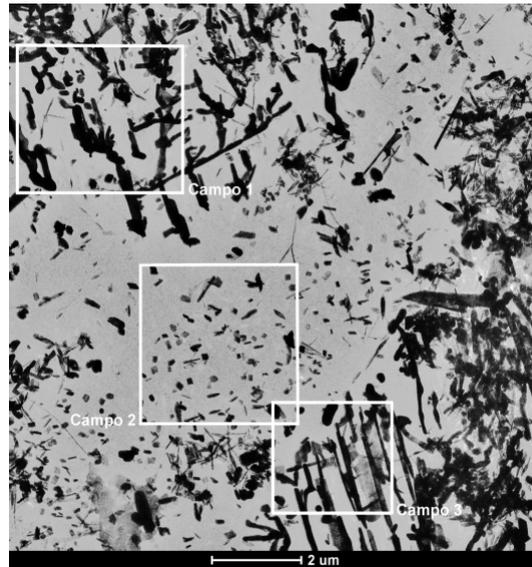


Figura 75 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica, envelhecida a 575°C por 500 horas, com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

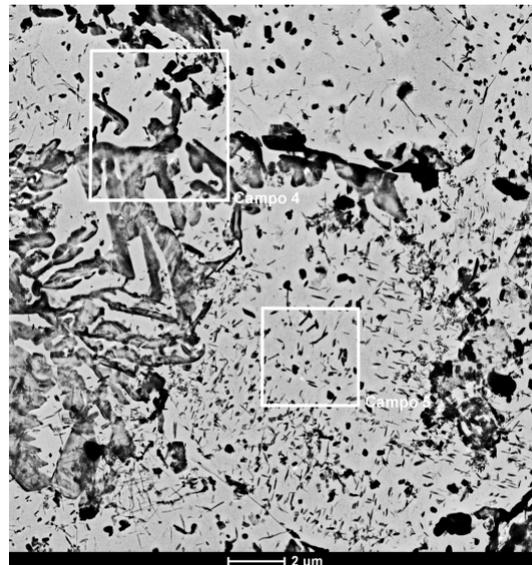


Figura 76 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica, envelhecida a 575°C por 500 horas, com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5.

A Tabela 17 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos campos escolhidos. Há predominância de $M_{23}C_6$, quantidade razoável de M_2C e poucos carbonetos do tipo M_6C , M_7C_3 e M_6C . Comprovando o observado por microscopia ótica, verificou-se, nos grãos ferríticos, aumento da densidade de precipitados do tipo M_2C , que são finos e aparecem dispersos na matriz. Junto a esse tipo de carboneto, aparecem pequenas quantidades de M_7C_3 e de $M_{23}C_6$. No contorno de grão, predominam o M_7C_3 e o $M_{23}C_6$, coalescidos, junto a pequenas quantidades de M_2C e de M_6C .

Tabela 17 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 500 horas a 575°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Bainita	5,7	1,25	34,45	0,30	58,28
2	Ferrita	12,27	0,19	0,24	–	87,29
3	Bainita	2,72	–	53,87	–	43,41
4	Contorno	8,12	9,99	16,65	0,89	47,71
5	Ferrita	11,08	–	–	–	88,92

5.4.7 Ferrita-bainita – 1.000 horas

A Figura 77 apresenta a estrutura metalográfica do material ferrítico-bainítico envelhecido a 575°C por 1.000 horas. Notam-se grãos grandes com emaranhados de carbonetos entre eles. A dureza medida nesta região apresentou média de 125±2 HV.

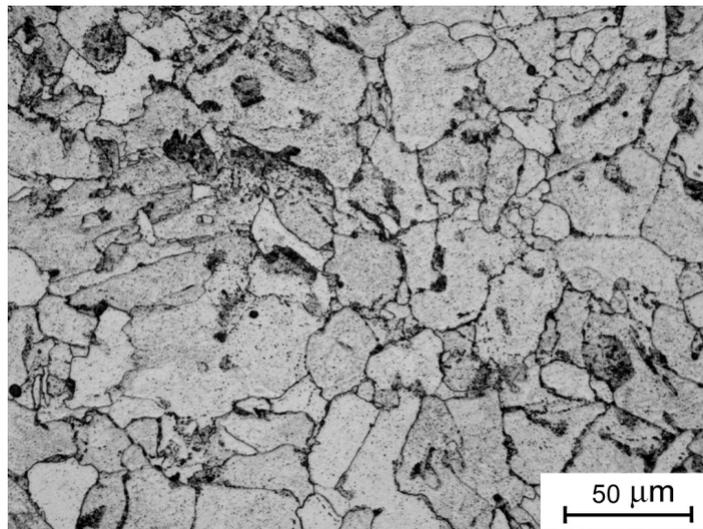


Figura 77 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-bainítica, após envelhecimento a 575°C por 1.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 78 e a Figura 79 mostram os cinco campos selecionados para análise, sendo dois em grãos bainíticos, dois em grãos ferríticos e um em contorno de grão. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo II.

A Tabela 18 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos campos escolhidos. Nas regiões bainíticas, há predominância de M₂₃C₆ em forma de lamelas espaçadas e blocos, que são derivados da fragmentação das lamelas. Esse tipo de precipitado está junto a pequenas quantidades de M₂C, de M₇C₃

e de M_7C_3 . Dentro da ferrita, o precipitado mais comum é o M_2C , fino e distribuído em forma de emaranhados, ou disperso, junto a carbonetos $M_{23}C_6$, coalescidos, e poucos M_7C_3 . No contorno de grão, há grandes blocos de $M_{23}C_6$ com pouco M_2C em seu entorno.

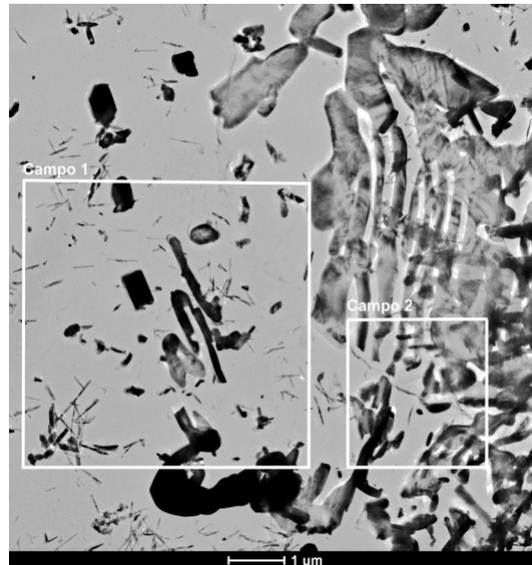


Figura 78 – Imagem de réplica da amostra de estrutura ferrítico-bainítica envelhecida a 575°C por 1.000 horas e com aumento de 5.000 X, apresentando os campos 1 e 2.

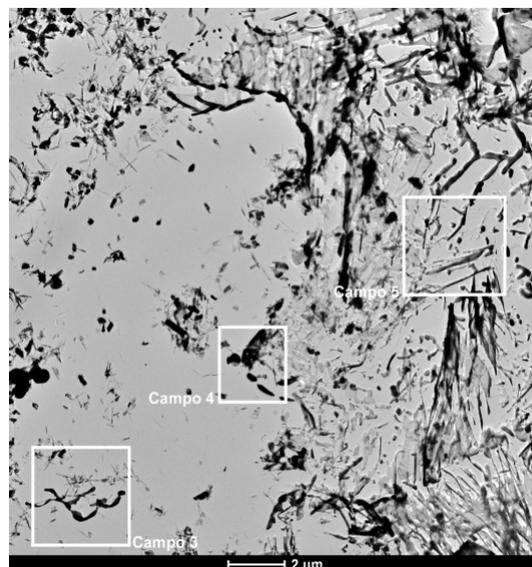


Figura 79 – Imagem de réplica da amostra de estrutura ferrítico-bainítica envelhecida a 575°C por 1.000 horas e com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 3, 4 e 5.

Tabela 18 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 1.000 horas a 575°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Ferrita	8,16	2,04	10,82	–	78,98
2	Bainita	–	–	99,43	0,57	–
3	Ferrita	16,87	0,35	8,72	–	74,06
4	Contorno	5,62	0,67	39,92	–	53,79
5	Bainita	9,23	2,17	88,60	–	–

5.4.8 Ferrita-bainita – 2.000 horas

A Figura 80 apresenta a estrutura metalográfica do material bainítico envelhecido a 575°C por 2.000 horas. Em comparação com as condições descritas nos itens anteriores, pode-se notar a intensificação da precipitação, tanto na ferrita quanto nos contornos de grão. A média das medições de dureza Vickers realizadas nessa região foi de 121±6 HV.

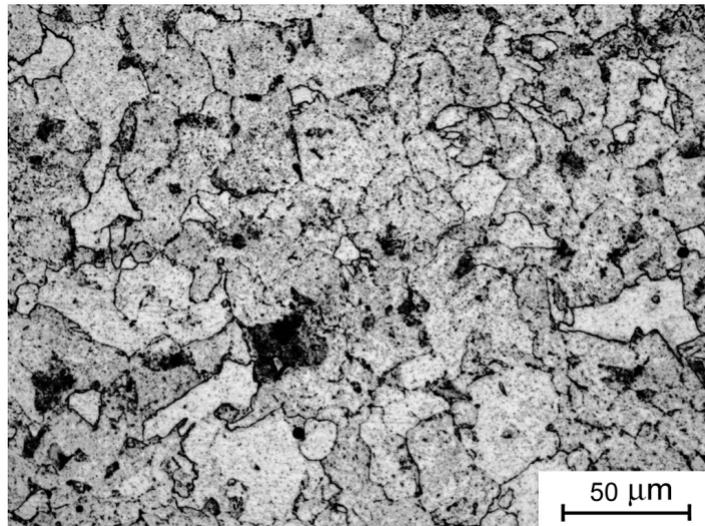


Figura 80 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-bainítica, após envelhecimento a 575°C por 2.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 81 e a Figura 82 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em grãos bainíticos, dois em regiões ferríticas e um em contorno de grão. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores a cada tipo de precipitado podem ser vistas no Anexo II.

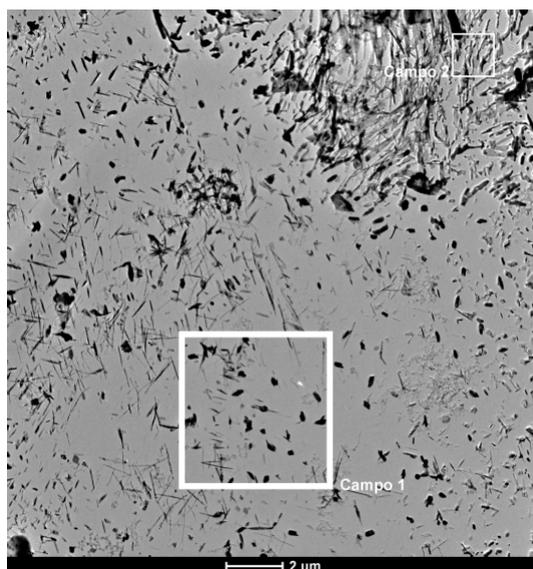


Figura 81 – Imagem de réplica da amostra de estrutura ferrítico-bainítica envelhecida a 575°C por 2.000 horas e com aumento de 2.550 X, apresentando os campos 1 e 2.

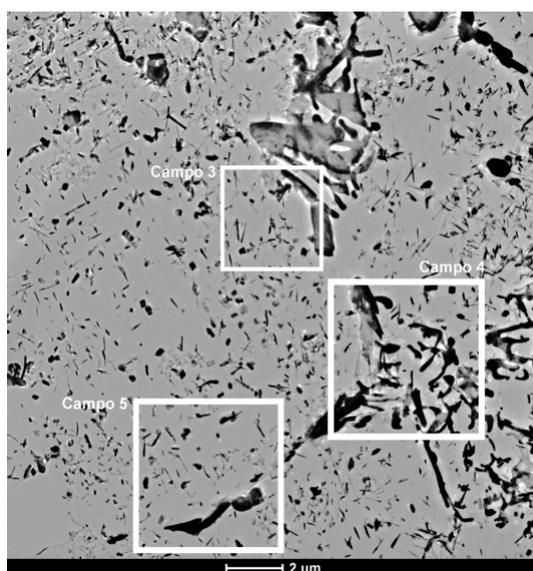


Figura 82 – Imagem de réplica da amostra de estrutura ferrítico-bainítica envelhecida a 575°C por 2.000 horas e com aumento de 2.550 X, apresentando os campos 3, 4 e 5.

A Tabela 19 apresenta os percentuais de cada tipo de precipitado presente no material bainítico envelhecido a 575°C por 2.000 horas. Na bainita, predomina o $M_{23}C_6$ com aumento da quantidade de M_2C em relação às condições anteriormente descritas. Também estão presentes pequenas quantidades de M_7C_3 e de M_6C . Na ferrita, há M_2C com muito pouco $M_{23}C_6$. Já no contorno, há $M_{23}C_6$, que aparece junto a M_2C e pouco M_6C .

Tabela 19 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 2.000 horas a 575°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Ferrita	14,76	–	0,23	–	85,01
2	Bainita	1,86	1,08	96,32	0,75	–
3	Ferrita	15,83	–	–	–	84,17
4	Bainita	21,11	–	70,79	8,10	–
5	Ferrita	14,99	0,61	–	–	84,40
	Contorno	9,71	–	16,91	1,89	71,48

5.5 Material envelhecido a 600°C

5.5.1 Ferrita-perlita – 100 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico envelhecido a 600°C por 100 horas é mostrada na Figura 83. Pode-se observar o início dos processos de esferoidização da cementita e de precipitação em contornos de grão, o que possibilita classificar o material como estágio B de degradação segundo o critério de Toft e Marsden [3]. A média das medições de dureza Vickers efetuadas nesta condição foi de 142±2 HV.

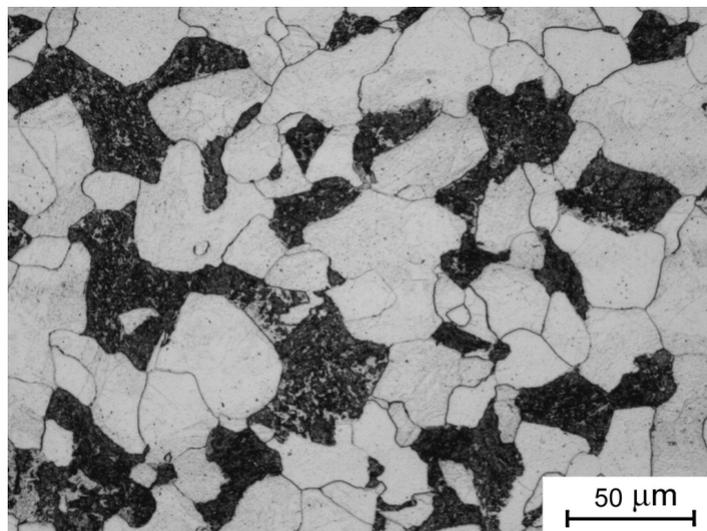


Figura 83 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita, após envelhecimento a 600°C por 100 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 84 e a Figura 85 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em regiões perlíticas, dois em grãos ferríticos e um em contorno. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo III.

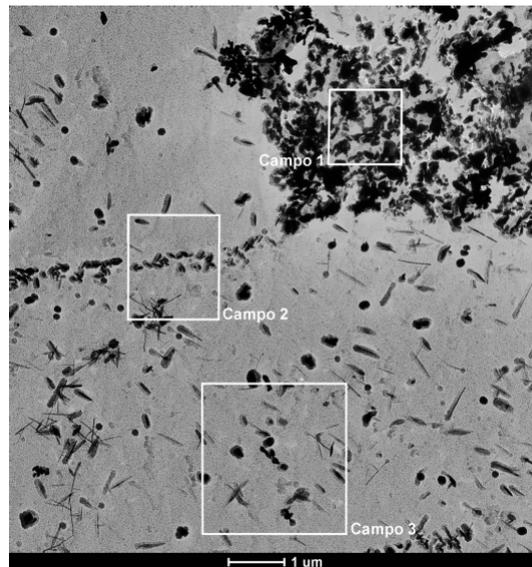


Figura 84 – Imagem de réplica da amostra perlítica, envelhecida por 100 horas a 600°C e com aumento de 5.000 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

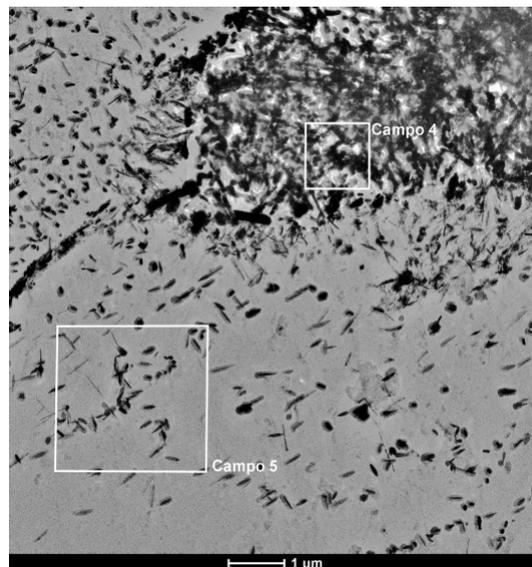


Figura 85 – Imagem de réplica da amostra perlítica, envelhecida por 100 horas a 600°C e com aumento de 5.000 X, mostrando os campos 4 e 5.

A Tabela 20 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. A cementita se encontra fragmentada, apesar de ainda ser predominante nos grãos perlíticos, que também possuem M_2C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$ e M_6C . Nas regiões ferríticas e no contorno, está presente apenas o M_2C .

Tabela 20 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 100 horas a 600°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₃ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Perlita	12,18	21,68	12,77	17,60	4,90	30,87
2	Contorno	0,26	–	–	–	–	99,74
3	Ferrita	5,24	–	–	–	–	94,76
4	Perlita	–	79,58	–	3,27	1,87	15,28
5	Ferrita	8,31	–	–	–	–	91,69

5.5.2 Ferrita-perlita – 500 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico envelhecido a 600°C por 500 horas é mostrada na Figura 86. Observa-se evolução nos processos de esferoidização da cementita e de precipitação nos contornos de grão, caracterizando o estágio C de degradação segundo o critério de Toft e Marsden [3]. Nessa condição, as medições de dureza apresentaram média de 146 HV.

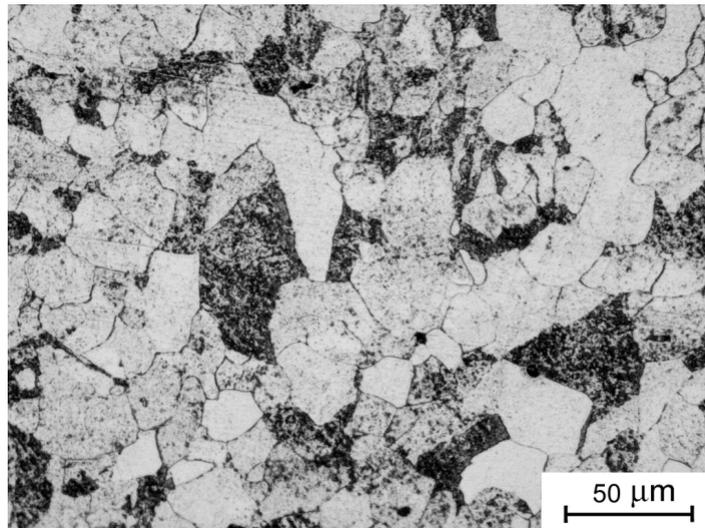


Figura 86 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita, após envelhecimento a 600°C por 500 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 87 e a Figura 88 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em regiões perlíticas, dois em grãos ferríticos e um em contorno entre um grão ferrítico e um perlítico. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo III.

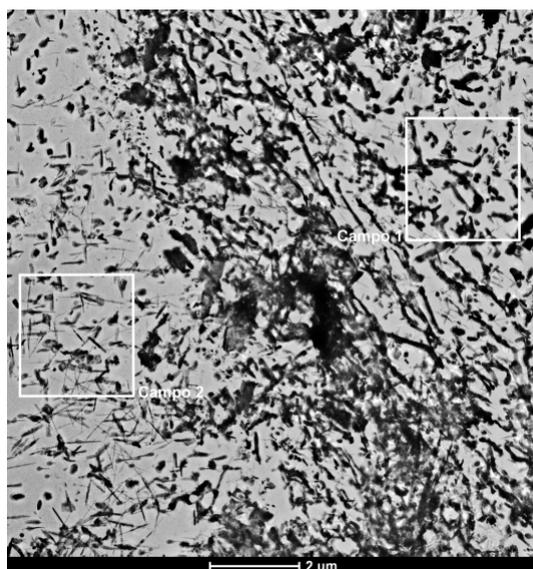


Figura 87 – Imagem de réplica da amostra perlítica, envelhecida a 600°C por 500 horas e com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1 e 2.

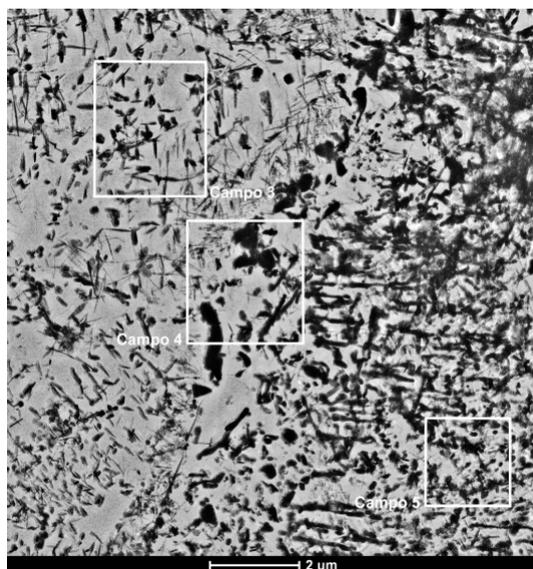


Figura 88 – Imagem de réplica da amostra perlítica, envelhecida a 600°C por 500 horas e com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 3, 4 e 5.

A Tabela 21 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. O M_6C , apesar de fragmentado, ainda é o carboneto mais comum, apresentando, na média de todas as regiões analisadas. Dentro dos grãos perlíticos, também aparece o M_2C , além de pouca quantidade de M_7C_3 , e de M_6C . Nos grãos ferríticos, é mantida a proporção das outras condições de envelhecimento, com maioria de precipitados do tipo M_2C , finos e dispersos na matriz, e poucas quantidades de M_3C , de M_7C_3 e de $M_{23}C_6$. No contorno de grão, ficam evidentes os precipitados do tipo M_7C_3 , coalescidos, além de pequena quantidade de $M_{23}C_6$ e de M_6C .

Tabela 21 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 500 horas a 600°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₃ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Perlita	11,60	24,89	–	–	0,26	63,26
2	Ferrita	26,52	2,00	–	0,97	–	70,51
3	Ferrita	27,27	1,46	0,56	–	–	70,71
4	Contorno	13,48	11,39	13,23	0,90	0,50	60,48
5	Perlita	9,91	42,01	–	–	–	48,08

5.5.3 Ferrita-perlita – 1.000 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-perlítico envelhecido a 600°C por 1.000 horas é mostrada na Figura 89. Há maior precipitação em contornos de grão e esferoidização quase completa dos grãos perlíticos, o que leva à classificação do material no estágio E de degradação segundo Toft e Marsden β]. A média das medições de dureza realizadas na amostra submetida a essa condição de envelhecimento foi de 141±2 HV.

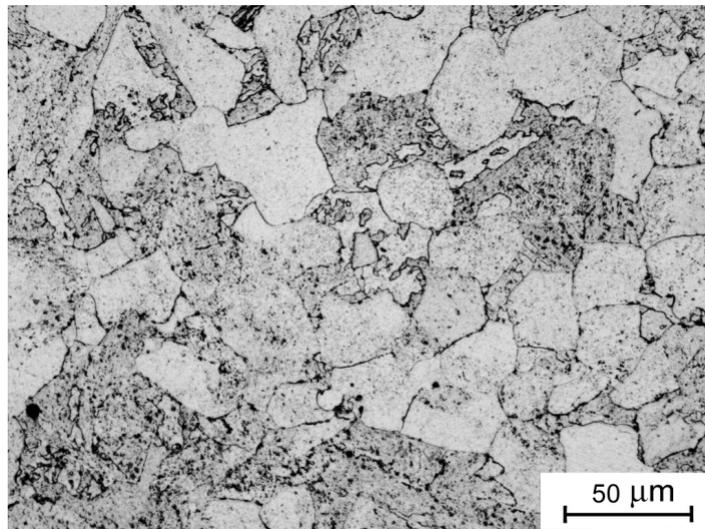


Figura 89 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita, após envelhecimento a 600°C por 1.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 90 e a Figura 91 mostram os cinco campos analisados, sendo um em região perlítica degradada, um em contorno de grão com predominância em grão perlítico, um em contorno com predominância de ferrita, um em ponto tríplice e um numa região de ferrita pura. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo III.

Pode-se notar que, mesmo com a utilização de microscopia de transmissão, já não há mais uma distinção entre grãos perlíticos e ferríticos tão bem definida quanto nas condições anteriores. Além disso, há precipitados nos contornos de grão coalescidos o suficiente para serem notados em imagens de baixo aumento.

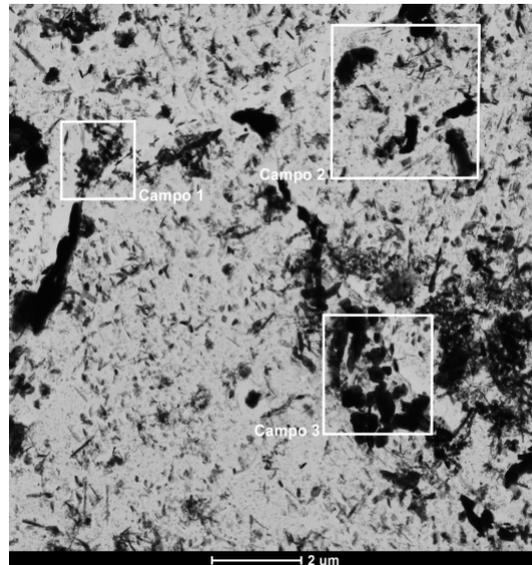


Figura 90 – Imagem de réplica da amostra perlítica, envelhecida a 600°C por 1.000 horas e com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

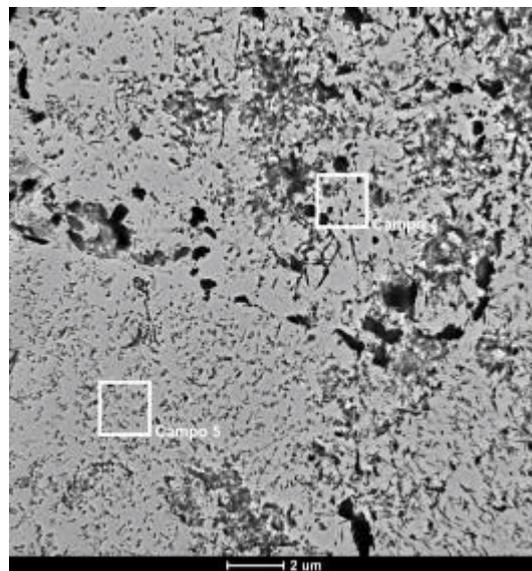


Figura 91 – Imagem de réplica da amostra perlítica, envelhecida a 600°C por 1.000 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5.

A Tabela 22 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Comprovando as observações por microscopia ótica e eletrônica com baixo aumento, vê-se que, nos grãos de perlita degradada, há muito pouca quantidade de M_3C , junto a M_2C acicular e em forma de

blocos, M_7C_3 coalescido, $M_{23}C_6$ em forma de blocos e grande quantidade de M_6C . Na ferrita, predomina o precipitado M_2C , embora também estejam presentes pequenas quantidades de M_7C_3 e de $M_{23}C_6$. Já nos contornos, há carbonetos coalescidos dos tipos M_7C_3 , $M_{23}C_6$ e M_6C , sempre associados à presença de M_2C .

Tabela 22 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 1.000 horas a 600°C.

Campos	Região	M_2C	M_3C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Contorno	16,44	20,36	0,82	0,34	3,24	58,80
2	Ferrita	9,20	0,40	10,41	10,12	0,73	69,13
3	Perlita	2,93	0,63	12,06	17,90	19,84	46,63
4	Perlita	18,97	0,78	7,36	10,76	–	62,13
5	Ferrita	19,39	0,22	1,31	1,21	–	77,88

5.5.4 Ferrita-perlita – 2.000 horas

A Figura 92 mostra a estrutura metalográfica do material composto de ferrita e perlita envelhecido a 600°C por 2.000 horas. A diferença entre essa configuração e a anterior é a precipitação mais intensa nos contornos de grão, possibilitando que se classifique a amostra como pertencente ao estágio E de degradação segundo o critério de Toft e Marsden [3]. A dureza média da região analisada foi de 140 ± 5 HV.

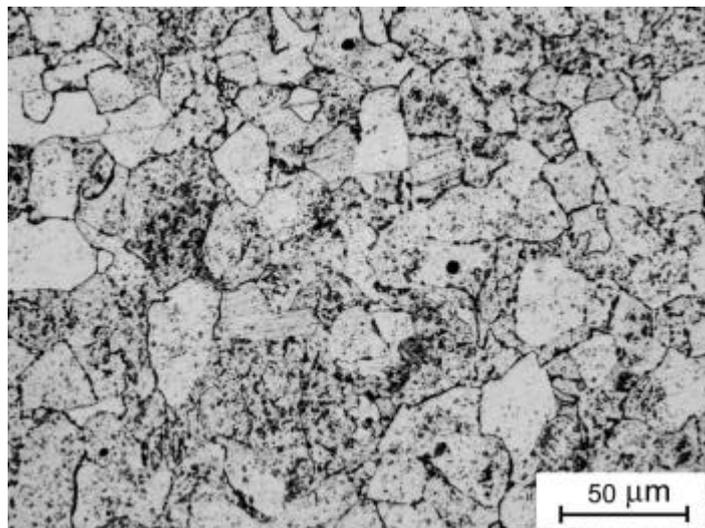


Figura 92 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-perlítica, após envelhecimento a 600°C por 2.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 93 e a Figura 94 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em grãos perlíticos, dois em áreas ferríticas e um em contorno de grão. Os detalhes de

cada campo e a atribuição de cores aos precipitados podem ser vistos no Anexo III.

Além disso, com o prosseguimento da degradação microestrutural observada nos grãos perlíticos degradados, estes podem ser diferenciados da ferrita, quando observados com baixo aumento, unicamente pela presença de precipitados globulares, em vez do M_2C acicular, característico do grão ferrítico.

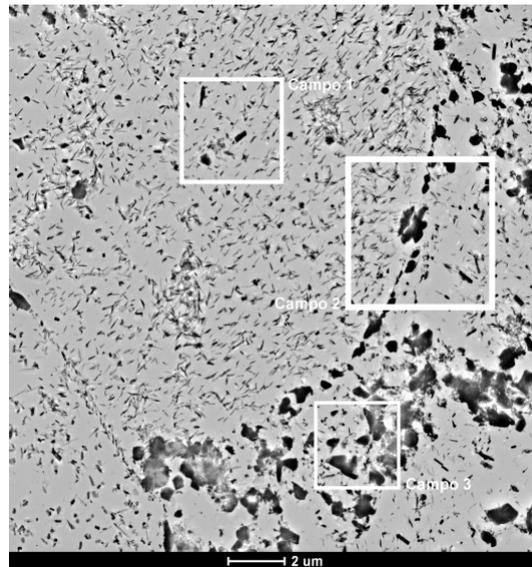


Figura 93 – Imagem de réplica da amostra perlítica, envelhecida a 600°C por 2.000 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

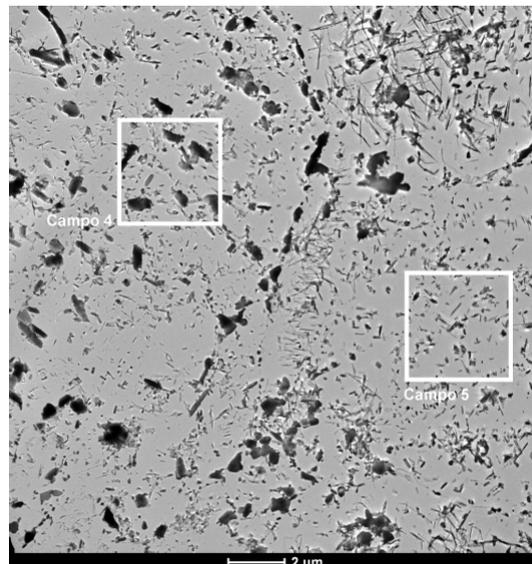


Figura 94 – Imagem de réplica da amostra perlítica, envelhecida a 600°C por 2.000 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5.

Pode-se observar, no contorno de grão da Figura 94, que é mostrado em detalhes na Figura 95, a distribuição de carbonetos do tipo M_2C aglomerados e

alinhados.

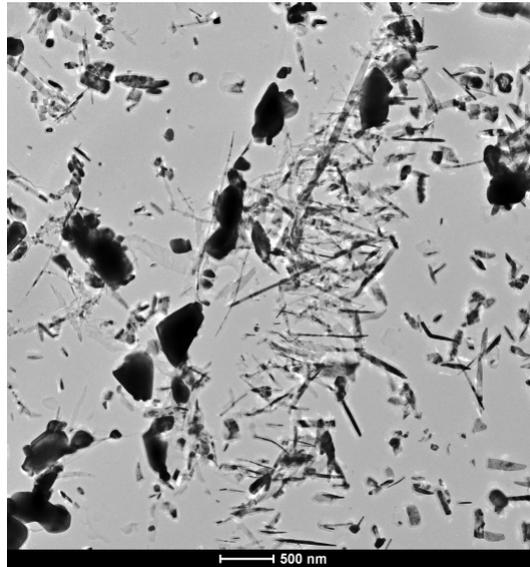


Figura 95 – Contorno de grão da Figura 94, com aumento de 9.900 X, mostrando a distribuição peculiar do M_2C .

Os carbonetos em forma de blocos presentes no contorno são do tipo M_7C_3 , enquanto os aciculares apontados em direção a ele são M_2C . O surgimento do M_2C nessas áreas se dá em virtude do enriquecimento da região em elementos de liga, uma vez que a interface entre dois grãos é a região preferencial de coalescimento de precipitados.

A Tabela 23 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Nas regiões de perlita degradada, o precipitado mais presente é o M_7C_3 , coalescido e em forma de blocos, aparecendo junto ao M_2C . Na ferrita, persiste a predominância do M_2C , com pequenas quantidades de M_7C_3 . No contorno de grão analisado, aparece M_2C , pequeno, M_7C_3 , $M_{23}C_6$ e M_6C , coalescidos e associados, em vários pontos, a precipitados M_2C .

Tabela 23 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecido por 2.000 horas a 600°C.

Campos	Região	M_2C	M_7C_3	$M_{23}C_6$	M_6C	Matriz
1	Ferrita	19,26	1,62	–	–	79,12
2	Contorno	20,58	5,14	2,11	1,21	70,95
3	Perlita	26,01	35,44	0,19	–	38,36
4	Perlita	18,83	16,73	–	–	64,44
5	Ferrita	16,39	–	–	–	83,61

5.5.5 Ferrita-bainita – 100 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-bainítico envelhecido a 600°C por 100 horas é mostrada na Figura 96. Não se observam diferenças significativas entre esta condição e as anteriores. A dureza medida na amostra submetida a essa condição de envelhecimento apresentou média de 124 ± 1 HV.

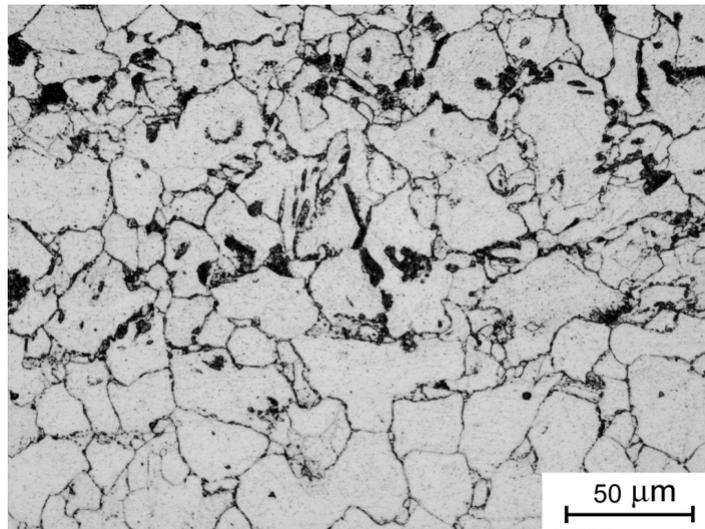


Figura 96 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-bainítica, após envelhecimento a 600°C por 100 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 97 e a Figura 98 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em grãos bainíticos e três em regiões ferríticas. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo III.

A Tabela 24 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Na bainita, há muito $M_{23}C_6$, que aparece junto a grande quantidade de M_2C e de M_7C_3 e pouco M_6C . Na ferrita, predominam o $M_{23}C_6$ e o M_2C junto a pequenas quantidades de M_7C_3 e de M_6C . Já no contorno de grão, aparecem todas as estequiometrias, sendo que há muito pouca quantidade de M_6C .

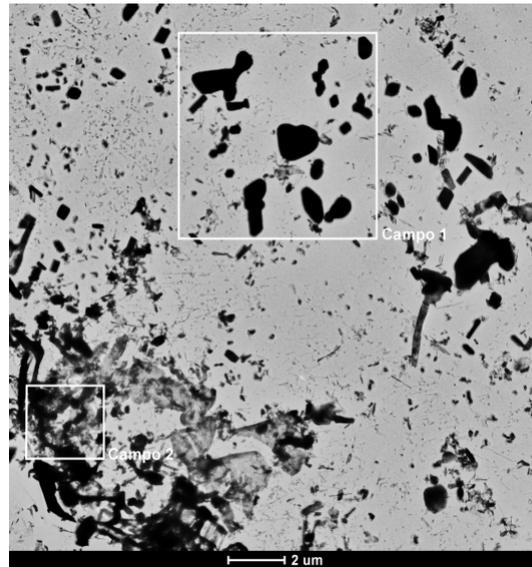


Figura 97 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica, envelhecida a 600°C por 100 horas e com aumento de 2.250 vezes, mostrando os campos 1 e 2.

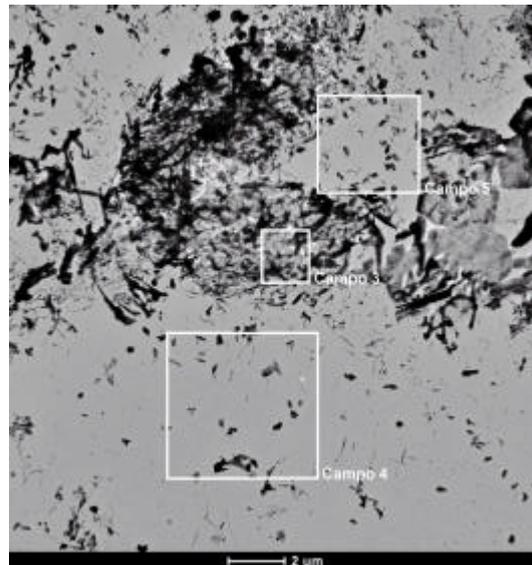


Figura 98 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica envelhecida a 600°C por 100 horas, com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 3, 4 e 5.

Tabela 24 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 100 horas a 600°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Contorno	3,52	4,83	12,11	0,04	79,51
2	Bainita	39,59	23,59	22,12	2,21	12,49
3	Bainita	0,44	2,40	90,06	0,47	6,63
4	Ferrita	3,21	0,21	2,97	–	93,61
5	Ferrita	3,23 x 10 ⁻⁴	1,35	10,74	0,29	87,62

5.5.6 Ferrita-bainita – 500 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-bainítico envelhecido a 600°C por 500 horas é mostrada na Figura 99. Pode-se observar ligeiro aumento da precipitação dentro dos grãos ferríticos. A média das medições de dureza efetuadas nessa região foi de 126 ± 2 HV.

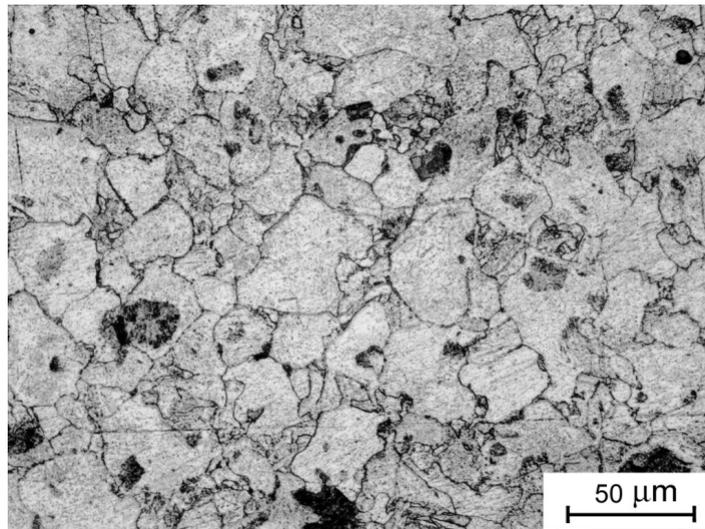


Figura 99 – Metalografia da amostra de estrutura composta por ferrita e bainita, após envelhecimento a 600°C por 500 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 100 e a Figura 101 mostram os cinco campos analisados, sendo três em regiões bainíticas, um na ferrita e um em contorno com predominância de ferrita. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo III.

A Tabela 24 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Na bainita, há alternância entre os carbonetos mais comuns: em um dos campos analisados, predomina o M_2C , com M_7C_3 e $M_{23}C_6$ bastante coalescidos, e, em outro, há $M_{23}C_6$ lamelar e em grandes quantidades, com muito pouco M_2C . Na ferrita, predomina o M_2C , com pequenas quantidades de M_3C , de M_7C_3 e de $M_{23}C_6$. Também foi observado um precipitado do tipo $M_{23}C_6$ muito coalescido.

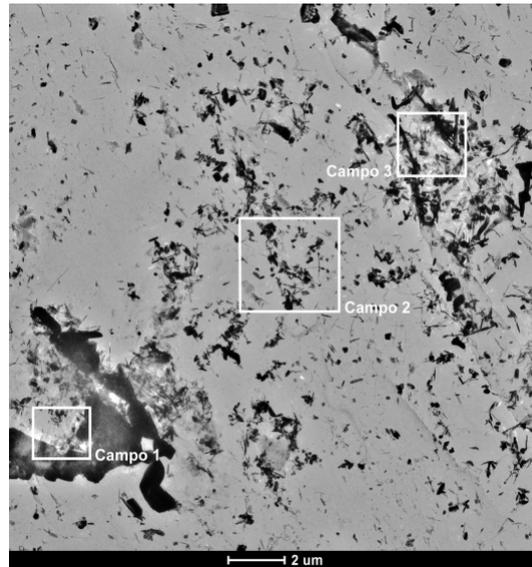


Figura 100 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica, envelhecida a 600°C por 500 horas e com aumento de 2.250 vezes, mostrando os campos 1, 2 e 3.

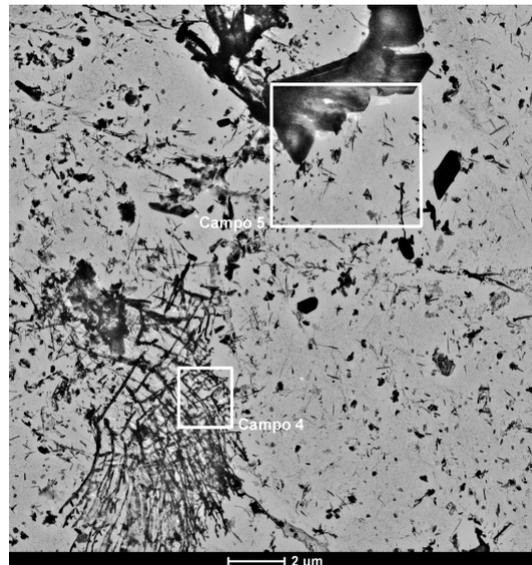


Figura 101 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica envelhecida a 600°C por 500 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5.

Tabela 25 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 500 horas a 600°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Ferrita	22,82	1,41	34,26	0,18	41,34
2	Ferrita	19,24	3,26	1,67	–	75,82
3	Bainita	37,17	11,39	14,32	–	37,11
4	Bainita	3,37	–	65,85	–	30,78
5	Contorno	6,68	0,21	28,52	–	64,59

5.5.7 Ferrita-bainita – 1.000 horas

A estrutura metalográfica do material ferrítico-bainítico envelhecido a 600°C por 1.000 horas é mostrada na Figura 102. As diferenças entre esta microestrutura e as resultantes de menores temperaturas e tempos de exposição são: maior densidade de precipitados na ferrita e nos contornos de grão e diminuição dos emaranhados de carbonetos que caracterizam os grãos bainíticos. A média das medições de dureza feitas nessa região foi de 121±3 HV.

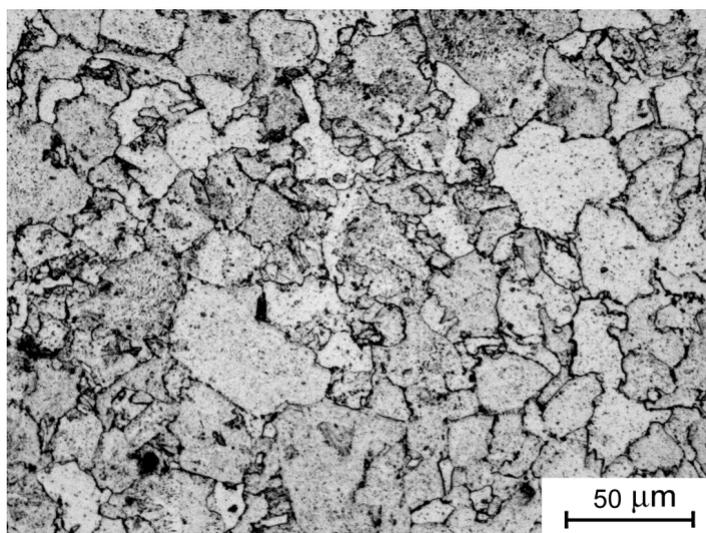


Figura 102 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-bainítica, após envelhecimento a 600°C por 1.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 103 e a Figura 104 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em regiões bainíticas, um em grão ferrítico e dois em áreas mistas. Os detalhes de cada campo e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo III.

A Tabela 26 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Na bainita, os carbonetos mais comuns são o $M_{23}C_6$ e o M_2C , que aparecem junto a pequenas quantidades de M_7C_3 e de M_6C . Nas áreas ferríticas, há M_2C com quantidades razoáveis de $M_{23}C_6$. Nessas regiões, o M_6C não aparece. No contorno, predomina o $M_{23}C_6$ e há pouca quantidade das outras estequiometrias.

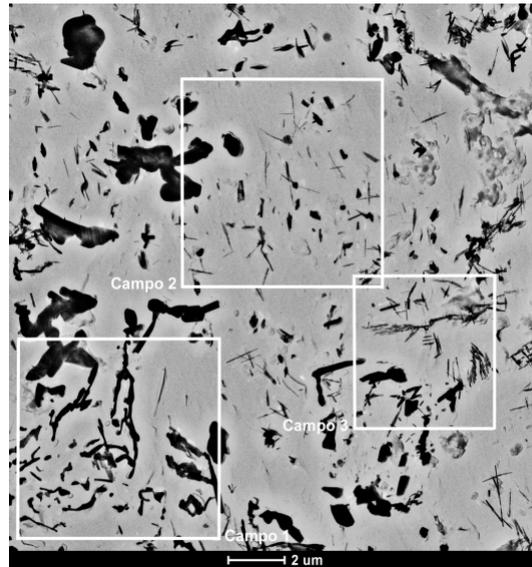


Figura 103 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica envelhecida a 600°C por 1.000 horas, com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

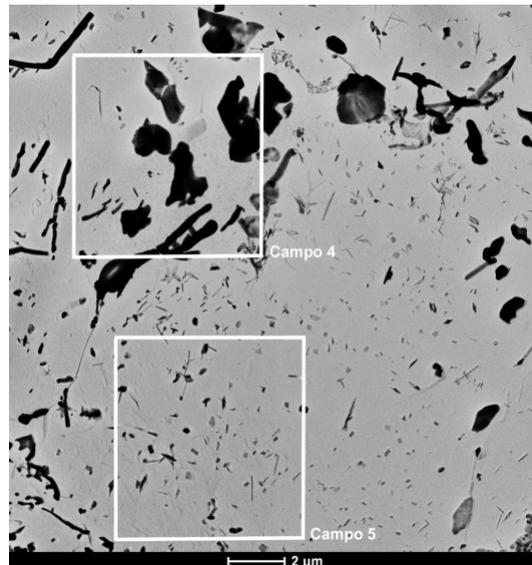


Figura 104 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica envelhecida a 600°C por 1.000 horas, com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5.

Tabela 26 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 1.000 horas a 600°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Bainita	0,88	0,07	19,35	1,33	78,36
2	Ferrita	6,32	0,52	3,04	–	90,12
3	Bainita	11,67	0,99	5,91	–	81,09
4	Contorno	1,09	0,49	27,23	1,07	70,12
5	Ferrita	–	–	6,74	–	93,26

5.5.8 Ferrita-bainita – 2.000 horas

A Figura 105 mostra a microestrutura da amostra bainítica envelhecida a 600°C por 2.000 horas. A imagem mostra que há poucos grãos bainíticos presentes, além de intensa precipitação na ferrita e nos contornos. A média das medidas de dureza realizadas nessa região foi de 123 ± 1 HV.

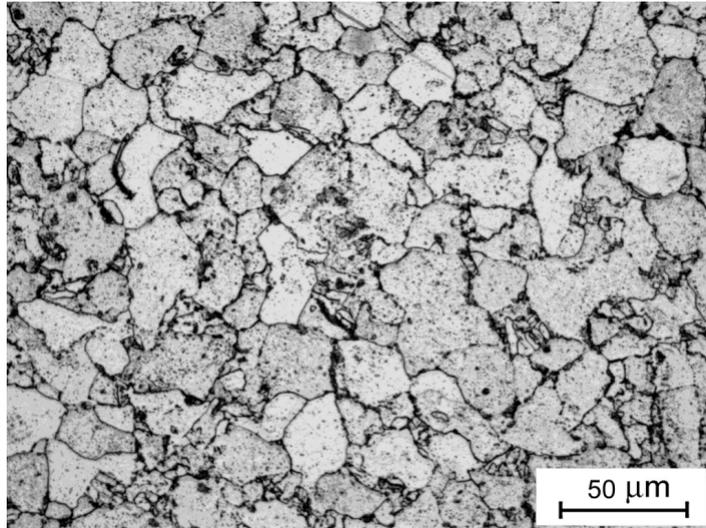


Figura 105 – Metalografia da amostra de estrutura ferrítico-bainítica, após envelhecimento a 600°C por 2.000 horas, com ataque por nital 2%.

A Figura 106 e a Figura 107 mostram os cinco campos analisados, sendo dois em regiões bainíticas, dois em áreas ferríticas e um em contorno de grão. Os campos em detalhes e a atribuição de cores aos precipitados são mostrados no Anexo III.

A Tabela 26 mostra os percentuais em área de cada tipo de precipitado presente nos cinco campos selecionados. Dentro dos grãos bainíticos, há duas configurações diferentes: em um, predomina o $M_{23}C_6$ ainda lamelar, com pequenas quantidades de M_2C e M_7C_3 ; no outro, ainda há $M_{23}C_6$, que aparece fragmentado, junto a M_2C e grandes blocos de M_7C_3 e um de M_6C . Nas regiões ferríticas, a quase totalidade dos precipitados é do tipo M_2C , com poucos $M_{23}C_6$. No contorno observado, há muito $M_{23}C_6$, que está bastante coalescido, junto a pouca quantidade de M_7C_3 .

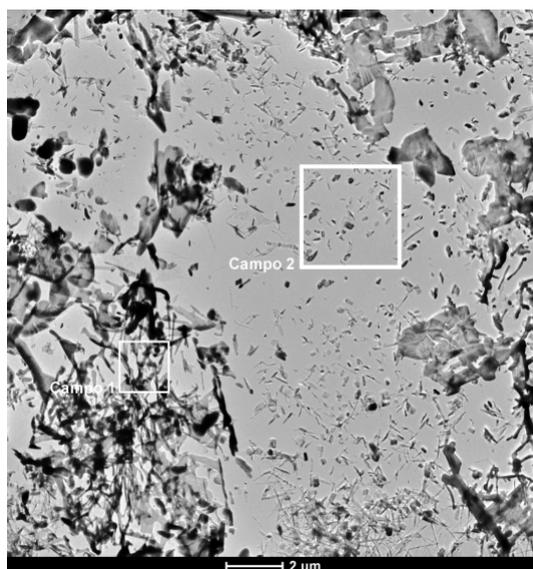


Figura 106 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica envelhecida a 600°C por 2.000 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 1 e 2.

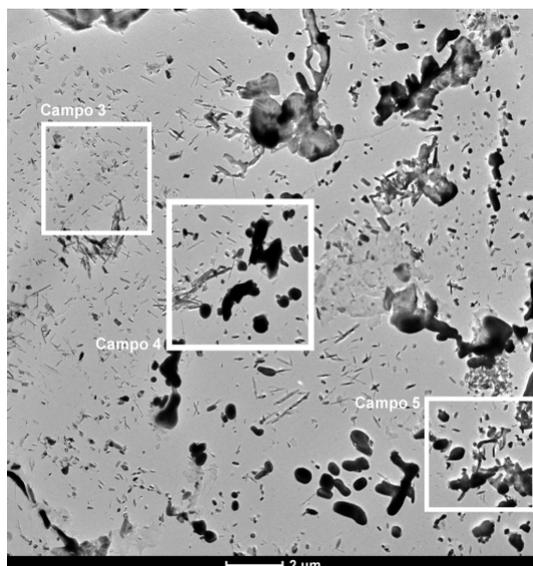


Figura 107 – Imagem de réplica da amostra ferrítico-bainítica envelhecida a 600°C por 2.000 horas, com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 3, 4 e 5.

Tabela 27 – Percentuais em área de cada tipo de carboneto mostrado nos campos 1 a 5 do material de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecido por 2.000 horas a 600°C.

Campos	Região	M ₂ C	M ₇ C ₃	M ₂₃ C ₆	M ₆ C	Matriz
1	Bainita	3,45	2,91	65,49	–	28,15
2	Ferrita	12,58	–	3,40	–	84,03
3	Ferrita	13,13	0,08	5,22	–	81,57
4	Contorno	6,78	1,60	21,34	–	70,28
5	Bainita	5,54	15,95	13,31	3,10	62,11

6. DISCUSSÃO

6.1 Evolução da dureza com o envelhecimento

As médias dos valores de dureza de cada condição de envelhecimento foram colocadas em gráficos, apresentados a seguir nas Figuras 108 a 110, a fim de comparar os comportamentos das duas diferentes microestruturas avaliadas, ferrita-perlita e ferrita-bainita.

Para todas as curvas, os valores iniciais são os mesmos, ou seja, os valores de dureza relativos ao material sem envelhecimento.

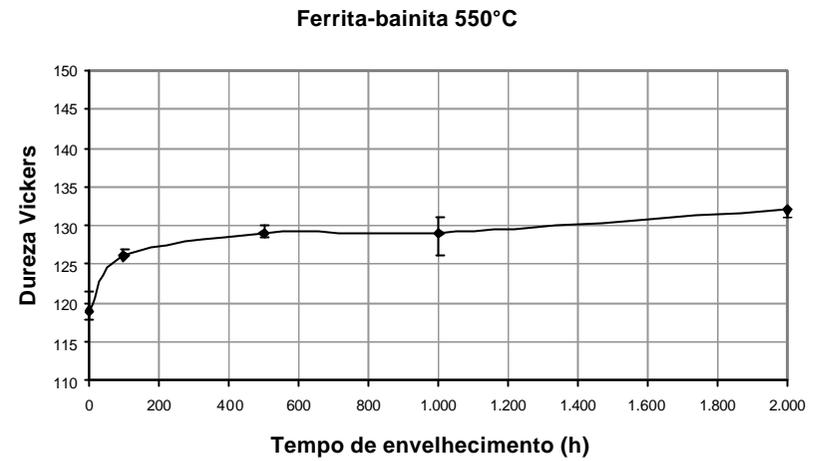
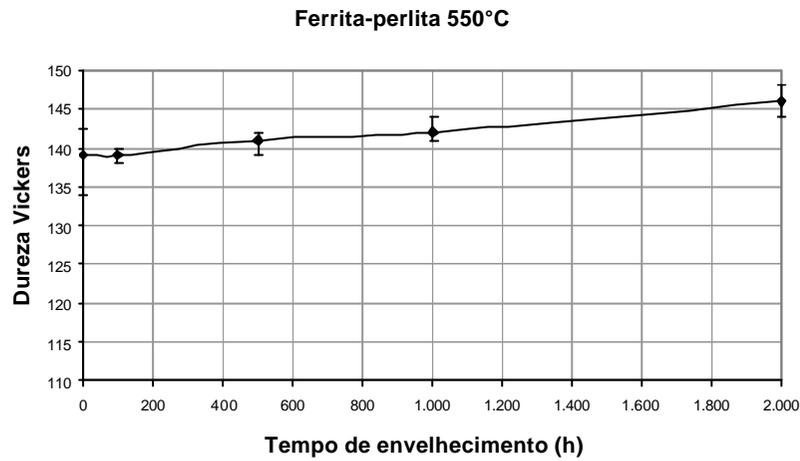


Figura 108 – Evolução dos valores de dureza Vickers com o tempo de envelhecimento a 550°C.

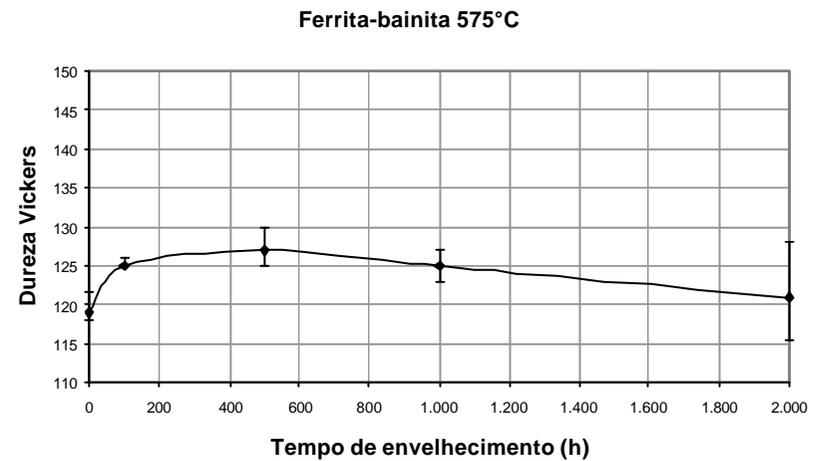
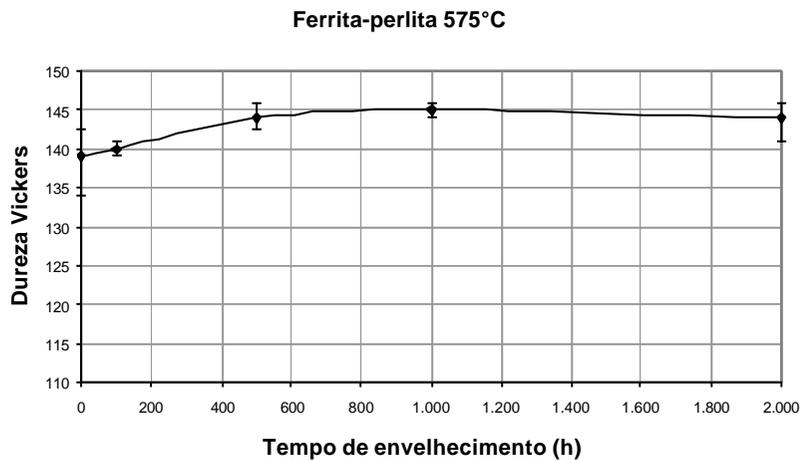


Figura 109 – Evolução dos valores de dureza Vickers com o tempo de envelhecimento a 575°C.

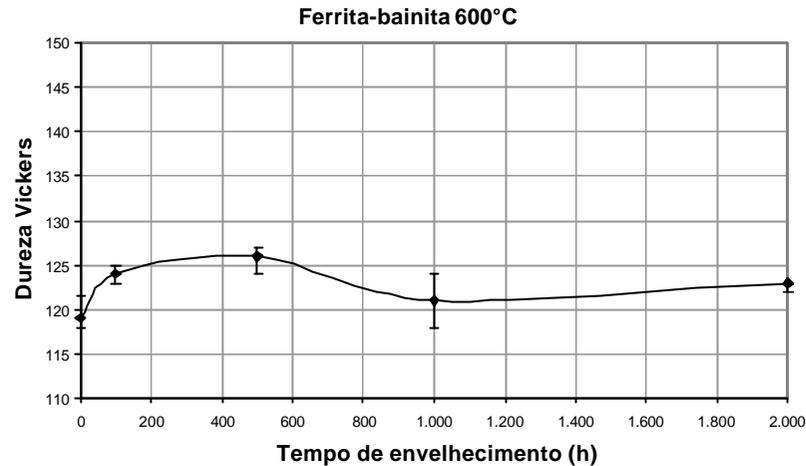
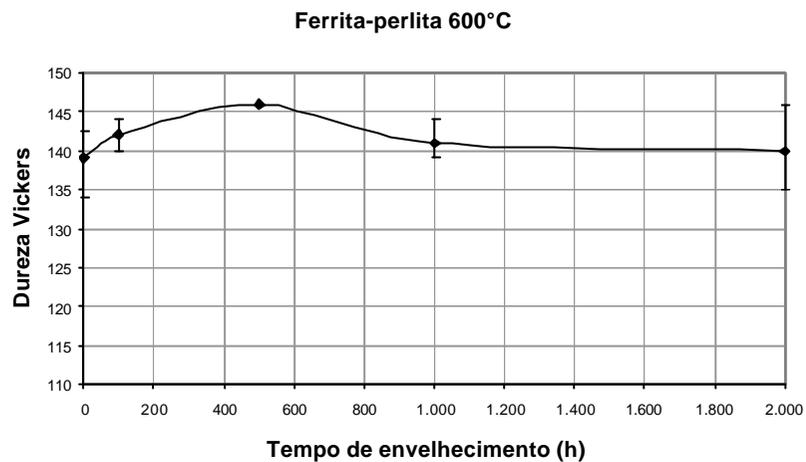


Figura 110 – Evolução dos valores de dureza Vickers com o tempo de envelhecimento a 600°C.

Tanto no caso do aço de microestrutura ferrita-perlita quanto ferrita-bainita, a tendência da dureza é de aumento, num primeiro momento, e estabilização. O aumento que ocorre está relacionado com o fenômeno de endurecimento secundário.

Pode-se observar que os valores de dureza da estrutura formada por ferrita e perlita estão, em todos os pontos e nas três condições, superiores aos da bainita. Além disso, não há queda perceptível de valores de dureza quando comparados os valores iniciais e finais, mesmo os do material submetido às piores condições de envelhecimento entre as utilizadas neste estudo.

O aumento inicial de dureza, bem como sua posterior queda e estabilização, observado para as duas microestruturas, está de acordo, como era esperado, com o estudo de Pickering [20], de 1978, que definiu a classe dos aços Cr-Mo como sendo de endurecimento secundário.

Ao longo do envelhecimento a 550°C, a dureza não chega a apresentar queda, tendo seu valor máximo para 2.000 horas para as duas estruturas. Para 575°C, os pontos de máximo são em 1.000 horas para a ferrita-perlita e em 500 horas para a ferrita-bainita. Já a 600°C, os pontos de dureza máxima ocorrem a 500 horas para ambos os casos.

Após o ponto máximo de endurecimento, a dureza sofre ligeira queda ou se mantém estável. De acordo com a literatura, isso era esperado para o material ferrítico-perlítico [52, 53 e 54] e não para a parte de estrutura ferrítico-bainítica [9 e 57]. Entretanto, a manutenção da dureza em valores praticamente iguais aos do material novo foi observada para as duas microestruturas. Além disso, levando-se em consideração o desvio padrão das medições de dureza, as diferenças entre a ferrita-perlita e a ferrita-bainita não são suficientes para que se faça uma distinção clara entre as duas.

Dessa forma, o ensaio de dureza, quando usado, deve ser considerado como acessório, capaz apenas de detectar variações muito acentuadas.

6.2 Microscopia ótica

A evolução microestrutural do aço 2,25Cr-1Mo, observada via microscopia

ótica, mostrou que, como esperado, a ferrita-perlita apresenta sinais claros de degradação, com a progressiva esferoidização da cementita, até a sua dissolução total e aumento de precipitação nos contornos de grão, o que está de acordo com o observado na literatura [3, 50].

Por outro lado, o aço de mesma composição química, mas de estrutura composta por ferrita e bainita, não mostra sinais tão bem definidos de degradação com a exposição à temperatura ao longo do tempo quando observado por microscopia ótica. O que se pode afirmar é que ocorre aumento da densidade de precipitados na ferrita e nos contornos de grão, além de diminuição da densidade de grãos bainíticos.

A Figura 111 mostra a evolução microestrutural do material de estrutura ferrítico-perlítica ao longo do tempo para cada temperatura de envelhecimento. A Figura 112 mostra o mesmo para o material ferrítico-bainítico.

Figura 111 – Evolução microestrutural do aço ferrítico-perlítico ao longo do tempo e da temperatura.

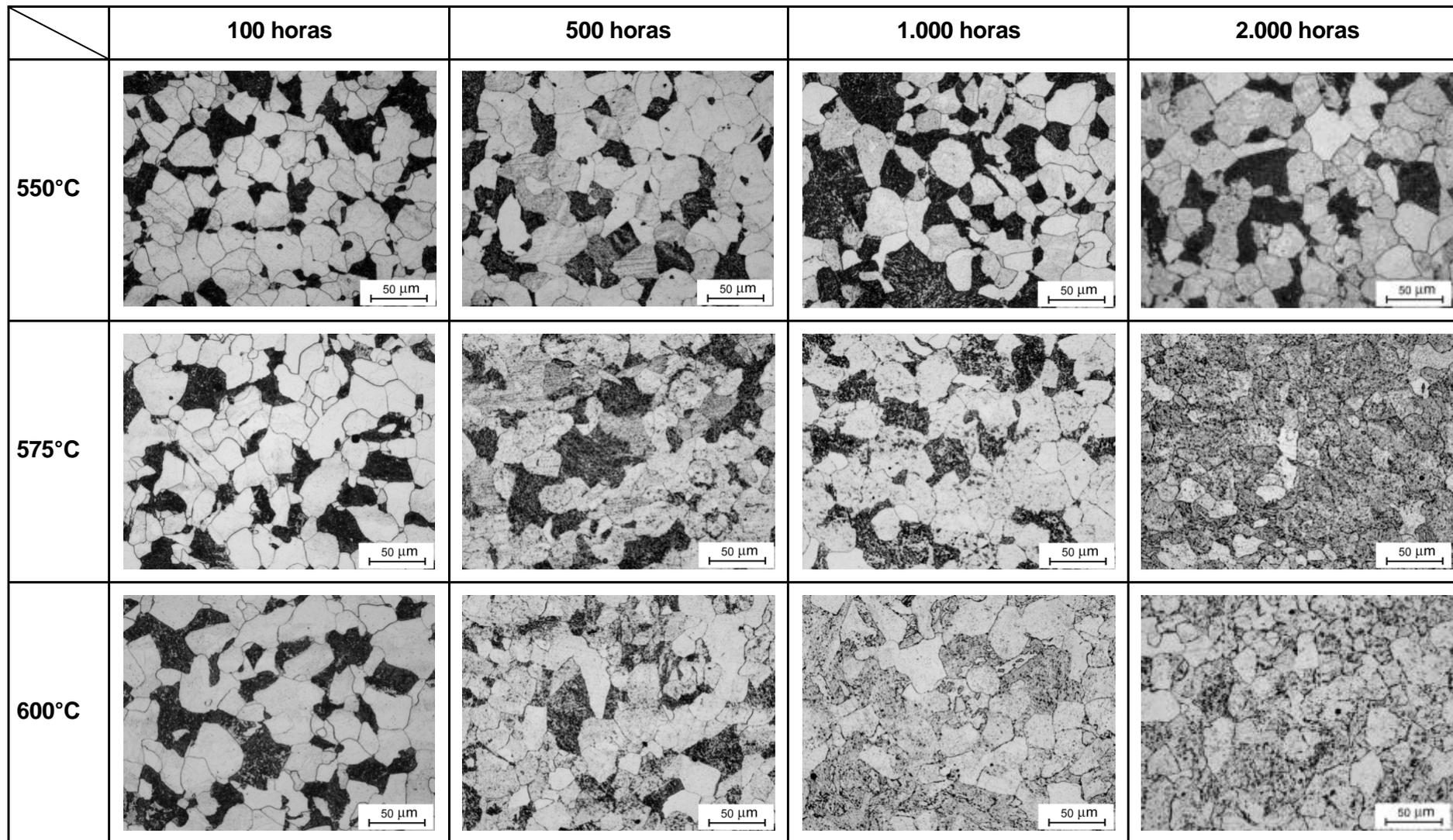
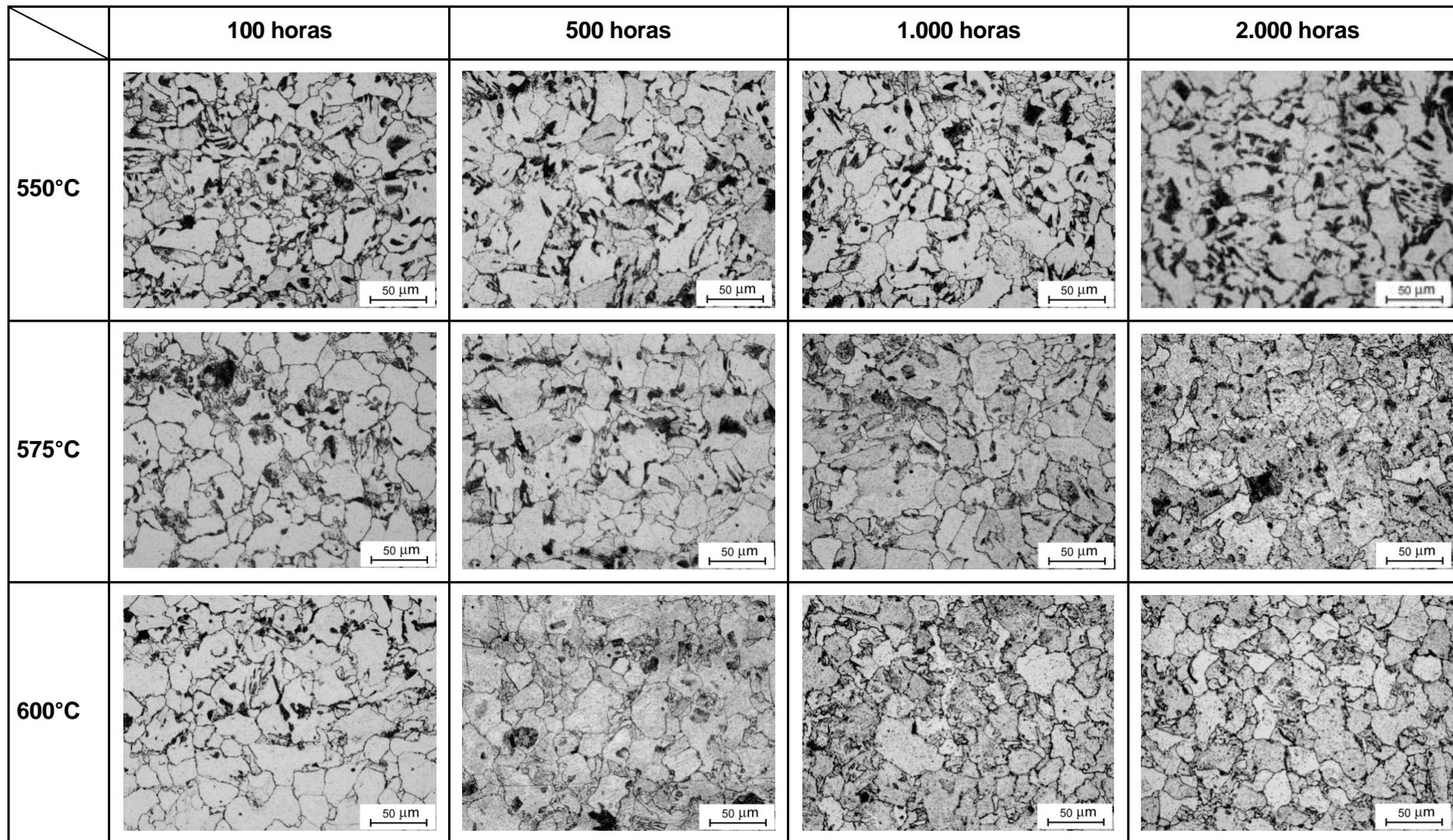


Figura 112 – Evolução microestrutural do aço ferrítico-bainítico ao longo do tempo e da temperatura.



Através da análise das Figuras 111 e 112, pode-se notar que as microestruturas referentes ao material perlítico degradado podem ser bastante semelhantes às do material bainítico, tornando a determinação de cada uma fortemente dependente do conhecimento prévio da metalografia do material quando novo.

A estabilidade microestrutural da bainita, comprovada tanto com o uso de microscopia ótica quanto com o uso do MET, vem ao encontro do que dizem Chaudhuri [6], Bhadeshia [7 e 26] e Lisboa [9]. O primeiro, em análise de falha de tubos de superaquecedor, percebeu que as estruturas, compostas por ferrita e bainita, do material novo e do que operou eram semelhantes. Bhadeshia afirma que não ter notado alterações microestruturais no aço 2,25Cr-1Mo bainítico. Já Lisboa diz que as tentativas em seu trabalho de se correlacionar observações via microscopia ótica e degradação por fluência se revelaram ineficientes. Tanto as observações dos três autores citados quanto os resultados do presente estudo refutam a ASM [21], que diz que a taxa de esferoidização mais lenta é associada a microestruturas perlíticas, e Beere [25], que sugere uma degradação mais rápida da bainita quando comparada à ferrita-perlita.

6.3 Microscopia eletrônica de transmissão

O aço perlítico apresenta, quando observado por MET, esferoidização progressiva da cementita, de acordo com o verificado por microscopia ótica neste trabalho e com o observado por Toft e Marsden [3], além de experimentar aumento da densidade de carbonetos do tipo M_2C , tanto nos grãos perlíticos quanto nos ferríticos.

O aço de estrutura ferrítico-bainítica não mostra sinais evidentes de degradação mesmo quando analisado por microscopia de transmissão. Os carbonetos lamelares que compõem os grãos bainíticos não sofrem alterações ao longo do envelhecimento imposto em virtude da estabilidade do $M_{23}C_6$, que é o constituinte das lamelas. Há pequeno aumento da quantidade de M_2C em todas as regiões, mas mais notadamente nas ferríticas.

A Figura 113 e a Figura 114 apresentam a evolução nanoestrutural observada por microscopia eletrônica de transmissão do material perlítico e bainítico.

Figura 113 – Evolução subestrutural do material ferrítico-perlítico ao longo do tempo e da temperatura.

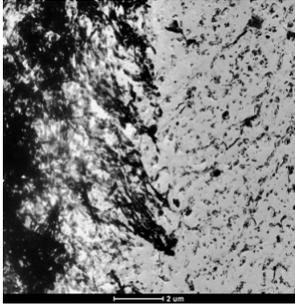
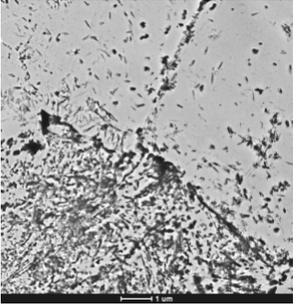
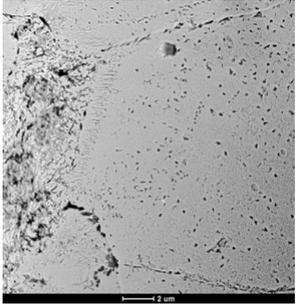
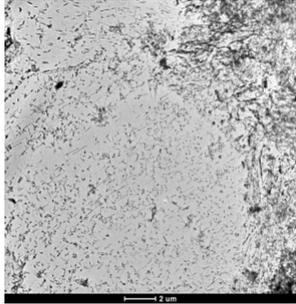
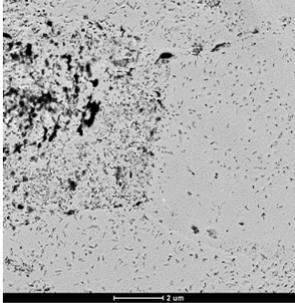
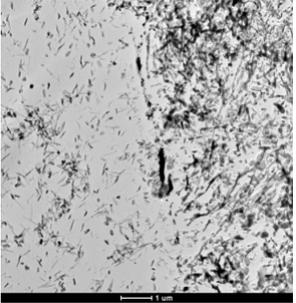
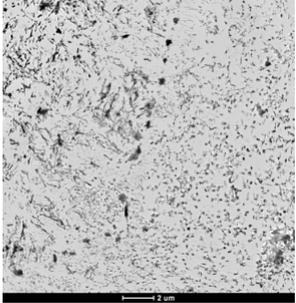
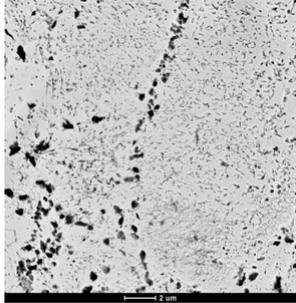
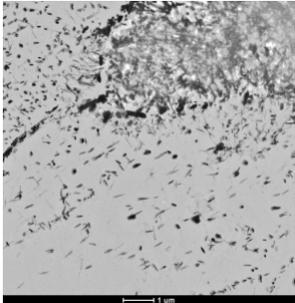
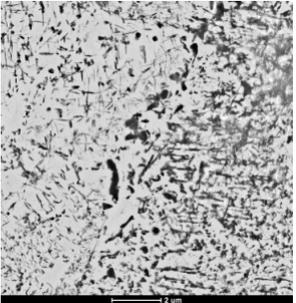
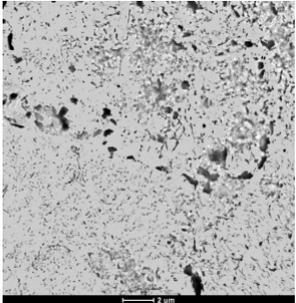
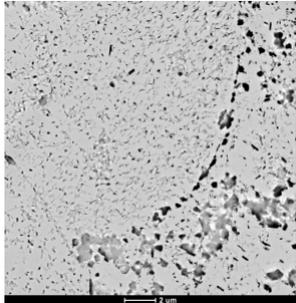
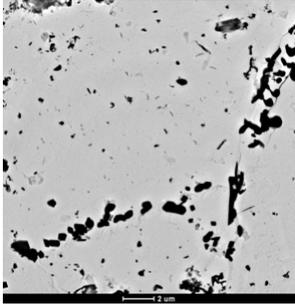
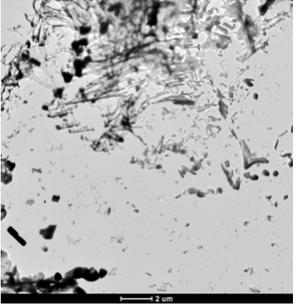
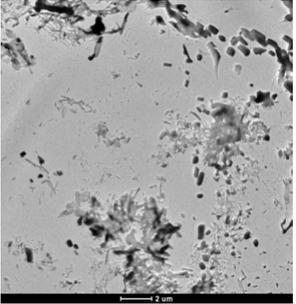
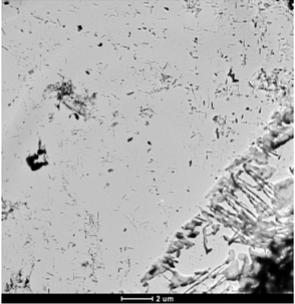
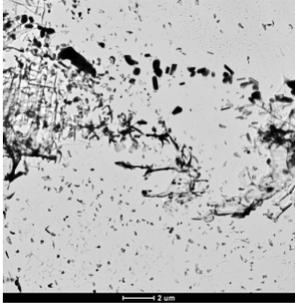
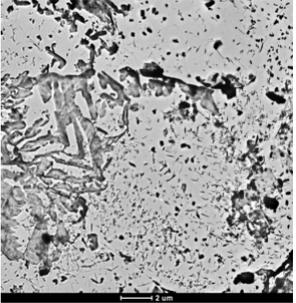
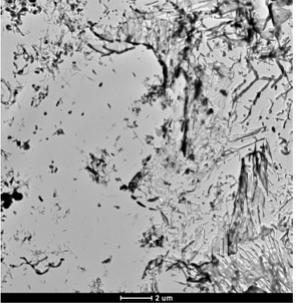
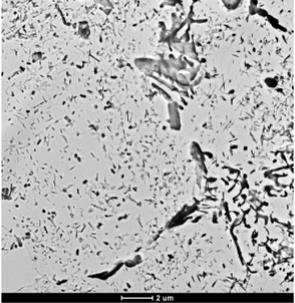
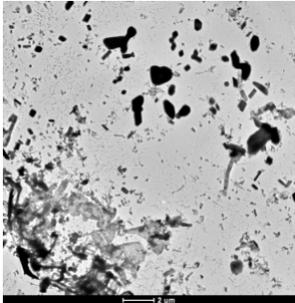
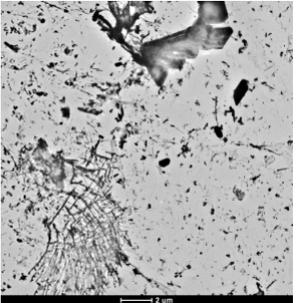
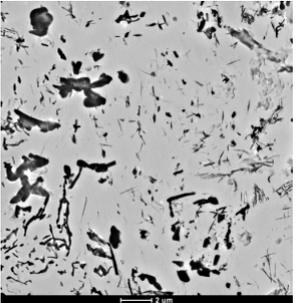
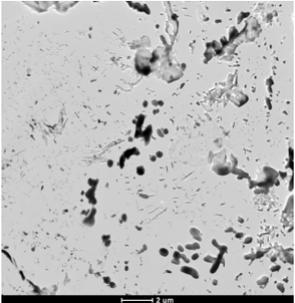
	100 horas	500 horas	1.000 horas	2.000 horas
550°C				
575°C				
600°C				

Figura 114 – Evolução subestrutural do material ferrítico-bainítico ao longo do tempo e da temperatura.

	100 horas	500 horas	1.000 horas	2.000 horas
550°C				
575°C				
600°C				

Através da observação via microscopia ótica, especialmente as micrografias referentes a 600°C e 2.000 horas, pode-se perceber que tanto a estrutura ferrítico-perlítica quanto a ferrítico-bainítica são muito semelhantes entre si, tornando difícil a identificação de cada uma. Entretanto, a análise das Figuras 113 e 114 mostra que, através de microscopia eletrônica de transmissão, essa diferenciação pode ser facilmente realizada.

6.2 Evolução da precipitação com o envelhecimento

Ao longo do tempo, as quantidades de cada tipo de carboneto são alteradas de forma diferente para as diferentes temperaturas e microestruturas iniciais.

Para cada temperatura utilizada neste trabalho, são apresentados três gráficos, que apresentam a separação por tipo de campo, ou seja, um para grão perlítico ou bainítico, um para ferrita e um para contorno de grão.

No caso de grãos perlíticos e bainíticos, as mudanças observadas são referentes às estequiometrias dos precipitados presentes. Dessa forma, as análises buscam medir as frações relativas entre carbonetos. Já em regiões ferríticas e de contorno de grão, as alterações não dizem respeito ao tipo de carboneto, mas sim à quantidade de um mesmo tipo. Por isso, optou-se por medir a fração volumétrica absoluta.

No caso do material ferrítico-perlítico, pode-se notar que a temperatura de 550°C foi insuficiente para promover alterações no material.

Ao se analisar os gráficos referentes às diferentes regiões, e mostrados nas Figuras 115 a 123, pode perceber que:

- i) Não há M_2C nas áreas perlíticas da amostra sem envelhecimento. Este carboneto aparece apenas a partir de 100 horas no envelhecimento a 575°C e a 600°C;
- ii) Na perlita, o M_3C predomina até pouco mais de 1.500 horas de exposição a 575°C e até 800 horas a 600°C;
- iii) Após esses tempos, passam a predominar o M_2C , o M_7C_3 e o $M_{23}C_6$;

- iv) Na ferrita, predomina o M_2C , cujo teor aumenta e estabiliza, acompanhado por pequenas quantidades de M_7C_3 . As outras estequiometrias aparecem em poucas quantidades;
- v) Nos contornos de grão, predomina o M_2C , com tendência de queda, enquanto aumentam as quantidades de M_7C_3 e de $M_{23}C_6$;

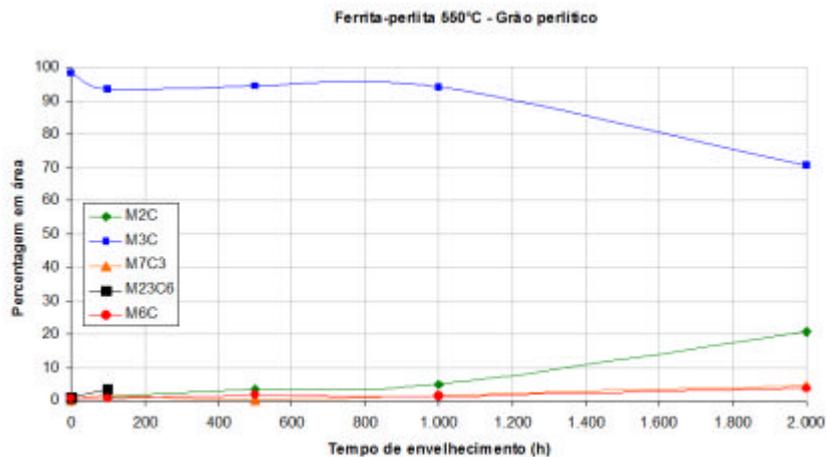


Figura 115 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão perlítico do material de estrutura ferrítico-perlítica submetido a 550°C.

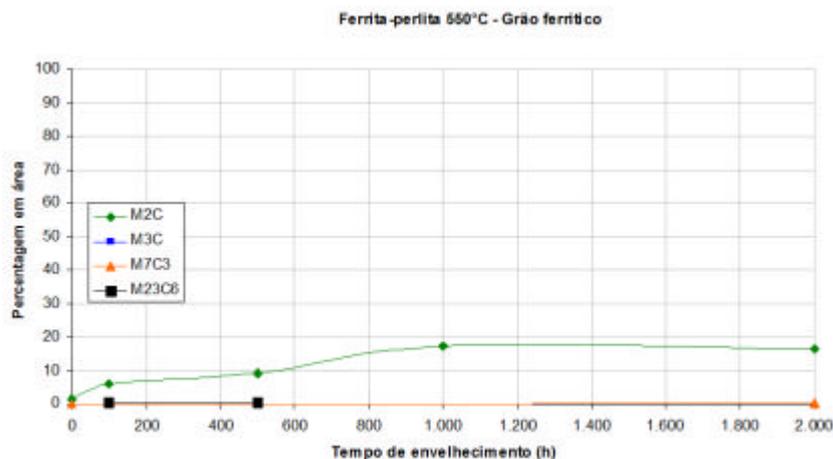


Figura 116 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão ferrítico do material de estrutura ferrítico-perlítica submetido a 550°C.

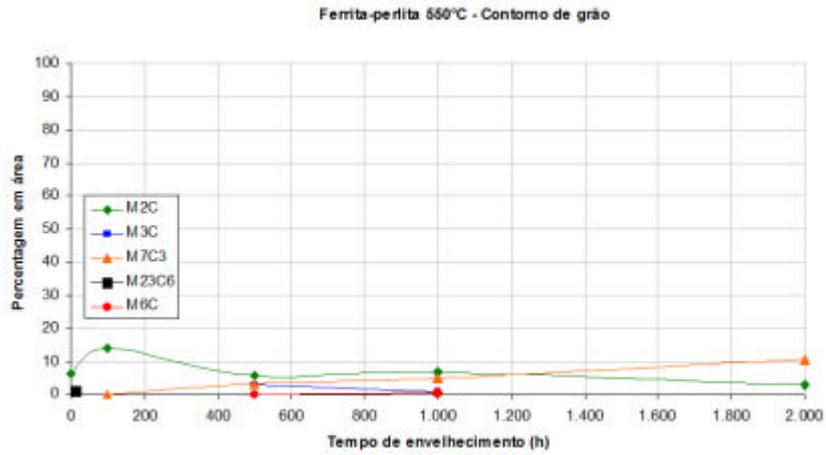


Figura 117 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no contorno de grão do material de estrutura ferrítico-perlítica submetido a 550°C.

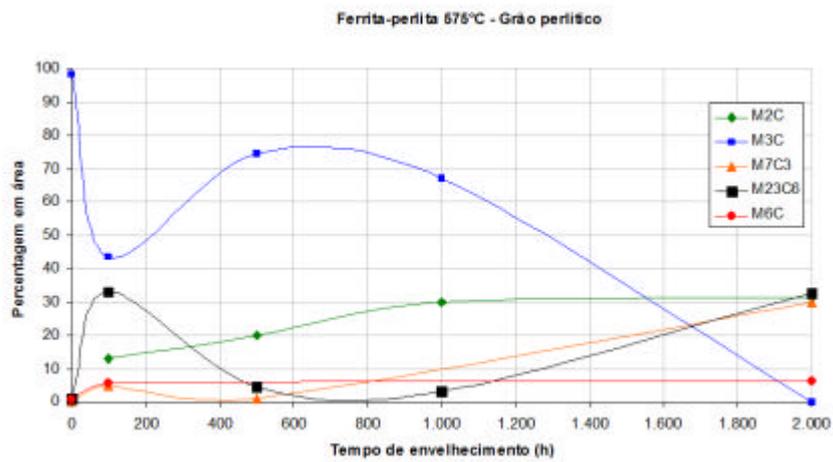


Figura 118 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão perlítico do material submetido a 575°C.

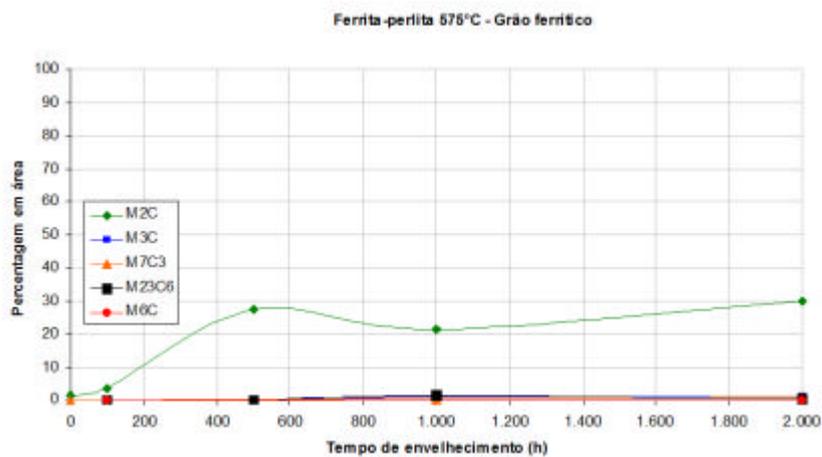


Figura 119 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão ferrítico do material submetido a 575°C.

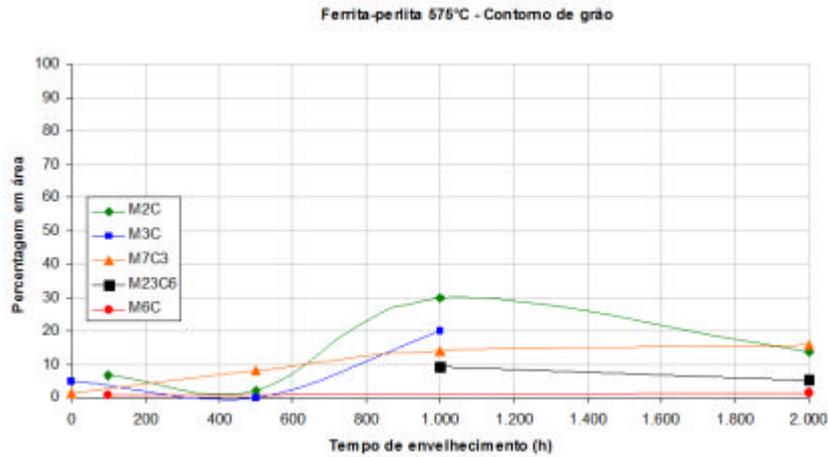


Figura 120 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no contorno de grão do material submetido a 575°C.

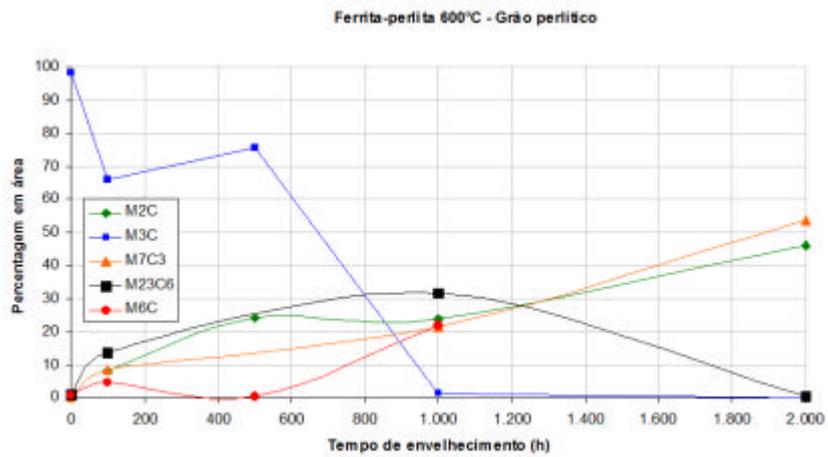


Figura 121 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão perlítico do material de estrutura ferrítico-perlítica submetido a 600°C.

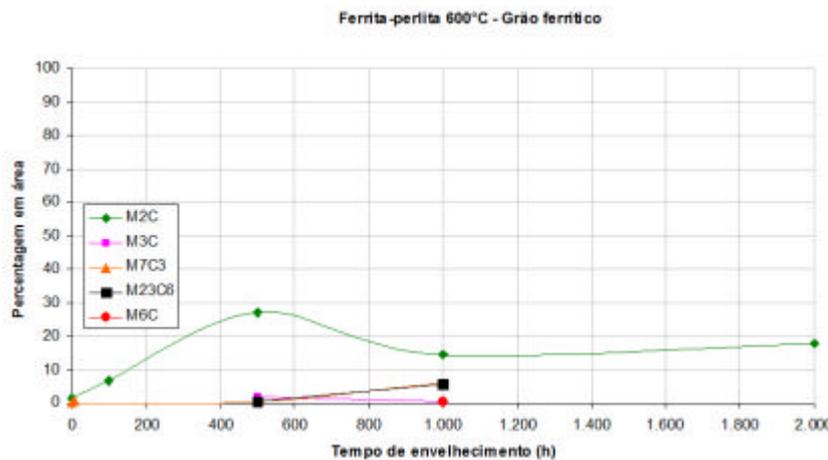


Figura 122 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão ferrítico do material de estrutura ferrítico-perlítica submetido a 600°C.

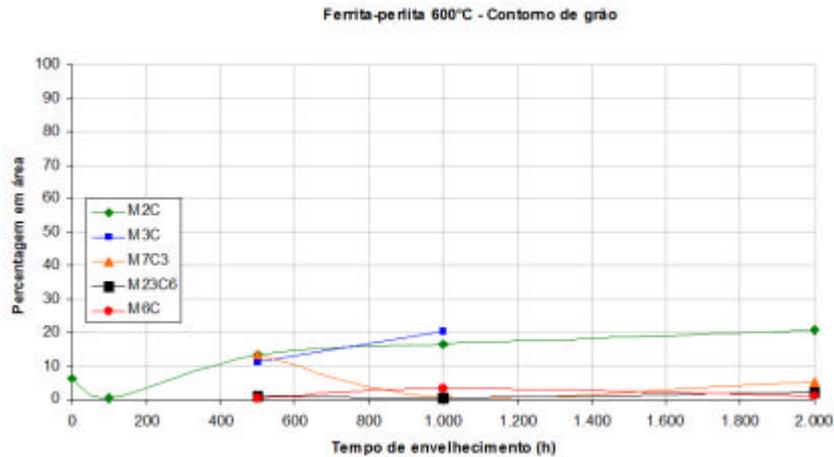


Figura 123 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no contorno de grão do material de estrutura ferrítico-perlítica submetido a 600°C.

As análises de cada região, mostradas nas Figuras 124 a 132 permitem observar:

- i) Não há M_3C presente;
- ii) Nos grãos bainíticos, predomina o $M_{23}C_6$, que tem tendência à estabilidade;
- iii) Na ferrita, predomina o M_2C , mas não de forma absoluta como no caso do material perlítico. Há quantidades razoáveis de $M_{23}C_6$ junto do M_2C ;
- iv) O M_7C_3 não mostra variação consistente em função do tempo de envelhecimento;
- v) Nos contornos de grão, predomina o $M_{23}C_6$ e há tendência de aumento do M_2C e do M_7C_3 ;
- vi) O M_6C tem variação pequena e inconstante, semelhante ao observado na estrutura perlítica.

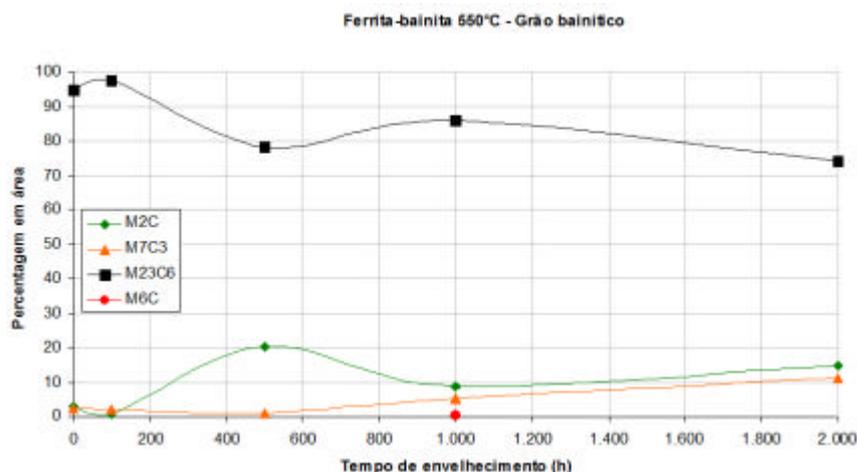


Figura 124 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão bainítico do material submetido a 550°C.

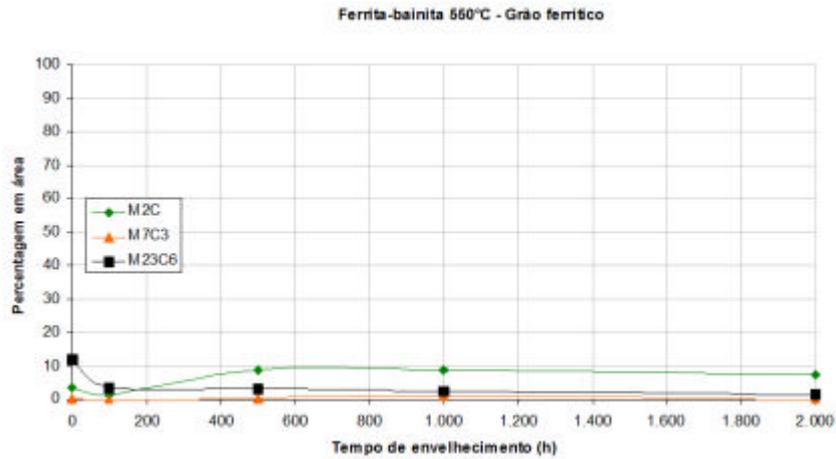


Figura 125 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão ferrítico do material submetido a 550°C.

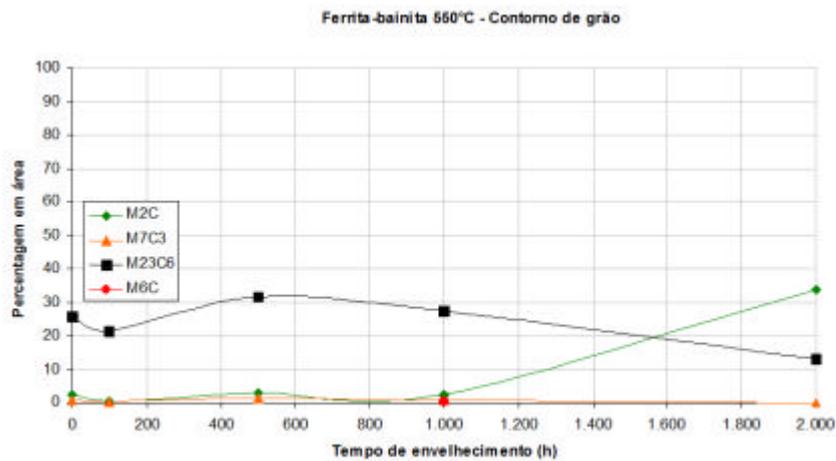


Figura 126 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no contorno de grão do material submetido a 550°C.

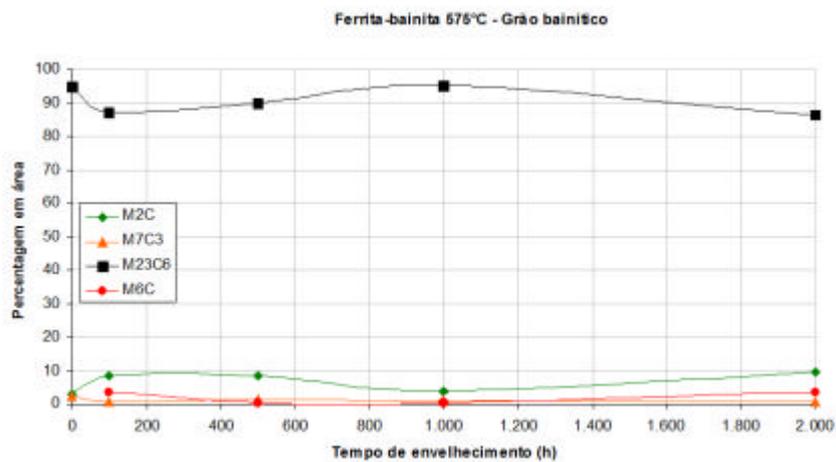


Figura 127 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão bainítico do material de estrutura ferrítico-bainítica submetido a 575°C.

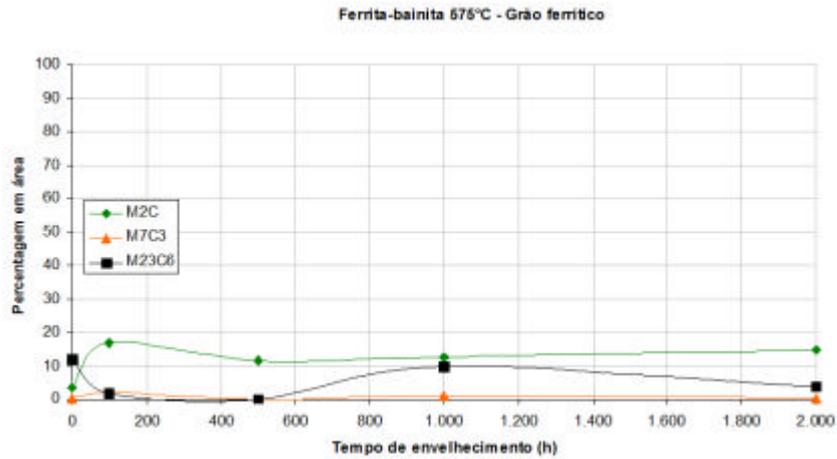


Figura 128 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão ferrítico do material de estrutura ferrítico-bainítica submetido a 575°C.

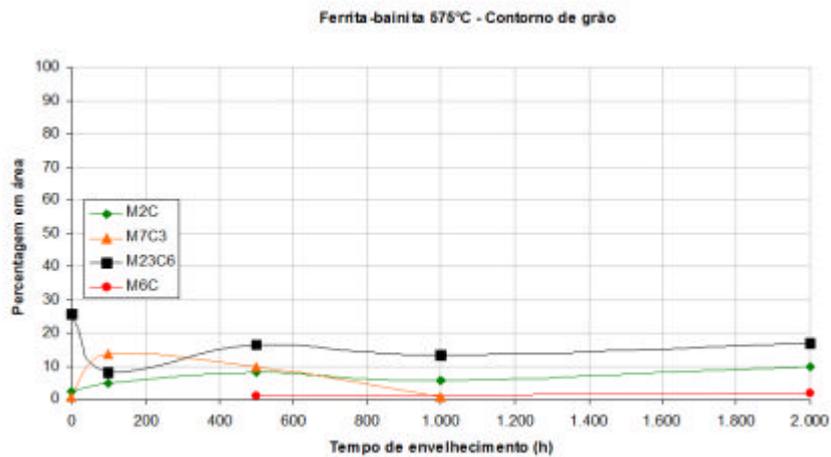


Figura 129 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no contorno de grão do material de estrutura ferrítico-bainítica submetido a 575°C.

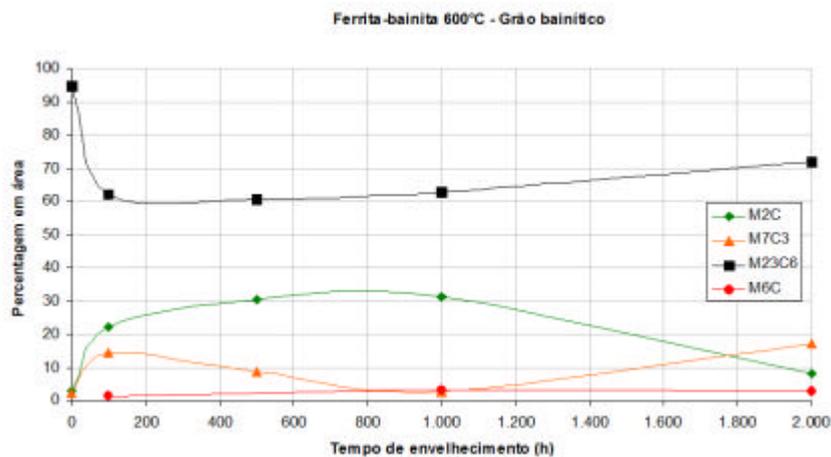


Figura 130 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão bainítico do material de estrutura ferrítico-bainítica submetido a 600°C.

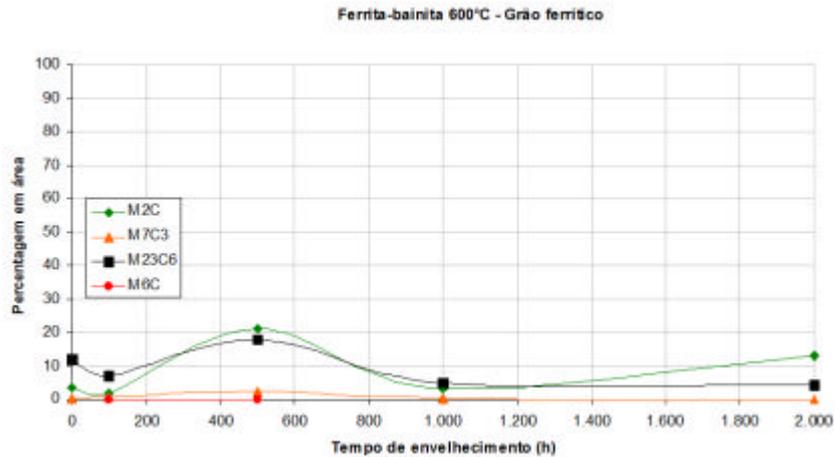


Figura 131 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no grão ferrítico do material de estrutura ferrítico-bainítica submetido a 600°C.

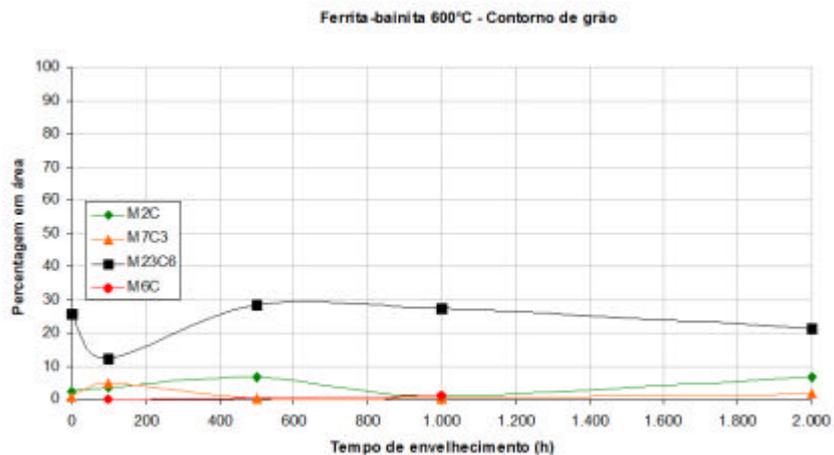


Figura 132 – Evolução ao longo do tempo da precipitação no contorno de grão do material de estrutura ferrítico-bainítica submetido a 600°C.

6.5 Análise da precipitação

A morfologia e distribuição dos carbonetos característicos do aço 2,25Cr-1Mo, e submetidos a análises via EDS neste trabalho, são consistentes com o estudo de Siqueira [43], que discorreu sobre estruturas cristalinas e morfologias dos precipitados.

A precipitação, estabilidade, morfologia e distribuição dos carbonetos M_2C , tanto no material ferrítico-perlítico quanto no ferrítico-bainítico, comprova o observado por Jones e Avyle [14], que discorreram sobre o aumento da tensão de ruptura do aço quando este tipo de precipitado está presente como uma fina dispersão e com forma acicular, e também de Silveira [43], que aponta este tipo de precipitado como sendo tipicamente acicular e fino, quando ocorre de maneira intragranular, e levemente

globular, quando aparece em contorno de grãos.

No caso do material perlítico, a manutenção da resistência está aparentemente associada à estabilidade e ao aumento da quantidade de M_2C , tanto nos grãos ferríticos quanto nos perlíticos; já na parte bainítica, a estabilidade microestrutural, além do fator anterior, sugere uma maior dificuldade de retirada dos elementos de liga de solução sólida. Nos dois casos, os resultados estão de acordo com a literatura [14, 22, 23 e 24].

Dessa forma, os precipitados M_2C aparentemente têm duas importantes funções no aço 2,25Cr-1Mo: (i) são os principais responsáveis pela manutenção da resistência mecânica do material como um todo, em decorrência de sua morfologia acicular, sua distribuição (dispersos na matriz e em forma de aglomerados) e sua estabilidade, além de (ii) estarem associados à evolução da precipitação, uma vez que aparecem freqüentemente associados a carbonetos mais estáveis.

A seqüência geral de precipitação para a ferrita-perlita pode ser descrita como:



Já no caso do material de estrutura ferrítico-bainítica, tem-se:



Essas seqüências não são totalmente consistentes com o que dizem Baker e Nutting [42], que mostram o M_6C aparecendo apenas na ferrita-perlita, ou com Yang *et al* [59], que, mesmo estudando o material que operou por um longo período, não indicam a presença do precipitado M_6C . Além disso, Baker e Nutting e Yang afirmam que a evolução da precipitação obedece a etapas discretas, com coexistência limitada entre as diferentes estequiometrias. As seqüências mostradas acima correspondem melhor ao que diz Bhadeshia [7], que apresenta os carbonetos presentes no aço 2,25Cr-1Mo como fases que coexistem durante longos tempos de envelhecimento, embora este autor aponte o $M_{23}C_6$ como último carboneto a surgir – e em condições bastante agressivas (para temperaturas acima de 675°C).

7. CONCLUSÕES

Os resultados das análises efetuadas neste trabalho, considerando-se as condições utilizadas, permitem as conclusões abaixo.

A microestrutura composta por ferrita e bainita é mais estável do que a ferrítico-perlítica, mesmo quando as análises são aprofundadas com a utilização de microscopia de transmissão.

Entre as condições utilizadas neste trabalho, a temperatura de 550°C não foi suficiente para promover mudanças perceptíveis com o uso de microscopia ótica. Entretanto, puderam-se perceber leves alterações nos percentuais de carbonetos via microscopia eletrônica de transmissão.

Os resultados dos ensaios de dureza revelaram que não há diferenças significativas entre os valores relativos às condições de envelhecimento ou mesmo entre as duas microestruturas avaliadas para as condições utilizadas neste trabalho. Embora o intervalo entre as durezas seja pequeno, os valores referentes à bainita estão, em todos os pontos, abaixo dos relativos à perlita.

O endurecimento secundário ocorre em todos os casos analisados, o que pode ser comprovado pela estabilidade dos valores de dureza, embora haja retirada de elementos de liga de solução sólida, nas diferentes condições e microestruturas.

Na ferrita-perlita, o único carboneto que mantém a estabilidade ao longo da exposição à temperatura é o M_2C , que aumenta em quantidade ao longo do tempo, mas continua disperso na matriz e com morfologia acicular ou em forma de pequenos blocos aglomerados. Deve ser atribuída a este precipitado a responsabilidade pelo endurecimento secundário.

A seqüência de precipitação para a ferrita-perlita foi:



Na ferrita-bainita, os precipitados como um todo sofrem poucas alterações estequiométricas. O $M_{23}C_6$ tem, nessa estrutura, a mesma morfologia e a mesma distribuição do M_3C na ferrita-perlita: aparece nos grãos bainíticos, como grandes

aglomerados de lamelas. Aparece também junto ao M_2C na ferrita, ao contrário do observado nas amostras ferrítico-perlíticas, nas quais há hegemonia quase completa do M_2C . No caso da bainita, o endurecimento secundário ocorre devido à presença de M_2C e à estabilidade do $M_{23}C_6$.

Neste caso, a seqüência de precipitação foi:



Apesar de, nas seqüências, o precipitado M_6C aparecer para tempos longos, sugerindo ser ele um indicativo de degradação, este fato não pôde ser comprovado utilizando-se as condições de envelhecimento deste estudo. Além disso, no material ferrítico-perlítico novo este carboneto foi encontrado e suas quantidades nas amostras envelhecidas não tiveram aumento proporcional ao tempo de exposição à temperatura.

Para as duas microestruturas analisadas, o indicativo mais seguro de alterações nanoestruturais foi o coalescimento de M_7C_3 e de $M_{23}C_6$ nos contornos de grão.

As microestruturas obtidas do material perlítico envelhecido podem facilmente ser confundidas com as do material bainítico. Dessa forma, qualquer análise do aço 2,25Cr-1Mo, seja em campo ou em laboratório, é dependente do conhecimento da estrutura inicial. Entretanto, a utilização de microscopia eletrônica de transmissão permite diferenciar os dois tipos de microestruturas através da identificação dos precipitados presentes em cada uma.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHAUDHURI, S., "Philosophy of integrity assessment of engineering components", *Materials Science and Engineering A* 489, pp. 259-266, 2008.
- [2] CHAUDHURI, S., "Philosophy of integrity assessment of engineering components", *Materials Science and Engineering A* 489, pp. 259-266, 2008.
- [3] TOFT, L.H, MARSDEN, R.A., "Structural processes in creep: special report nº. 70", *Iron & Steel Institute*, pp. 238-244, London, 1961.
- [4] RAY, A., K., DIWAKAR, K., PRASAD, B., N., TIWARI, Y., N., GHOSH, R., N., WHITTENBERGER, J., D., "Long term creep-rupture behavior of 813 K exposed 2.25Cr-1Mo steel between 773 and 873 K", *Materials Science and Engineering A* 454-455, pp. 124-131, 2007.
- [5] RAY, A. K., TIWARI, Y. N., ROY, P. K., SINHA, S. K., SINGH, R., CHAUDHURI, S., "Remnant life assessment of service-exposed pendent superheater tubes", *Engineering Failure Analysis* 9, pp. 83-92, 2002.
- [6] CHAUDHURI, S., "Some aspects of metallurgical assessment of boiler tubes – Basic principles and case studies", *Materials Science and Engineering A* 432, pp. 90-99, 2006.
- [7] BHADSHIA, H. K. D. H., "Bainite in steels", *The University Press*, Cambridge, 2001.
- [8] BYEON, J. W., KWUN, S. I., "Magnetic nondestructive evaluation of thermally degraded 2.25Cr-1Mo steel", *Materials Letters* 58, pp. 94-98, 2003.
- [9] LISBOA, M. B., Nova geração de aços ferríticos Fe-Cr-W(V) – Análise da evolução microestrutural e comportamento mecânico sob condições de fluência, Tese de D.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

-
- [10] COPELAND, J.F., LICINA, G.J., "A review of 2 ¼ Cr-1Mo steels for steam generator application", *Symposium on Structural Materials for Service at Elevated Temperatures in Nuclear Power Generation*, ASME, Houston, 1975.
- [11] MARSHALL, A. W., ZHANG, Z., HOLLOWAY, G. B. "Welding consumables for P92 and T23 creep resisting steels", *Welding and Repair Technology for Power Plants, 5th International EPRI RRAC Conference*, 1-17, Point Clear, Alabama, USA, 27 June 2002.
- [12] LUNDIN, C.D., KELLEY, S.C., MENON, R., "Stress rupture behavior of post weld heat treated 2 ¼-1Mo steel weld metal", *WRC Bulletin*, n. 315, pp. 1-66, June 1986.
- [13] LUNDIN, C. D., LIU, P. AND CUI, Y., "A Literature review on characteristics of high temperature ferritic Cr-Mo steels and weldments", *WRC Bulletin*, n^o 454, pp. 1-36, 2000.
- [14] JONES, W. R., AVYLE, V. D., "Substructure and strengthening mechanisms in 2,25Cr-1Mo steel at elevated temperatures", *Metallurgical Transactions A*, v. 11A(8), pp. 1275-1286, 1980.
- [15] ARGENT, B. B., NIEKERK, V., REDFERN, G. A., "Creep of ferritic steels", *JISI*, v. 208, pp. 830-843, 1970.
- [16] Nippon Steel Corporation, "Data package for NF 616 ferritic steel (9Cr-0.5Mo-1.8W-Nb-V)", *Technical Report*, 2nd Edition, March, 1994.
- [17] LIU, X.Y., FUJITA, T., "Development of high strength ferritic heat resistant steels". In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Creep of Materials*, pp. 441-445, Lake Buena Vista, May 1992.
- [18] HASHIMOTO, K., TOKUNO, K., HAMADA, K., TSUCHIDA, "Creep embrittlement of V-modified 2.25Cr-1Mo steels", *The 1992 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP*, v. 239, pp. 81-87, New Orleans, Louisiana, June 21-25, 1992.

-
- [19] PILLING, J., RIDLWY, N., AND GOOCH, D.J., "The effect of titanium on creep strength in 2.25%Cr-1Mo steels", *Metallurgical Transactions A*, v. 14A, nº 7, pp.1443-1449, 1983.
- [20] PICKERING, F. B., "Physical metallurgy and design of steels", *Applied Science*, London, 1978.
- [21] ASM, "Properties and selection: irons, steels, and high performance alloys", *Metals Handbook*, v.1, Metals Park, Ohio, 1990.
- [22] LE MAY, I., "Principles of mechanical metallurgy", *Elsevier Science Publishing Co*, 1983.
- [23] REED-HILL, Robert E., "Princípios de metalurgia física", Guanabara dois, 2ª edição, Rio de Janeiro, 1983.
- [24] HULL, D., BACON, D. J., "Introduction to dislocations", *International Series on Materials Science and Technology*, v. 37, BPC Wheatons, 1984.
- [25] BEERE, W., "Theoretical treatment of creep cavity growth and nucleation", *Cavities and Cracks in Creep and Fatigue*, Applied Science, J. Gittus ed., pp. 1-27, London, 1981.
- [26] BHADESHIA, H. K. D. H., HONEYCOMBE, R. W. K., "Steels, microstructure and properties", *Elsevier Ltd.*, Third edition, 2006.
- [27] SKLENCKA, V., KUCHAROVÁ, K., SVOBODA, M., KLOC, L., BURSÍK, J., KROUPA, A., "Long term creep behavior of 912%Cr power plant steel". *CAPE 2003*, Cape Town, South Africa, 2003.
- [28] PHILIPS, F., "The slow stretch of India rubber, glass and metal wire when subjected to a constant pull", *Phil. Mag.*, v. 9, pp. 513, 1905.
- [29] ANDRADE, E.N. DA C., "The viscous flow in metals and allied phenomena", *Proc. Roy. Soc.*, v. 84, pp. 1-13, 1910.

-
- [30] ANDRADE, E.N. DA C., "The flow in metals under large constant stress". *Proc. Roy. Soc.*, v. 90, pp. 329, 1914.
- [31] GAROFALO, F., "Ductility in creep", *Ductility*, ASM, Metal Park, OH, pp. 87-132, 1968.
- [32] HARPER, J.G., DORN, J.E., *Acta Met.*, v.5, pp. 654, 1957.
- [33] BHADESHIA, H. K. D. H., "Comprehensive structural integrity", In: Elsevier Ltd., *Mechanisms and models for creep deformations and rupture*, v. 5, chapter 5.01, 2007.
- [34] BLUM, W., EISENLOHR, P., "Dislocation mechanics of creep", *Materials Science and Engineering A*, pp. 7-13, 2009.
- [35] JAYAN, V., KHAN, M. Y., HUSAIN, M., "Coarsening of nanosized carbide particles in 2.25Cr-1Mo power plant steel after extended service", *Materials Letters* 58, pp. 2569-2573, 2004.
- [36] LIMA, C. R., PINTO A. L., FURTADO, H. C., DE ALMEIDA, L. H., SOUZA, M. F., MAY, I. L., "Quantitative observations of precipitation in 2.25Cr-1Mo steel exposed to different creep conditions in a power station", *Engineering Failure Analysis*, v. 16, pp. 1493-1500, 2009.
- [37] FURTADO, H. C., DE ALMEIDA, L. H., MAY, I. L., "Damage and remaining life estimation in high temperature plant with variable operating conditions", *OMNI Power plant – Operation, Maintenance and Materials Issues*, v. 5, 2008.
- [38] ANDREWS, K.W., HUGHES, H., "Hexagonal carbide and nitride phases and their occurrence in some alloy steels", *Journal of the Iron and Steel Institute*, pp. 304-311, November 1959.
- [39] RUNDLE, R. E., "A new interpretation of interstitial compounds – Metallic carbides, nitrides and oxides of composition MX", *Acta Crystallographica*, v.1, pp. 180-187, 1948.

-
- [40] PILLING, J., RIDLEY, N., "Tempering of 2.25Cr-1Mo low carbon steels", *Met. Trans.*, v. 13A, pp. 557-563, 1982.
- [41] TODD, J.A., "The early stages of tempering in 3Cr-1.5Mo steel", *Scripta Metallurgica*, v. 20, pp. 269-274, 1986.
- [42] BAKER, R. G., NUTTING, J., "The tempering of 2¼-1Mo steel after quenching and normalizing", *Journal of the Iron and Steel Institute*, v. 192, pp. 257-268, July, 1959.
- [43] SIQUEIRA, M.H.S., *Caracterização de juntas soldadas de tubos de aço 5Cr-1/2Mo novas e envelhecidas em serviço*. Tese de Msc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil, 1997.
- [44] KOZESCHNIK, E., HOLZER, I., "Precipitation during heat treatment and service: characterization, simulation and strength contribution", *In: Creep resistant steels*, CRC Press, chapter 10, 2008.
- [45] VARIN, R. A., HAFTECK, J., "Structural changes in a ferritic heat-resistant steel after long-term service", *Materials Science Engineering*, v. 62, pp. 129-36, 1984.
- [46] YANG, J. R., HUANG, C. N., HORNG, J. L. "Microstructural examination of 2.25Cr-1Mo steel pipes after extended service", *Materials Characterization*, v. 30, pp. 75-88, 1993.
- [47] DAS, S., JOARDER, A., "Effect of long-term exposure at elevated temperature on microstructural changes of 5Cr-0.5Mo steels", *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 28A, pp. 1607-1616, 1997.
- [48] FURTADO, H. C., LISBOA, M. B., RIGUEIRA, G., DE ALMEIDA, L. H., "High temperature degradation in power plants and refineries", SBPmat, Guarujá, SP, 2008.

-
- [49] DE ALMEIDA, L. H., FURTADO, H. C., "A TEM study of the precipitation evolution in Cr-Mo and Cr-W ferritic steels and its relationship with creep behavior", *8th American Congress of Electron Microscopy*, Havana, 2005.
- [50] FURTADO, H. C., *Avaliação de danos em aços ferríticos Cr-Mo operando em regime de fluência*, Tese de D.Sc., PEMM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [51] HASHIMOTO, K., TOKUNO, K., HAMADA, K., TSUCHIDA, Y., PRAGER, M., "Creep embrittlement of V-modified 2.25 Cr-1 Mo steels", *PVP*, v. 239, *MPC*, v. 33, *Serviceability of Petroleum, Process, and Power Equipment*, ASME, pp. 81-87, 1992.
- [52] KOHLHÖFER, W., PENNY, R.K., "Hardness testing as a means for creep assessment". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 66, pp.1-3, 1996.
- [53] FURTADO, H., C., LISBOA, M., B., ALMEIDA, L., H., "Relação entre dureza e propriedades de resistência à fluência no aço 9Cr-1Mo", *Anais do 63^o Congresso Anual da ABM*, Santos, SP, 2008.
- [54] MASUYAMA, F., "Hardness model for creep-life assessment of high-strength martensitic steels", *Materials Science and Engineering A* 510-511, pp. 154-157, 2009
- [55] HOLLOWOMON, J.H., JAFFEE, L.D., "Time-temperature relations in tempering steel". *Trans. AIME*, v. 162, pp. 223, 1943.
- [56] LARSON, F.R., MILLER, J., "A time-temperature relationship for rupture and creep stress", *Trans ASME*, v.74, pp. 765, 1952.
- [57] RAY, A., K., TIWARI, Y., N., ROY, P., K., CHAUDHURI, S., BOSE, S., C., GHOSH, R., N., WHITTENBERGER, J., D., "Creep rupture analysis and remaining life assessment of 2.25Cr-1Mo steel tubes from a thermal power plant", *Materials Science and Engineering A* 454-455, pp. 679-684, 2007.

[58] <http://www.keytometals.com/>

[59] YANG, J. R., HUANG, C. N., HORNG, J. L. "Microstructural examination of 2.25Cr-1Mo steel pipes after extended service", *Materials Characterization*, v. 30, pp. 75-88, 1993.

Anexo I

Material envelhecido a 550°C

1.1 Ferrita-perlita 100 horas

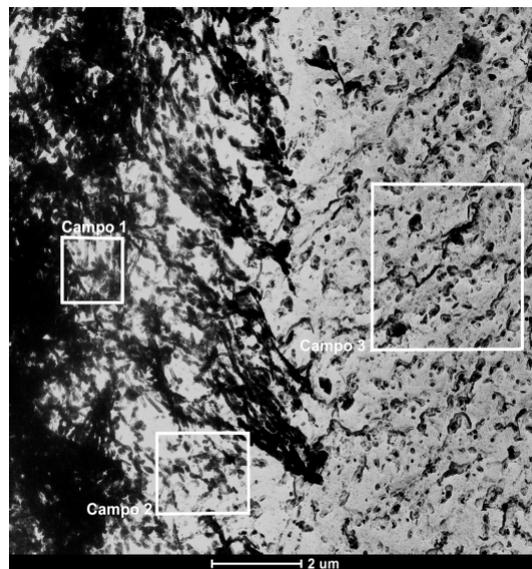


Figura 1 – Imagem da amostra de estrutura composta por perlita e ferrita, envelhecida por 100 horas a 550°C e com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1, 2 e 3, apresentados a seguir.

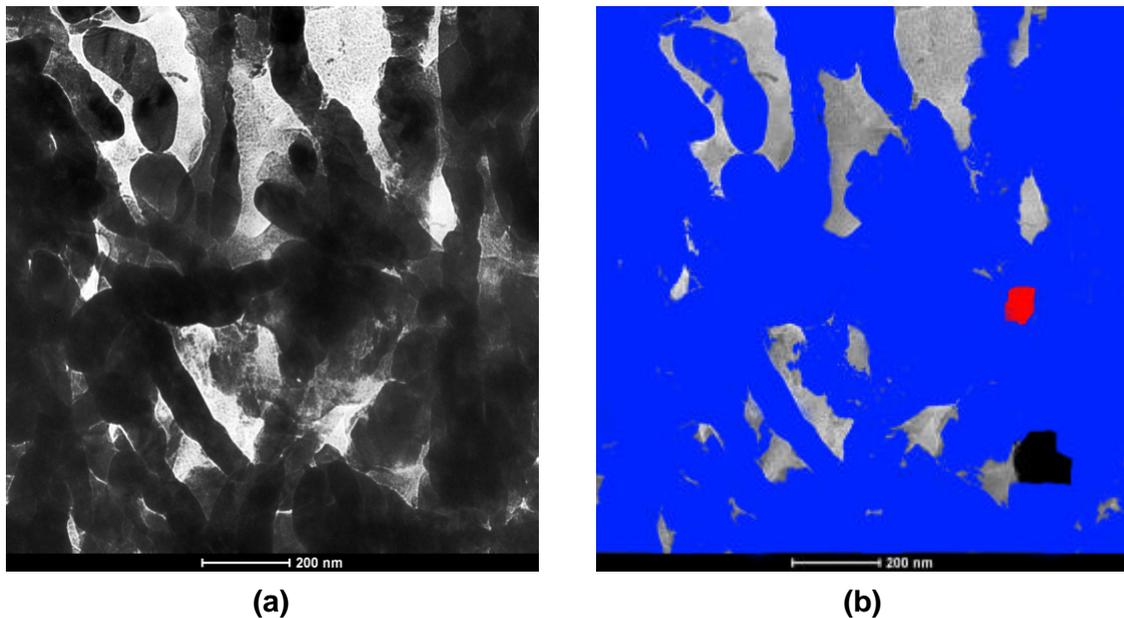


Figura 2 – (a) Campo 1, perlítico, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 38.000 X, e (b) identificação dos precipitados presentes. Pode-se notar que há apenas um precipitado do tipo $M_{23}C_6$ (preto) e um M_6C (vermelho), enquanto a maior parte é de M_3C (azul).

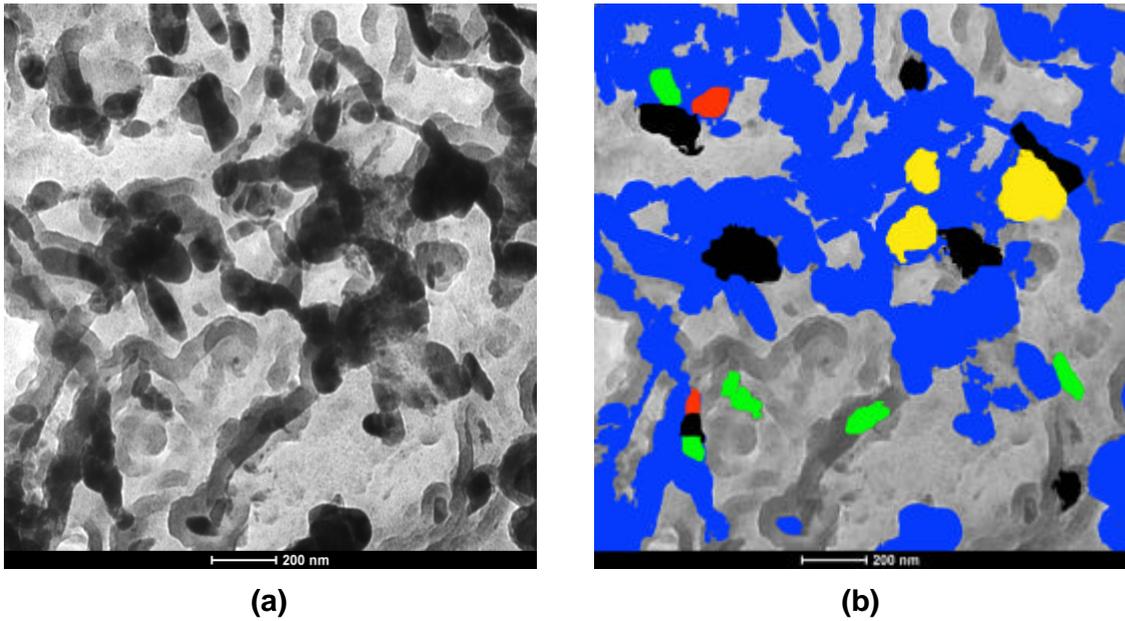


Figura 3 – (a) Campo 2, perlítico, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Nota-se que a maior parte dos carbonetos é M_3C (azul), mas também estão presentes o M_2C (verde), o M_7C_3 (amarelo), o $M_{23}C_6$ (preto) e uma pequena quantidade de M_6C (vermelho).

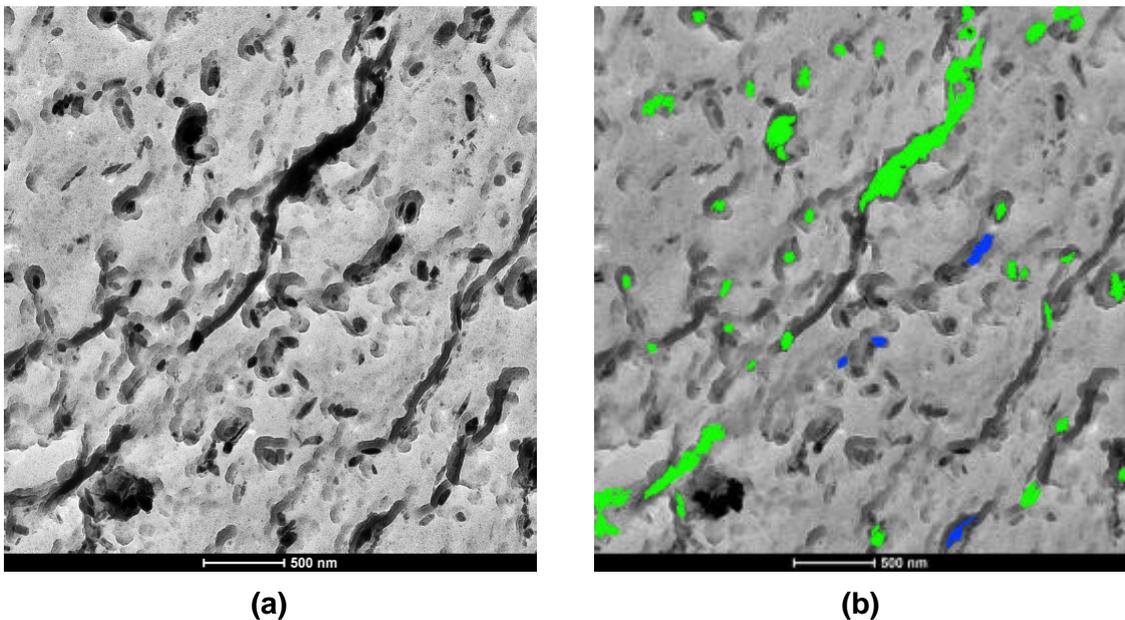


Figura 4 – (a) Campo 3, ferrítico, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados presentes: pequenas quantidades de M_3C (azul) e de $M_{23}C_6$ (preto), com predominância de M_2C (verde).

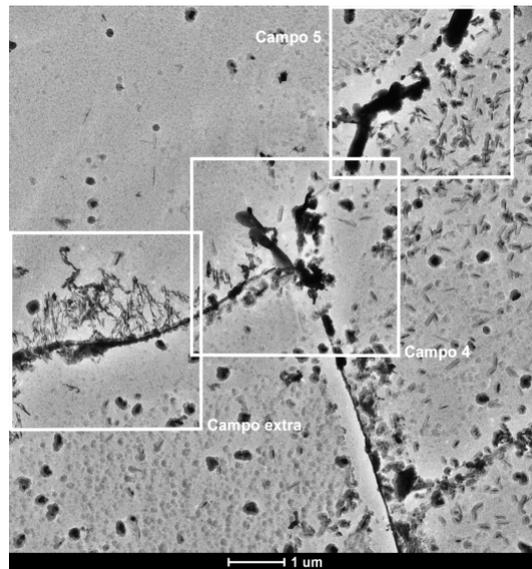
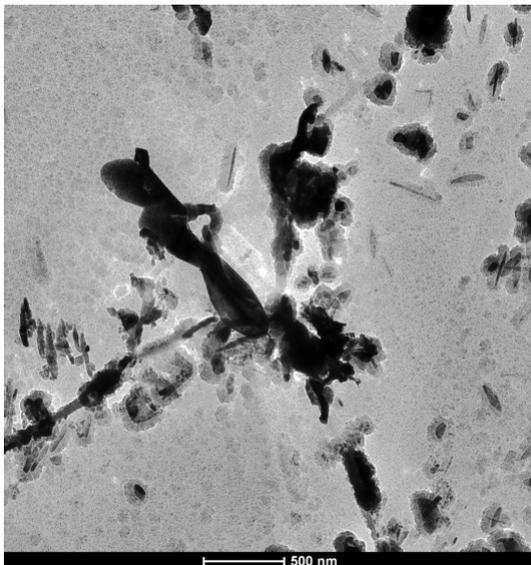
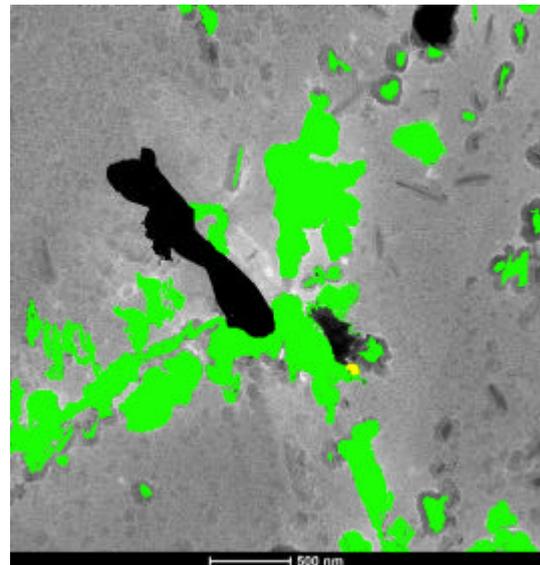


Figura 5 – Imagem da amostra composta por ferrita e perlita, com aumento de 5.000 X, apresentando os campos 4, 5 e extra.

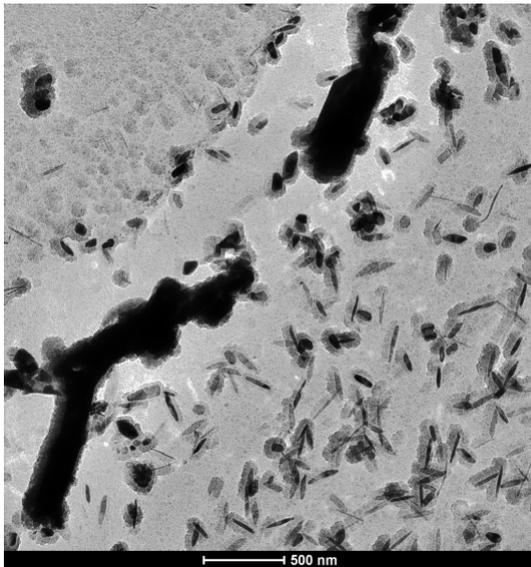


(a)

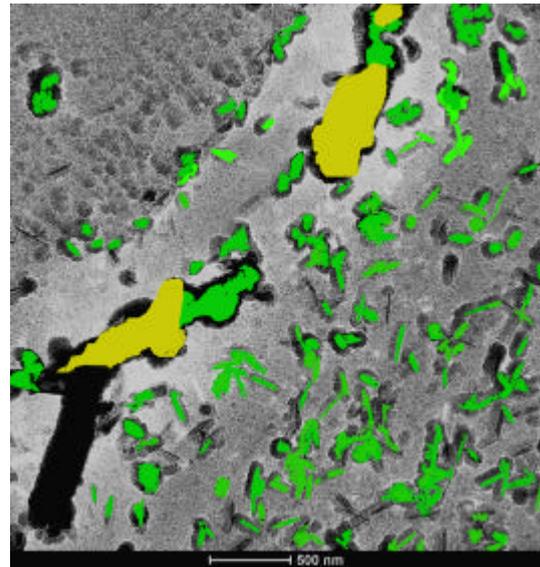


(b)

Figura 6 – (a) Campo 4, contorno de grão, da Figura 5 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes: pode-se notar pequena quantidade de M_7C_3 (amarelo), além de $M_{23}C_6$ (preto) e predominância de M_2C (verde).

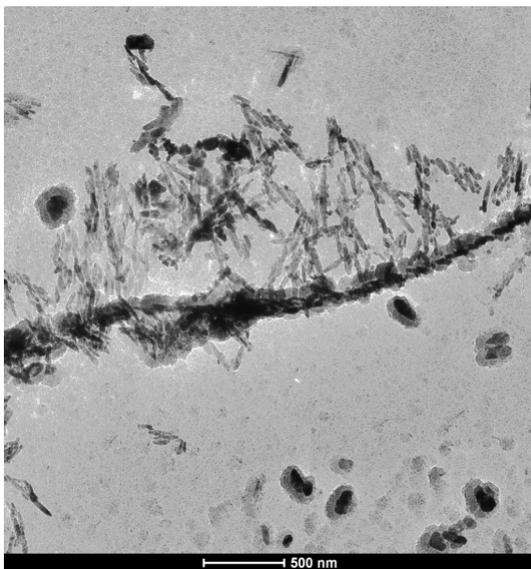


(a)

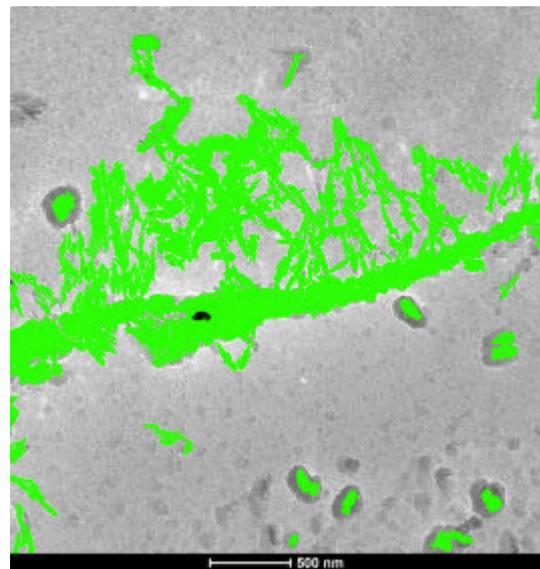


(b)

Figura 7 – (a) Campo 5, contorno de grão, da Figura 5 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há a presença de carbonetos grandes dos tipos M_7C_3 (amarelo) e $M_{23}C_6$ (preto) no contorno de grão, além de M_2C (verde) pequenos e distribuídos no interior do grão ferrítico.



(a)



(b)

Figura 8 – (a) Campo extra, contorno de grão, da Figura 5 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há apenas um $M_{23}C_6$ (preto) e predominância de M_2C (verde).

1.2 Ferrita-perlita 500 horas

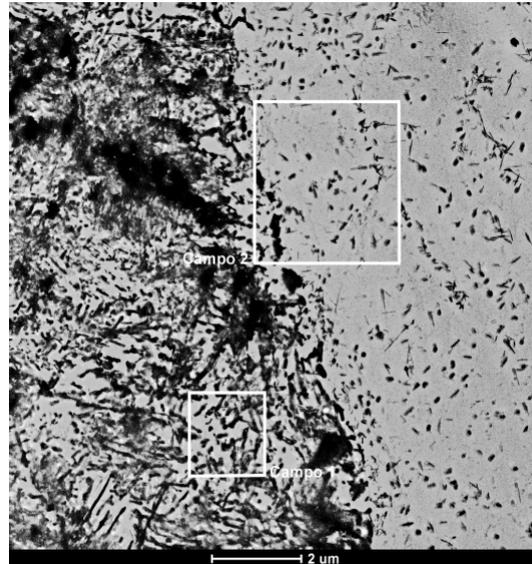
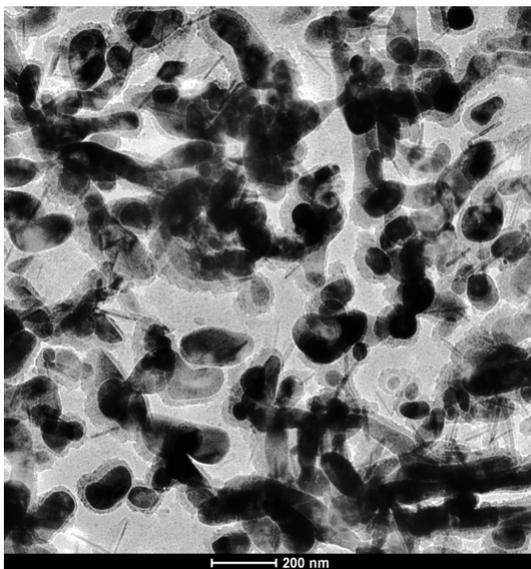
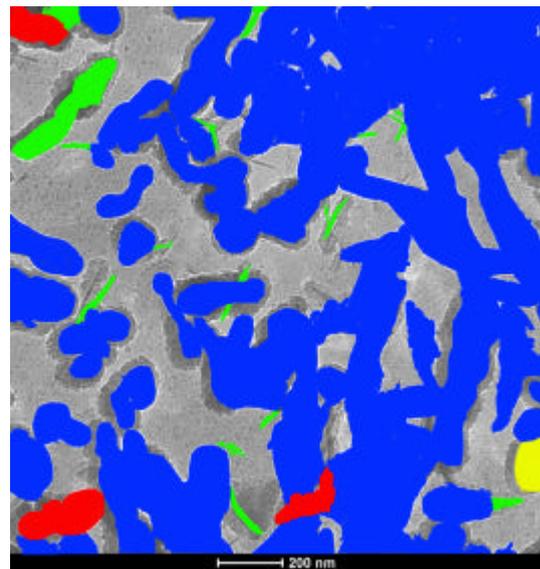


Figura 9 – Imagem da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 500 horas e com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1 e 2.



(a)



(b)

Figura 10 – Detalhe do campo 1, delimitado dentro do grão perlítico e mostrado na Figura 9 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Os carbonetos azuis são do tipo M_3C , que aparecem em grande quantidade, os verdes são do tipo M_2C , o amarelo é M_7C_3 , enquanto o vermelho é M_6C .

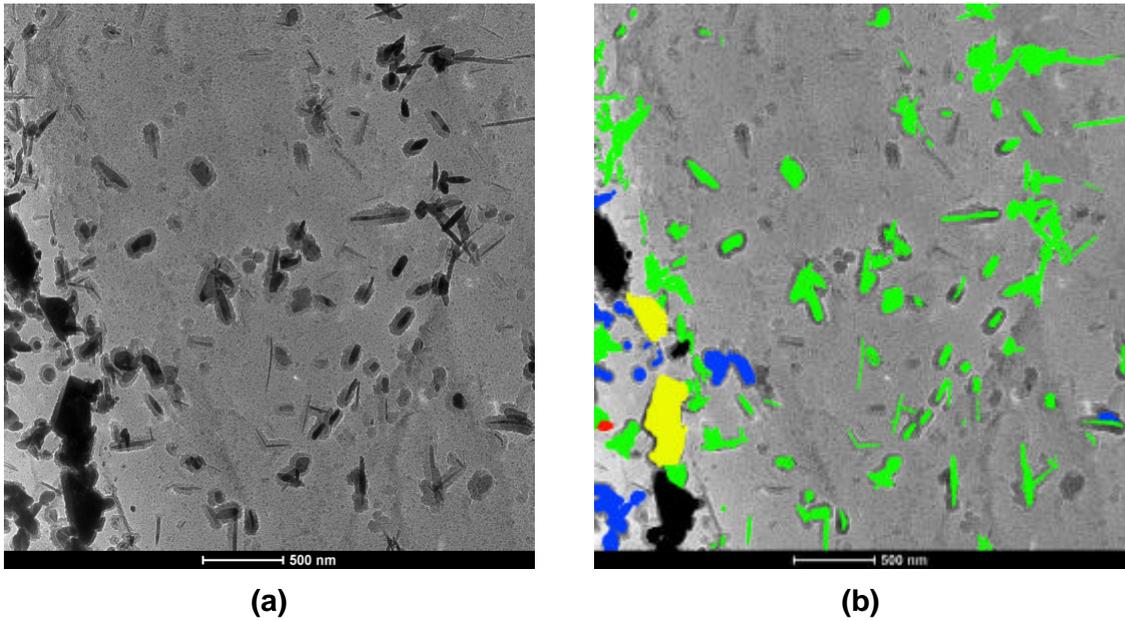


Figura 11 – (a) Campo 2, contorno e ferrita, da Figura 9 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se notar a presença de carbonetos do tipo M_7C_3 (amarelo) e $M_{23}C_6$ (preto), coalescidos no contorno de grão, junto a uma pequena quantidade de M_3C (azul). A maioria é do tipo M_2C (verde), localizada dentro do grão ferrítico.

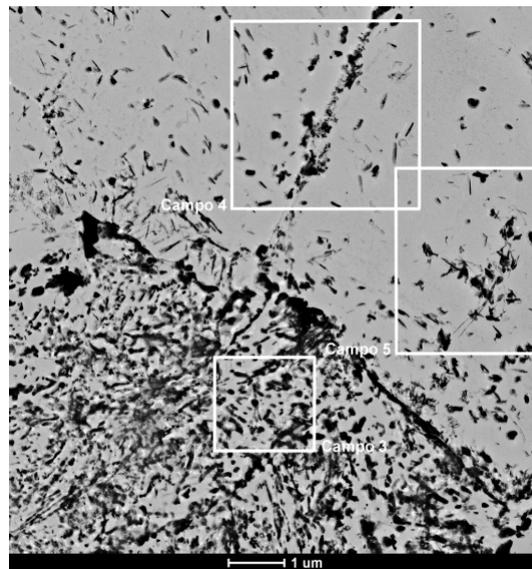
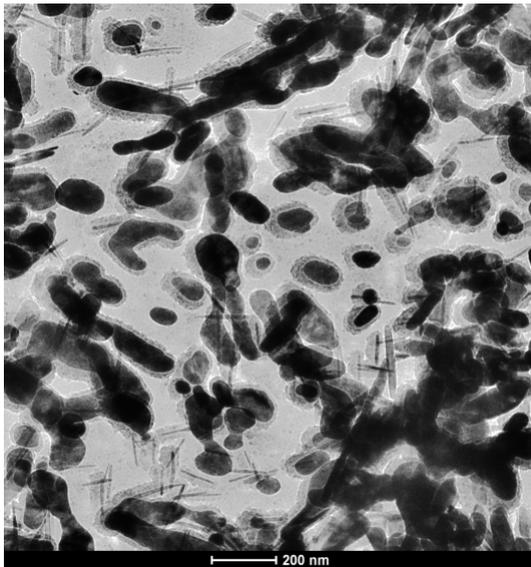
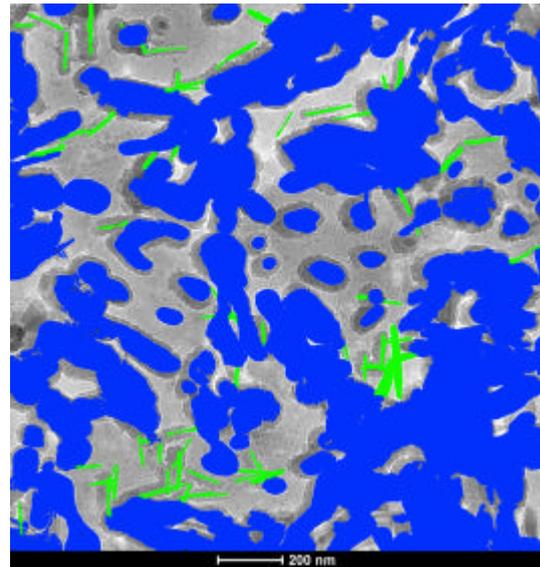


Figura 12 – Imagem da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 500 horas e com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 3, 4 e 5.

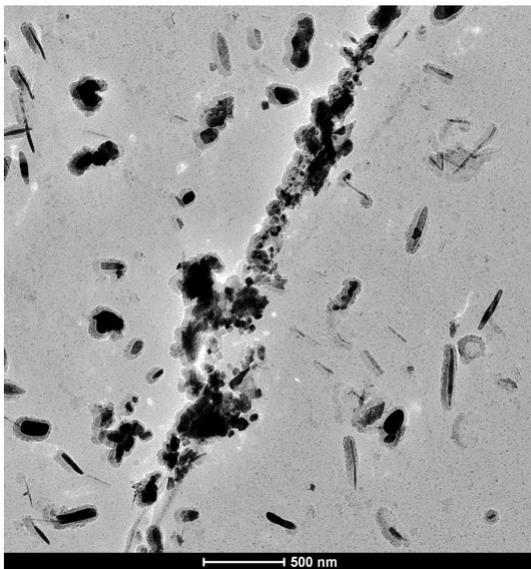


(a)

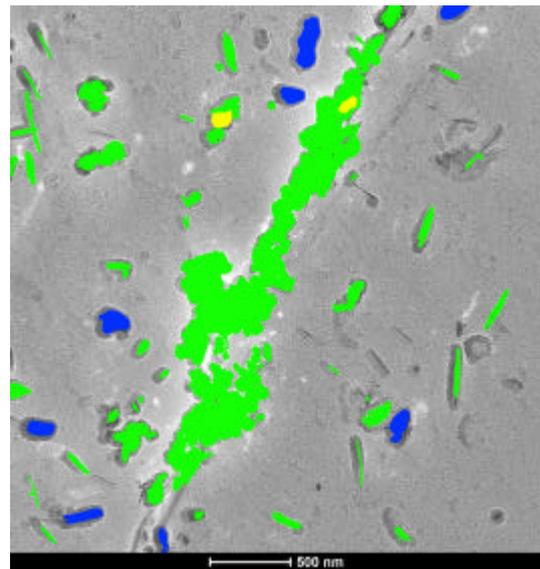


(b)

Figura 13 – (a) Campo 3, perlítico, da Figura 12 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados: há uma maioria de M_3C (azul) com alguns carbonetos do tipo M_2C (verde).



(a)



(b)

Figura 14 – (a) Campo 4, contorno de grão, da Figura 12 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Notam-se pequenas quantidades de M_3C (azul) e de M_7C_3 (amarelo), além de M_2C (verde), aglomerados no contorno de grão e dispersos na matriz.

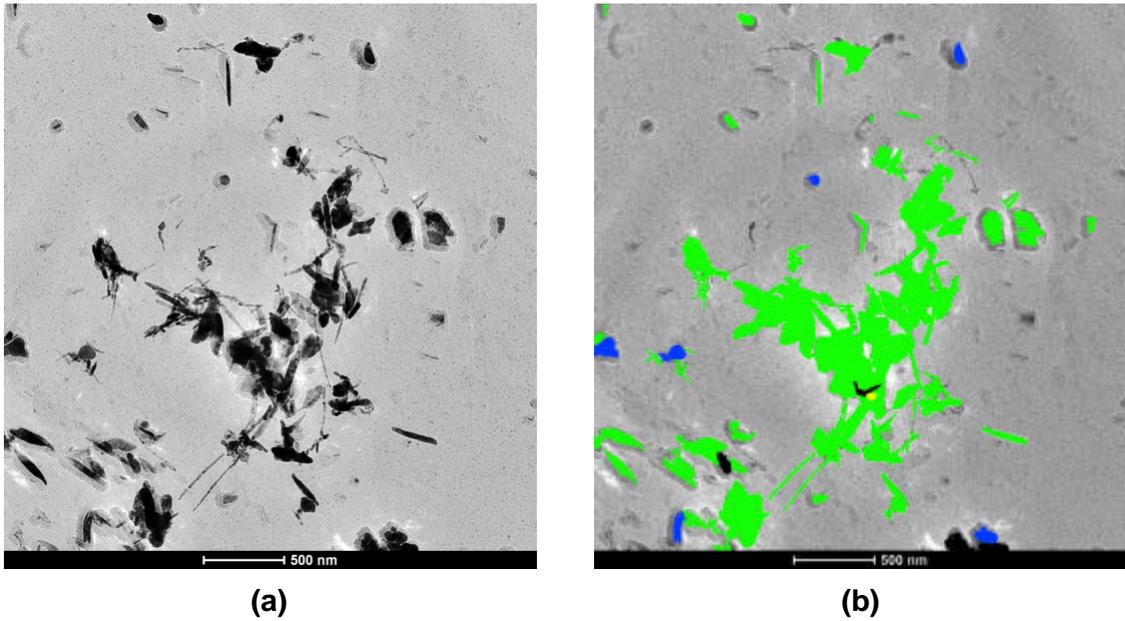


Figura 15 – (a) Campo 5, ferrita, da Figura 12 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há apenas um carboneto do tipo M_7C_3 (amarelo) e dois do tipo $M_{23}C_6$ (preto). Aparece pequena quantidade de M_3C (azul) e maioria de M_2C (verde).

1.3 Ferrita-perlita 1.000 horas

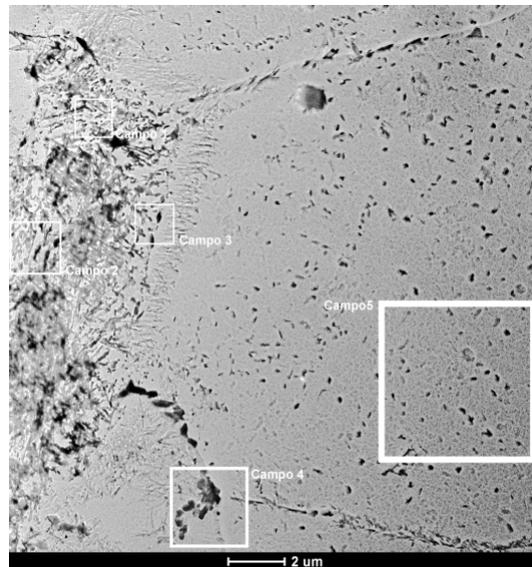


Figura 16 – Imagem da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 1.000 horas e com aumento de 2.550 X, mostrando os campos analisados.

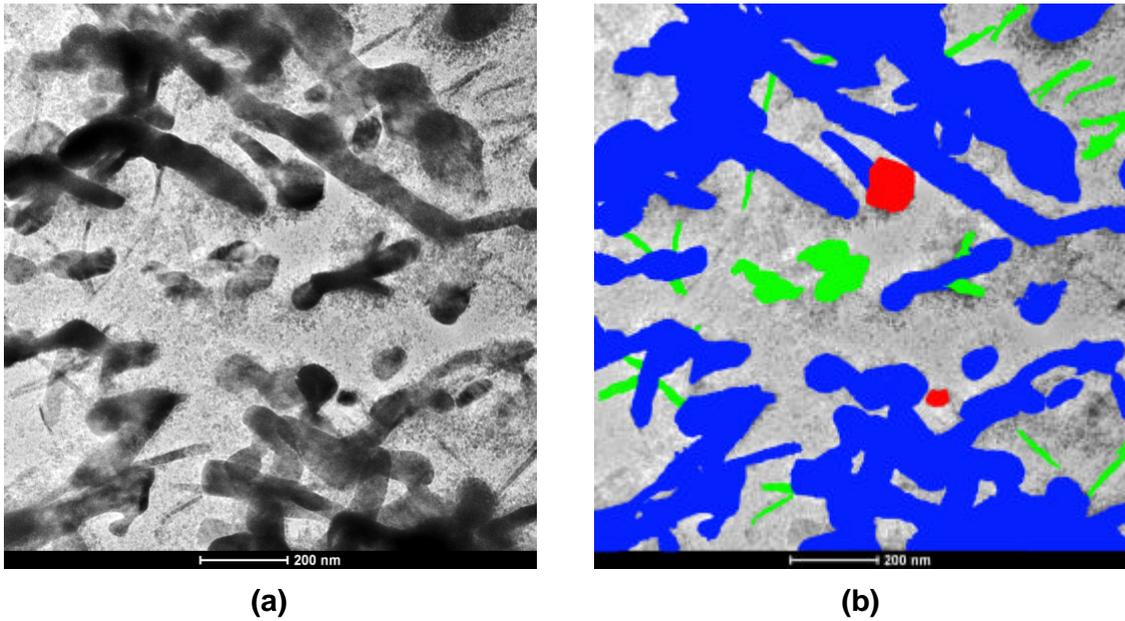


Figura 17 – Detalhe do campo 1 delimitado dentro do grão perlítico e mostrado na Figura 16 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 38.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há grande quantidade de M_3C (azul) e poucos carbonetos dos tipos M_2C (verde) e M_6C (vermelho).

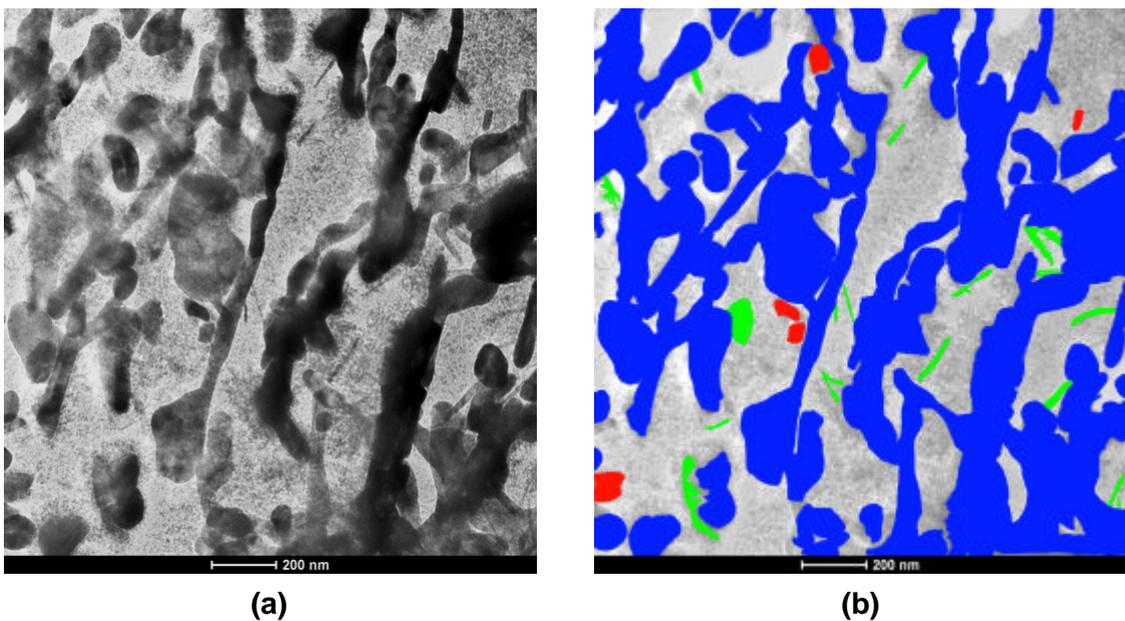


Figura 18 – Detalhe do campo 2, delimitado dentro do grão perlítico e mostrado na Figura 16 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se observar predominância do M_3C (azul) junto a pequenas quantidades de M_2C (verde) e de M_6C (vermelho).

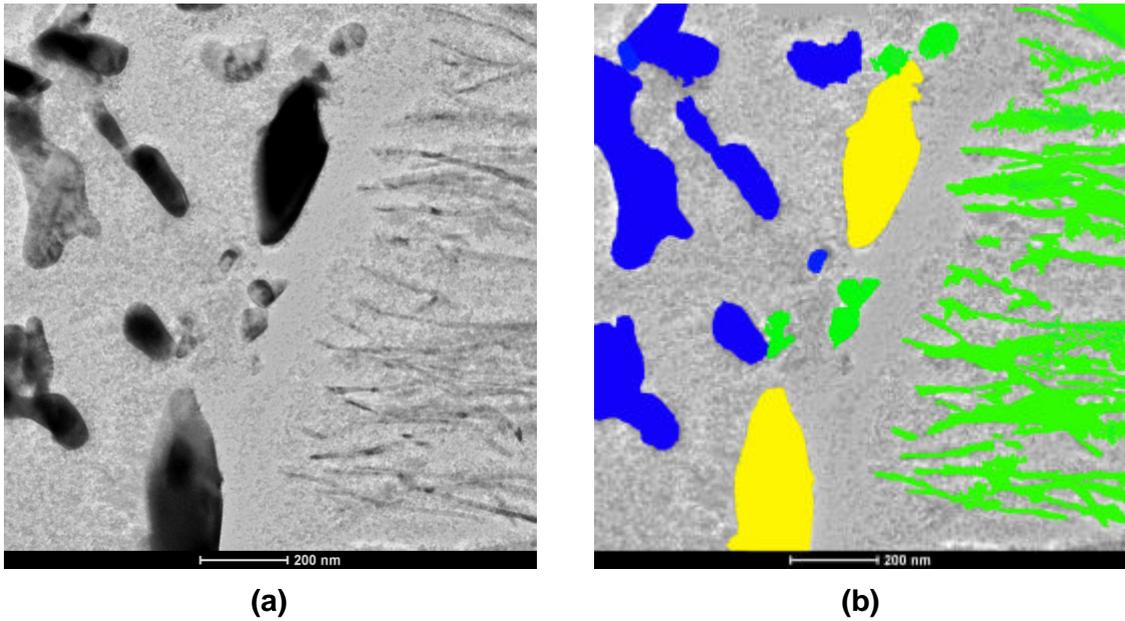


Figura 19 – Detalhe do campo 3, delimitado no contorno entre um grão perlítico e um ferrítico e mostrado na Figura 16 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 38.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há M_3C (azul) no grão perlítico e M_2C (verde) no grão ferrítico apontado na direção do contorno. Neste, há M_2C e M_7C_3 (amarelo), que aparece coalescido.

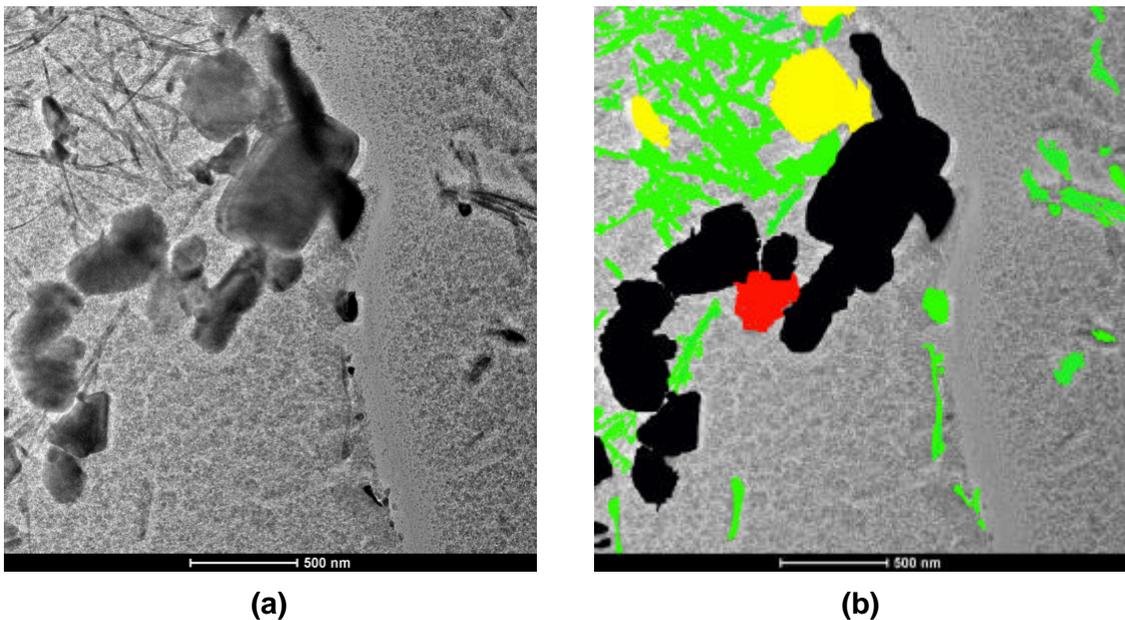


Figura 20 – Detalhe do campo 4, delimitado num ponto tríplice entre três grãos ferríticos e mostrado na Figura 16 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados. Há $M_{23}C_6$ (preto) e M_7C_3 (amarelo) coalescidos além de M_2C (verde) em forma acicular.

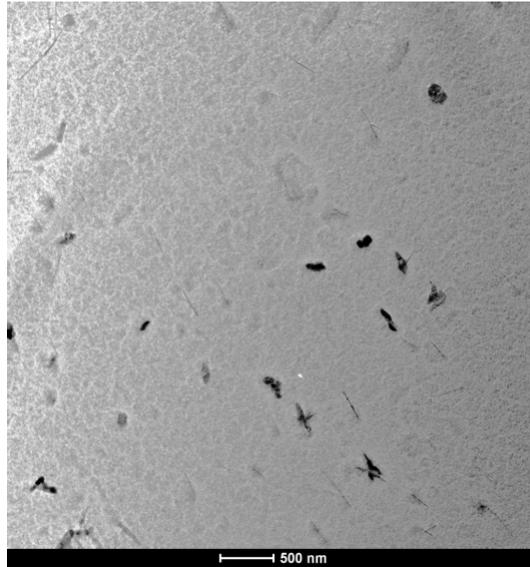


Figura 21 – Detalhe do campo 5, delimitado dentro do grão ferrítico e mostrado na Figura 16 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 9.900 X. Todos os carbonetos presentes são do tipo M_2C .

1.4 Ferrita-perlita 2.000 horas

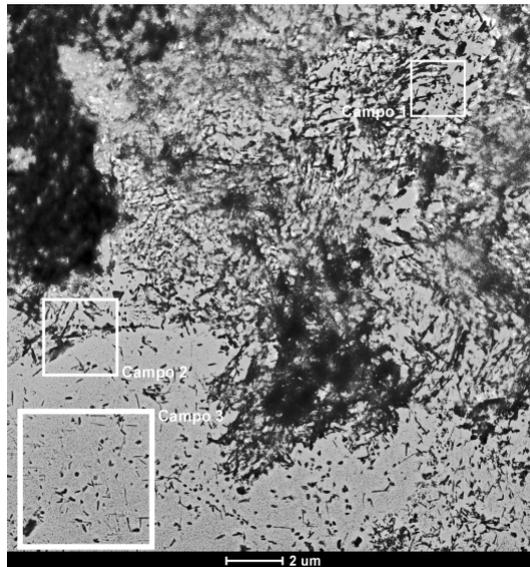
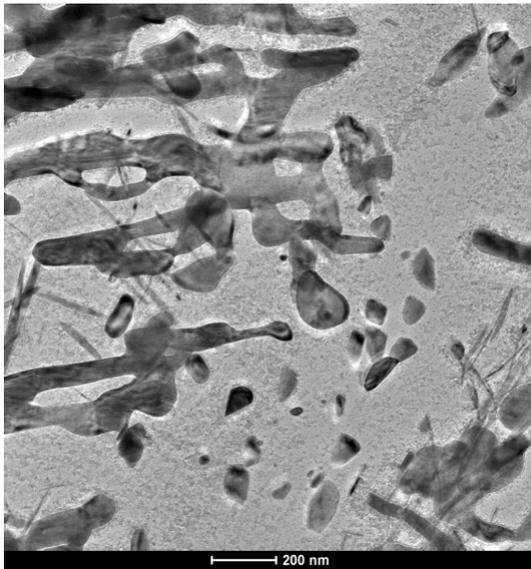
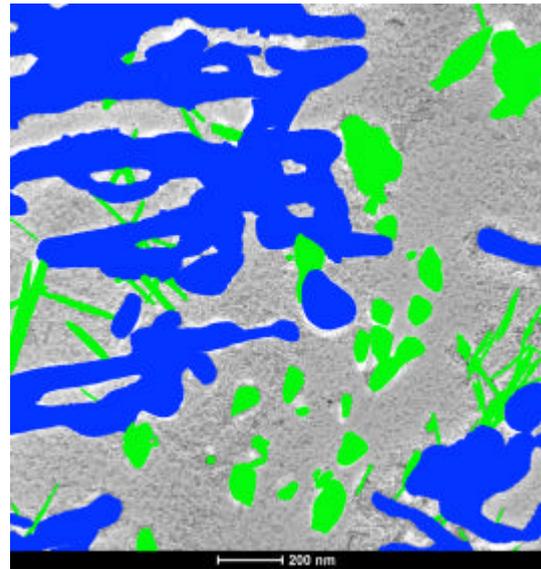


Figura 22 – Imagem da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 2.000 horas, com aumento de 2.550 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

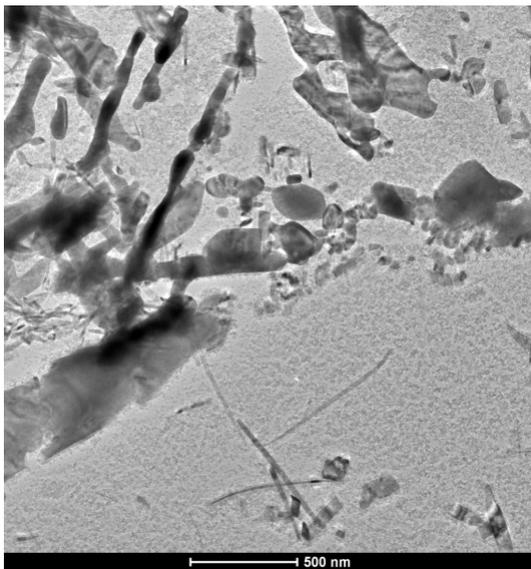


(a)

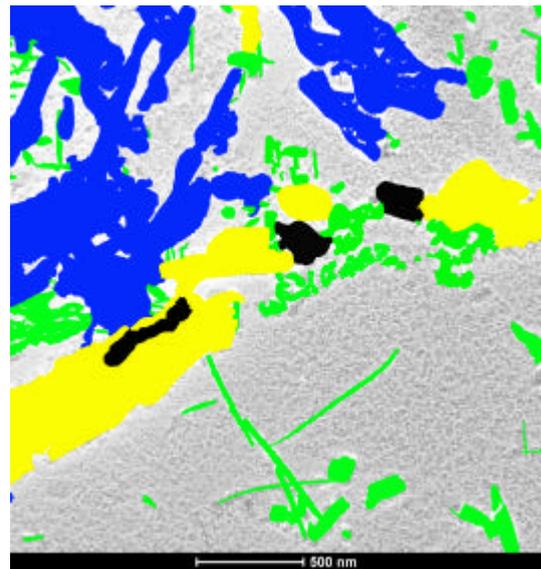


(b)

Figura 23 – (a) Campo 1, perlítico, da Figura 22 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Ainda há M_3C (azul) em forma de lamelas, além de M_2C (verde) disperso na matriz.



(a)



(b)

Figura 24 – (a) Campo 2, contorno de grão, da Figura 22 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados. No grão perlítico, predomina o M_3C (azul), com poucas quantidades de M_7C_3 (amarelo) e M_2C (verde); na ferrita, aparece apenas o M_2C , disperso na matriz. Já no contorno de grão, há M_7C_3 , bastante coalescido e associado ao M_2C , além de $M_{23}C_6$ (preto).

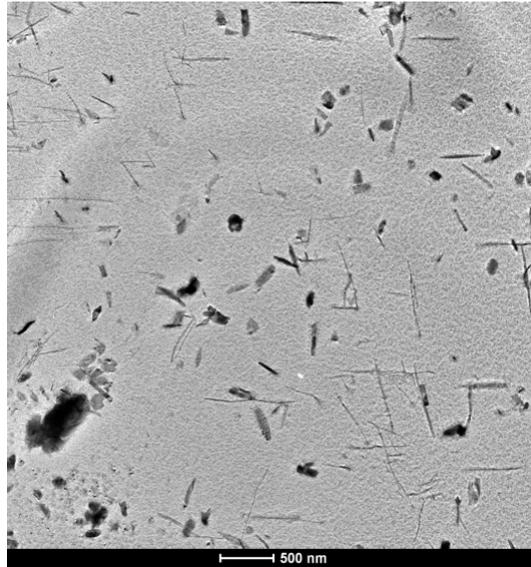


Figura 25 – Campo 3, ferrítico, da Figura 22 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 9.900 X. Todos os carbonetos presentes são do tipo M₂C.

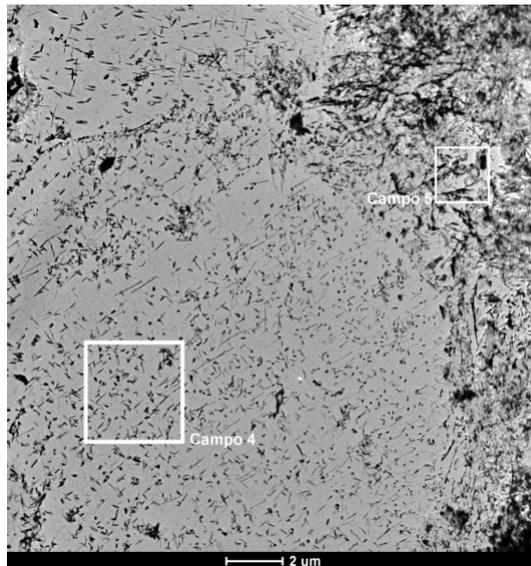


Figura 26 – Imagem da amostra composta por ferrita e perlita envelhecida a 550°C por 2.000 horas, com aumento de 2.550 X, mostrando os campos 4 e 5.

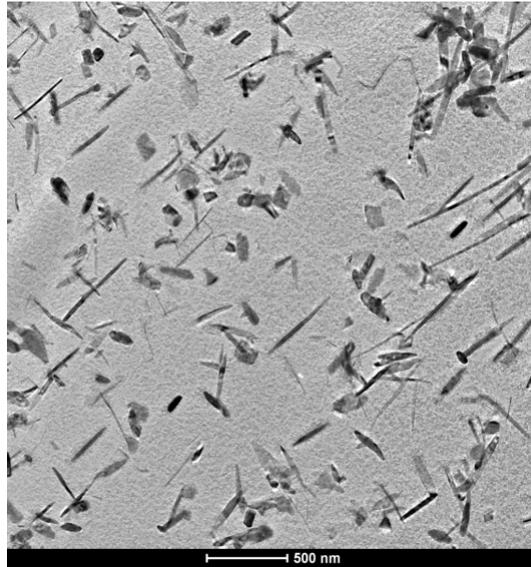
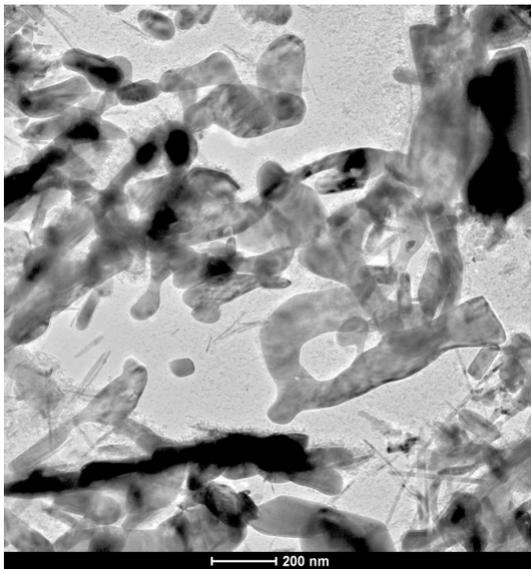


Figura 27 – Campo 4, ferrítico, da Figura 26 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X. Todos os carbonetos nesta região são do tipo M_2C .



(a)



(b)

Figura 28 – (a) Campo 5, perlítico, da Figura 26 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Além do M_3C (azul) e do M_2C (verde), aparecem o M_7C_3 (amarelo) e o M_6C (vermelho), em meio à estrutura da perlita e coalescidos.

2.1 Bainita 100 horas

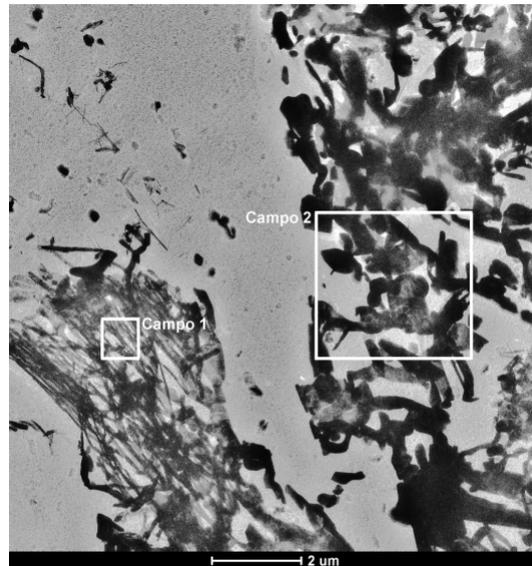


Figura 29 – Imagem da amostra composta por bainita envelhecida a 550°C por 100 horas e com aumento de 4.000 X, apresentando os campos 1 e 2.

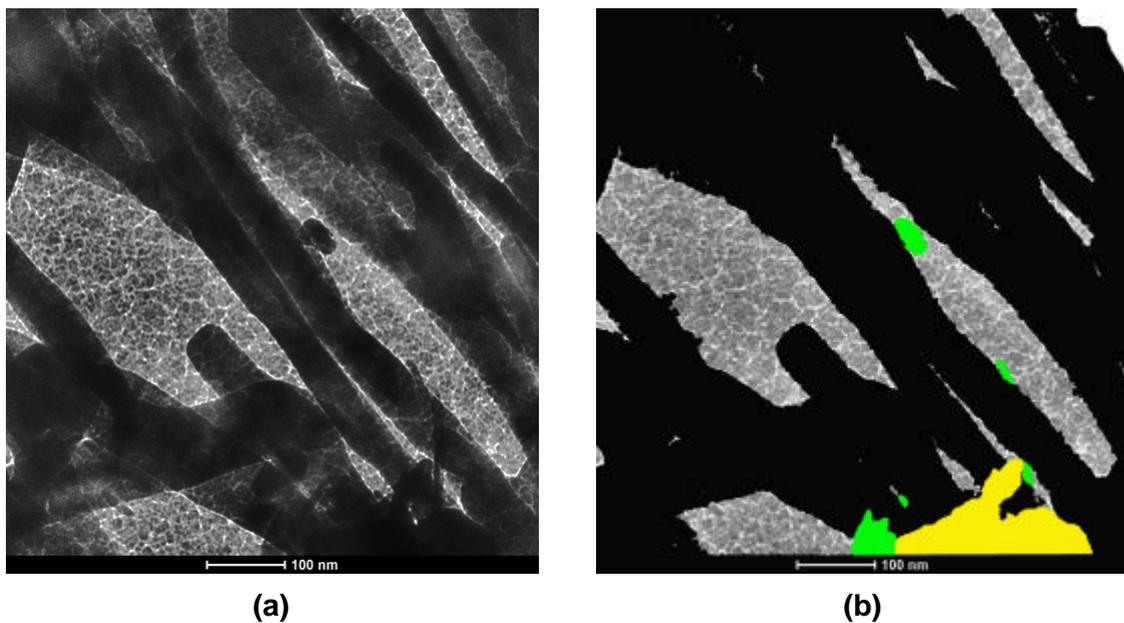


Figura 30 – (a) Campo 1, bainítico, da Figura 29 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 71.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Nota-se que a maioria é do tipo $M_{23}C_6$ (preto), mas aparecem pequenas quantidades de M_7C_3 (amarelo) e de M_2C (verde).

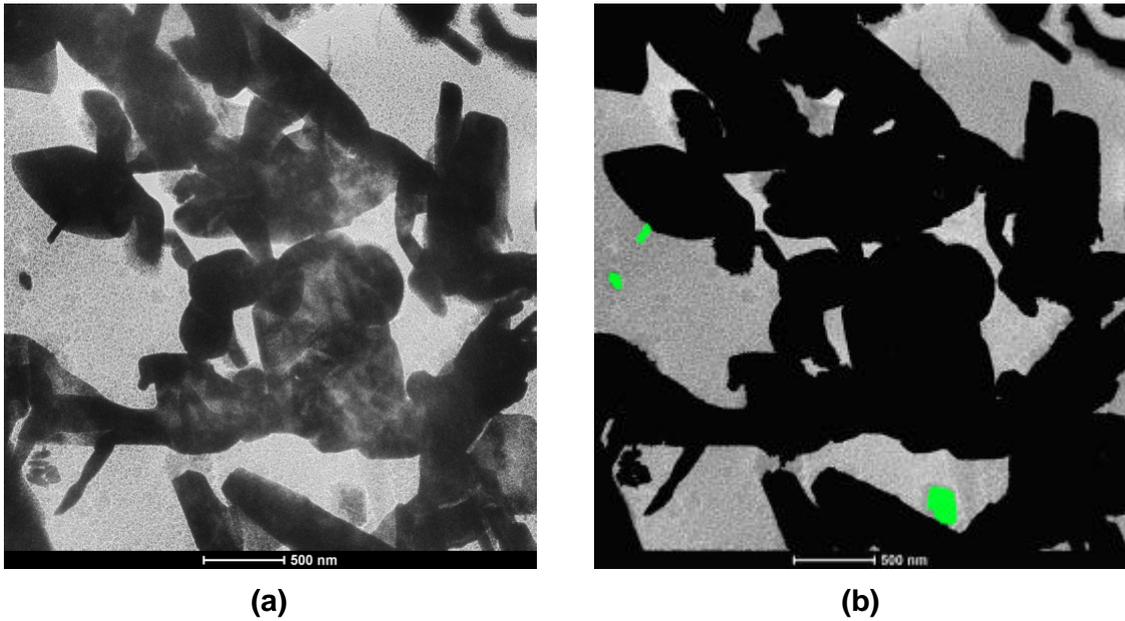


Figura 31 – (a) Campo 2, bainítico, da Figura 29 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há pequenas quantidades de M_2C (verde) e maioria de $M_{23}C_6$ (preto).

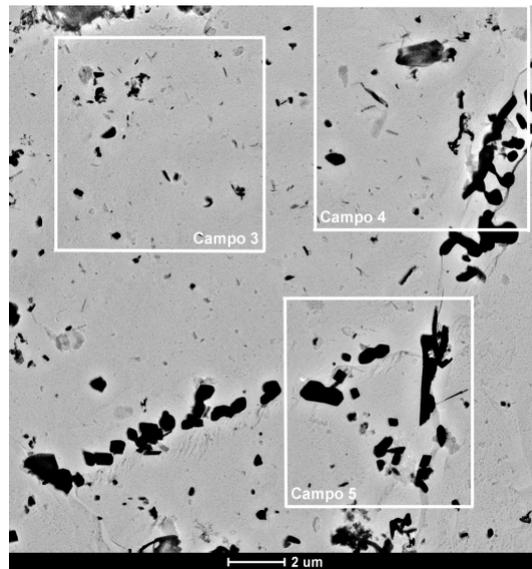


Figura 32 – Imagem da amostra de microestrutura bainítica envelhecida a 550°C por 100 horas e com aumento de 4.000 X, apresentando os campos 3, 4 e 5.

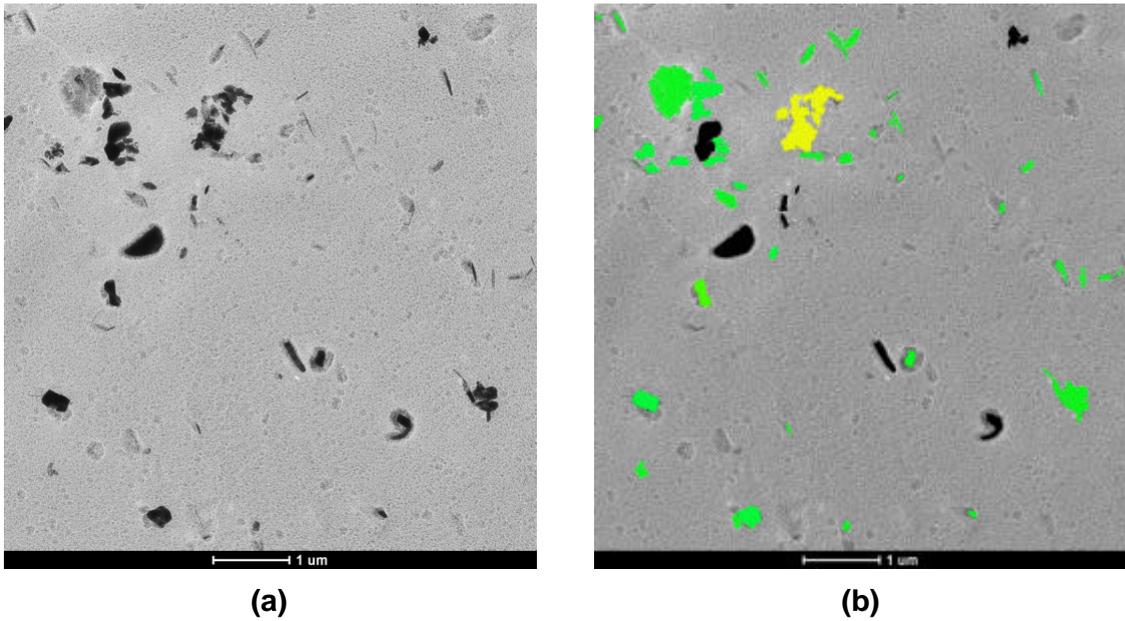


Figura 33 – (a) Campo 3, ferrítico, da Figura 32 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Estão presentes o M_2C (verde), tanto coalescido quanto disperso na matriz, o $M_{23}C_6$ (preto) e um aglomerado de precipitados do tipo M_7C_3 (amarelo).

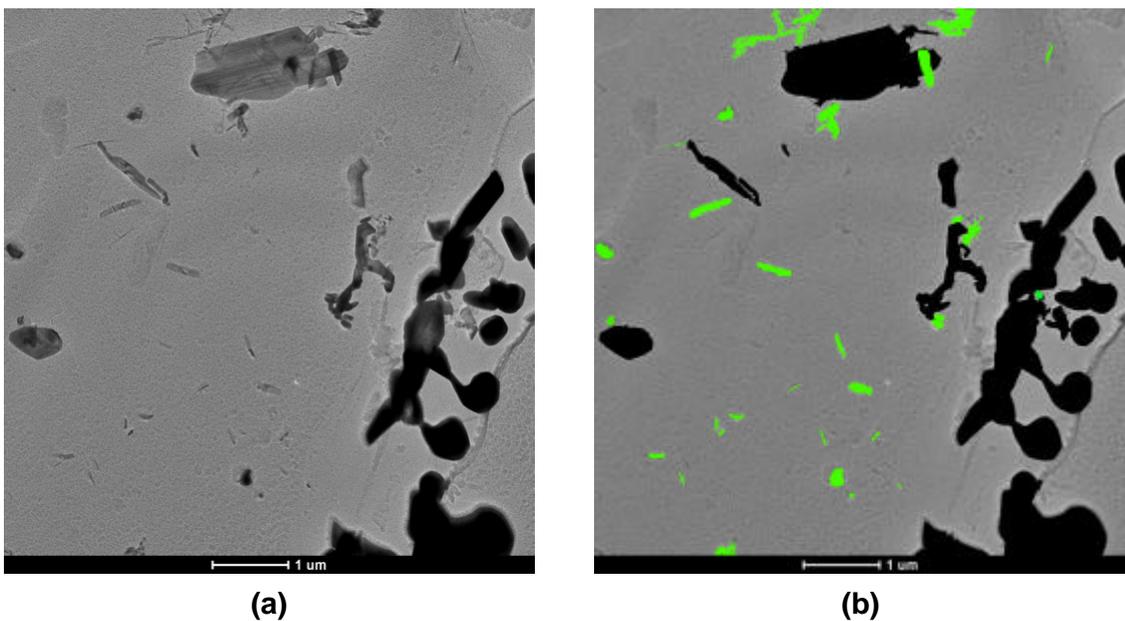


Figura 34 – (a) Campo 4, contorno e ferrita, da Figura 32– aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 7.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Estão presentes o M_2C (verde), disperso na matriz, e o $M_{23}C_6$ (preto), coalescido.

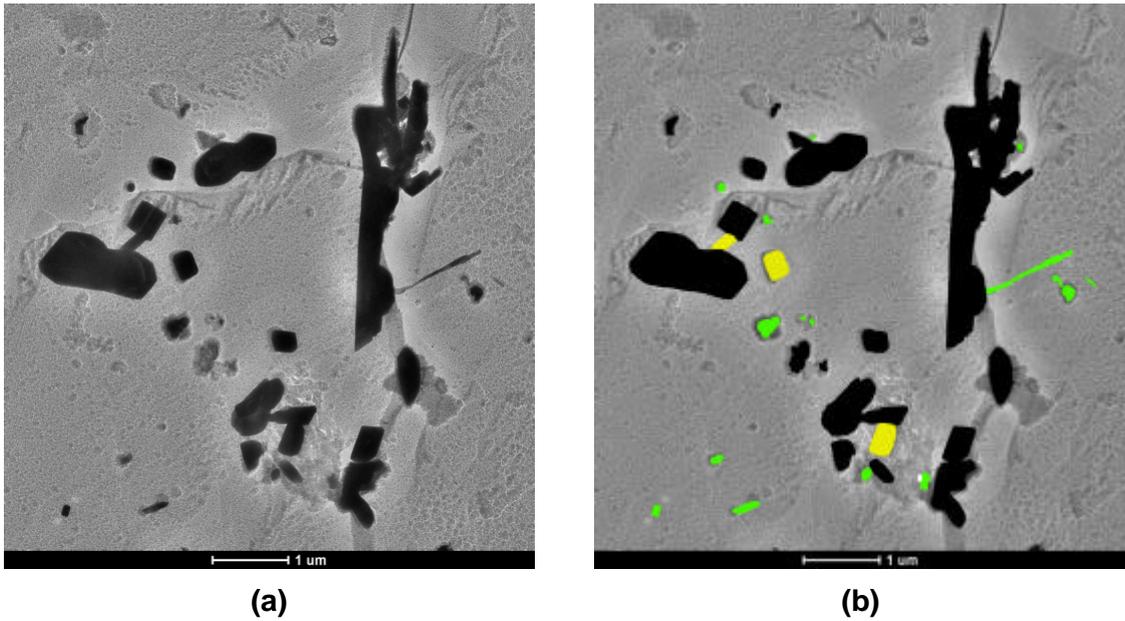


Figura 35 – (a) Campo 5, ponto tríplice, da Figura 32 – aço envelhecido por 100 horas a 550°C –, com aumento de 7.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Nota-se a presença de pequenas quantidades de M_2C (verde) e de M_7C_3 (amarelo). A maioria dos precipitados é do tipo $M_{23}C_6$ (preto), coalescido.

2.2 Bainita 500 horas

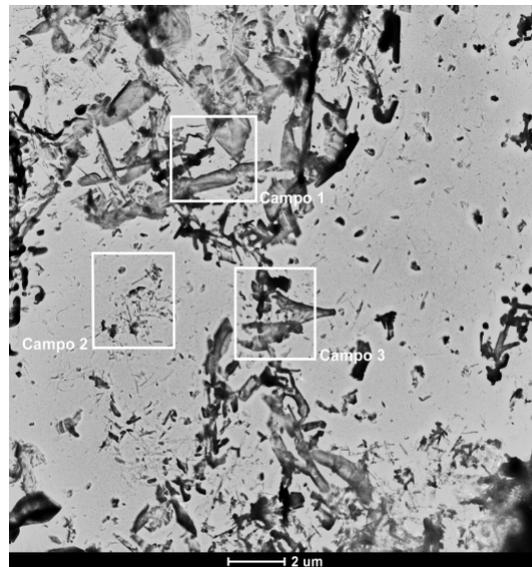
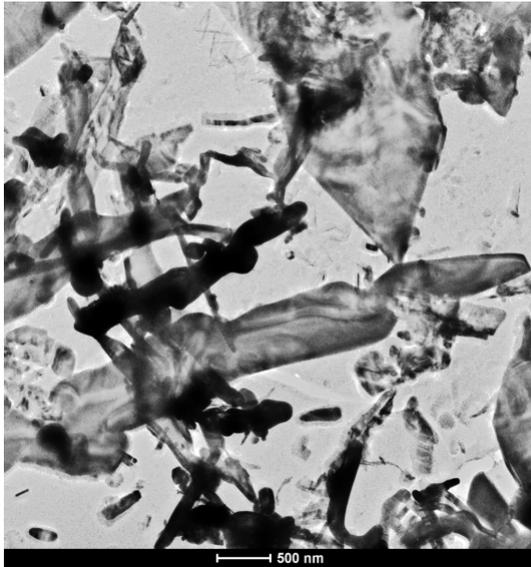
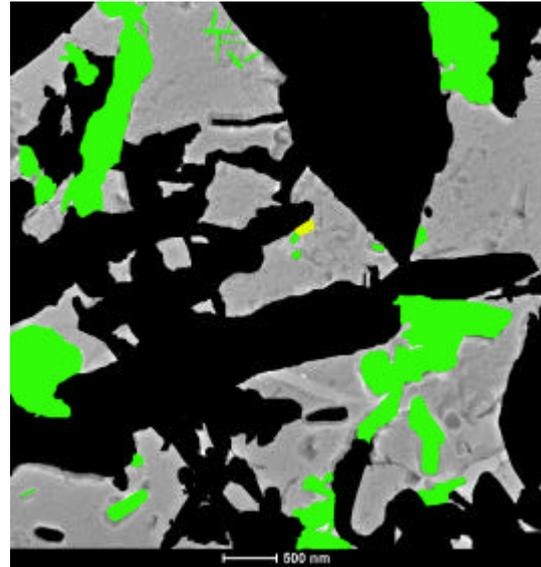


Figura 36 – Imagem da amostra composta por bainita envelhecida a 550°C por 500 horas e com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

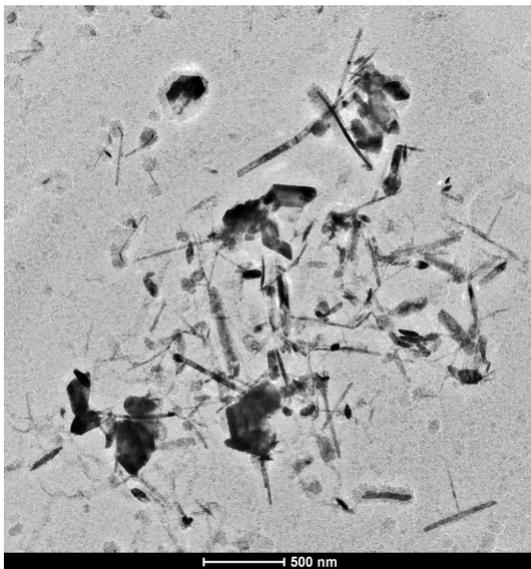


(a)

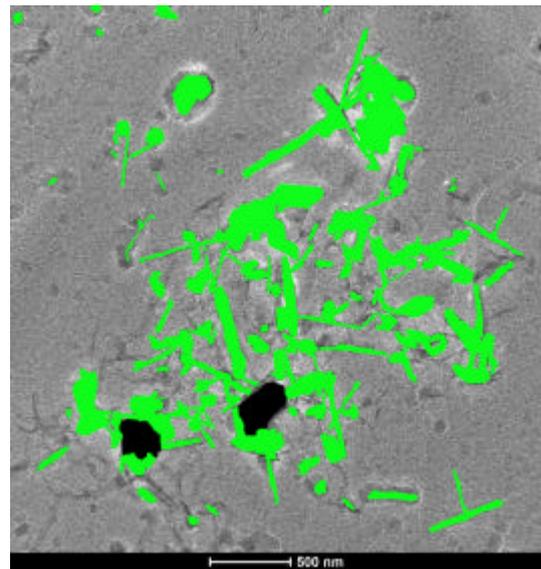


(b)

Figura 37 – (a) Campo 1, bainítico, da Figura 36 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos precipitados. Nota-se que a maioria é do tipo $M_{23}C_6$ (preto), mas aparecem pequenas quantidades de M_2C (verde) e apenas um M_7C_3 (amarelo).



(a)



(b)

Figura 38 – (a) Campo 2, ferrítico, da Figura 36 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há maioria de M_2C (verde) e pequenas quantidades de $M_{23}C_6$ (preto).

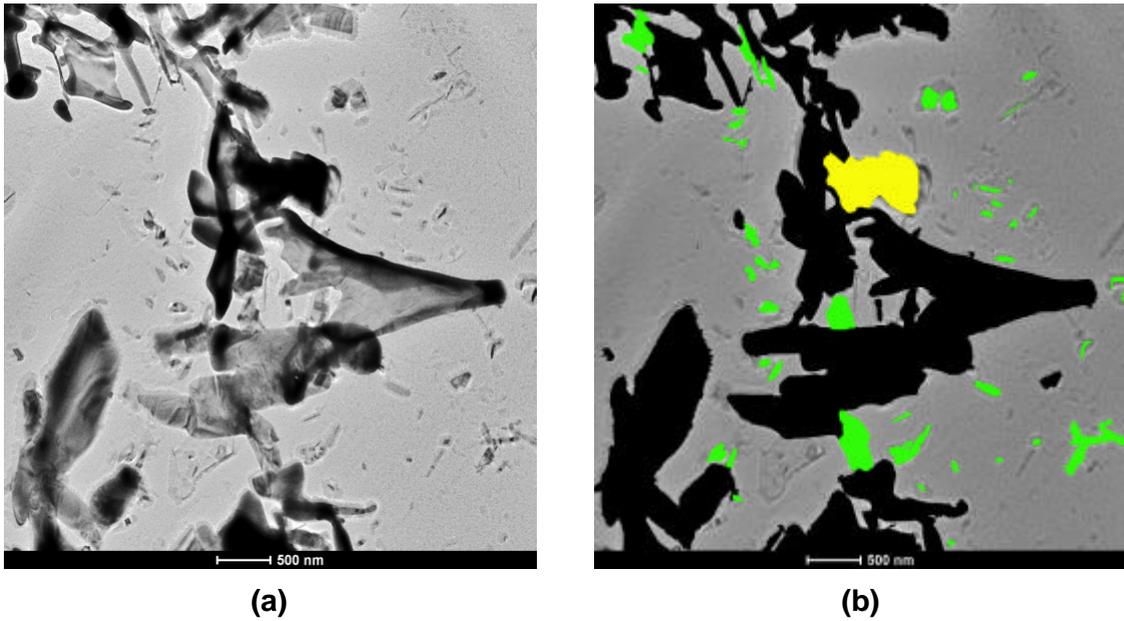


Figura 39 – (a) Campo 3, contorno de grão, da Figura 36 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos. Estão presentes o M_2C (verde) em pouca quantidade, apenas um precipitado do tipo M_7C_3 (amarelo) e maioria de $M_{23}C_6$ (preto).

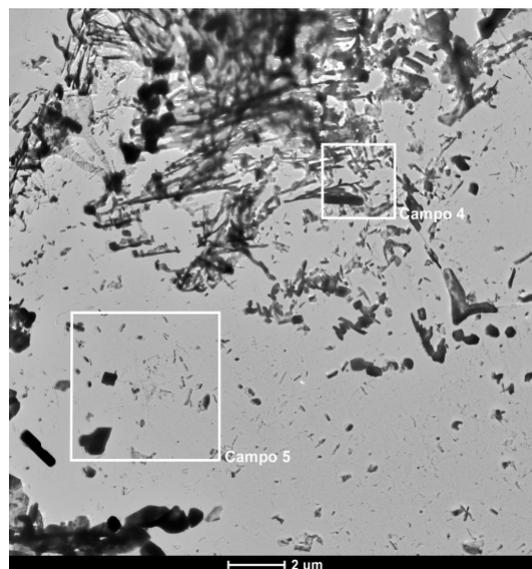
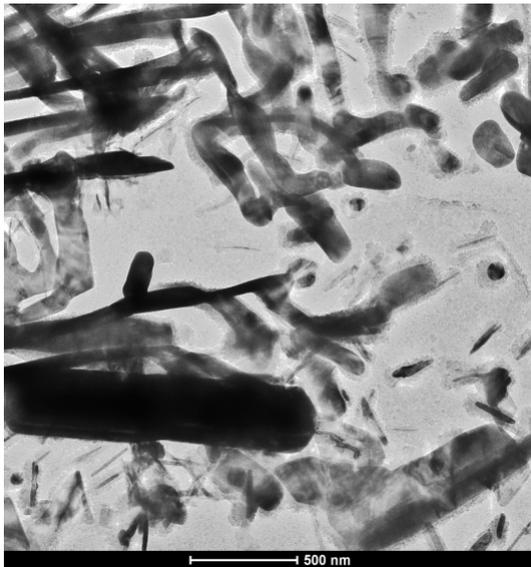
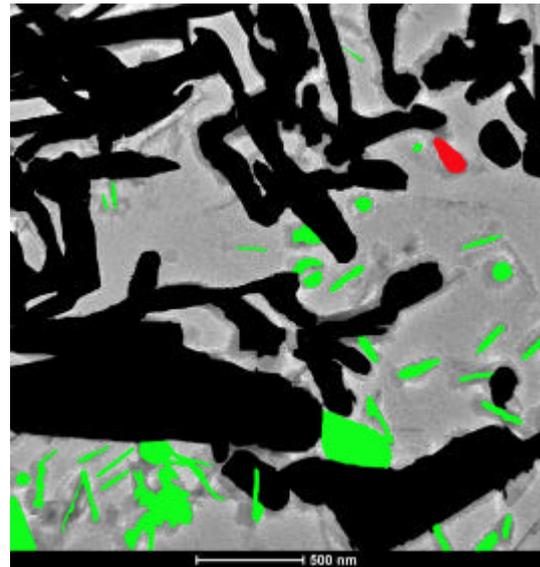


Figura 40 – Imagem da amostra bainítica envelhecida a 550°C por 500 horas e com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 4 e 5.

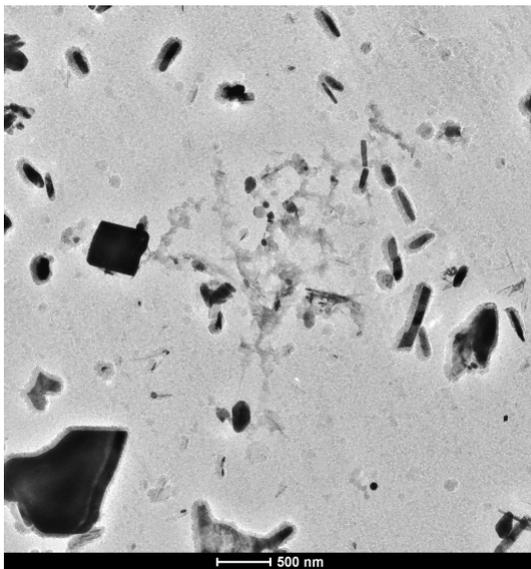


(a)

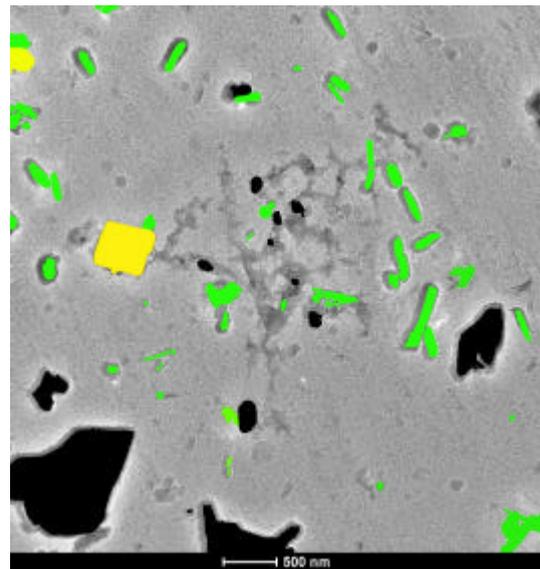


(b)

Figura 41 – (a) Campo 4, bainita, da Figura 40 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há maioria de precipitados do tipo $M_{23}C_6$ (preto). Além deles, estão presentes pequenas quantidades de M_2C (verde) e apenas um M_6C (vermelho).



(a)



(b)

Figura 42 – (a) Campo 5, ferrita, da Figura 40 – aço envelhecido por 500 horas a 550°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos. Nota-se a presença de pequenas quantidades de M_2C (verde) e de M_7C_3 (amarelo). Também aparecem precipitados do tipo $M_{23}C_6$ (preto), coalescidos e dispersos na matriz.

2.3 Bainita 1.000 horas

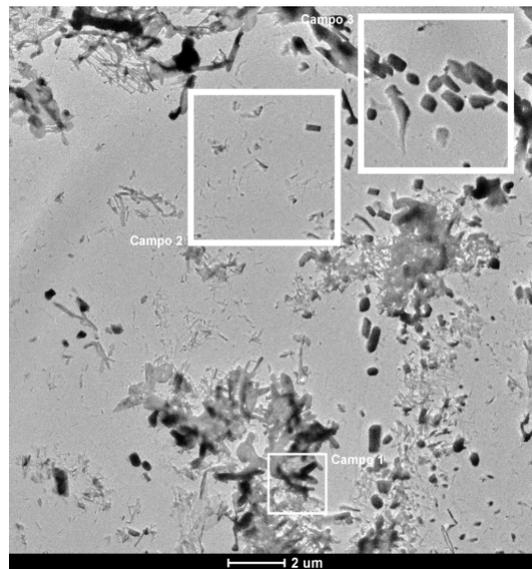
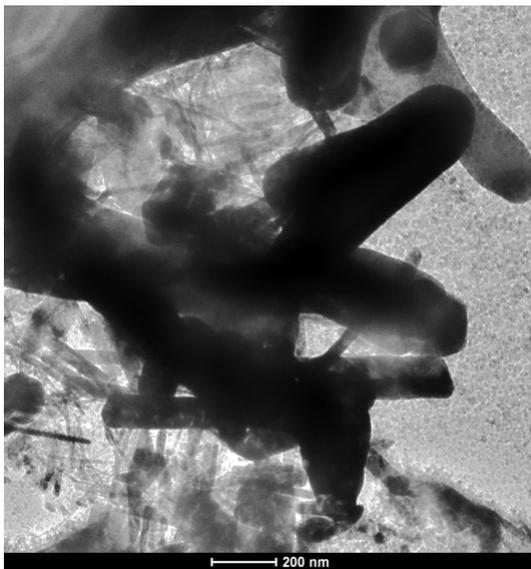
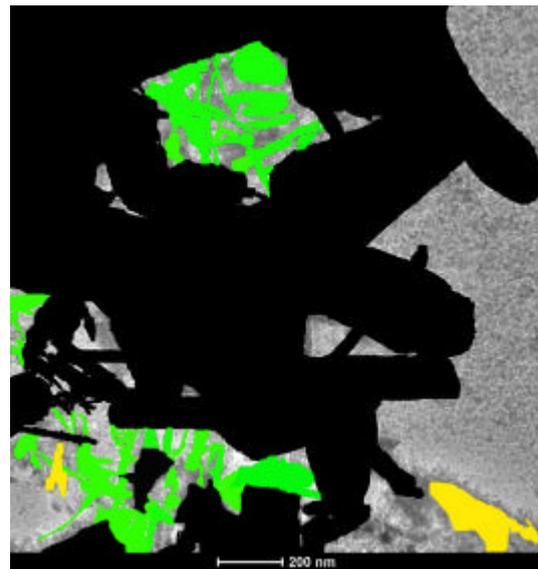


Figura 43 – Imagem da amostra composta por bainita envelhecida a 550°C por 1.000 horas e com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

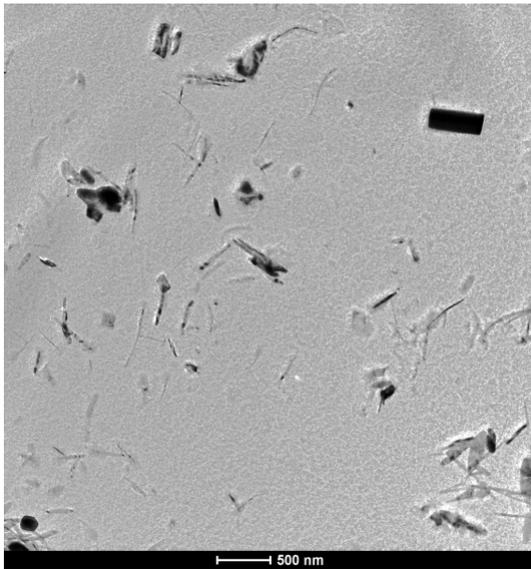


(a)

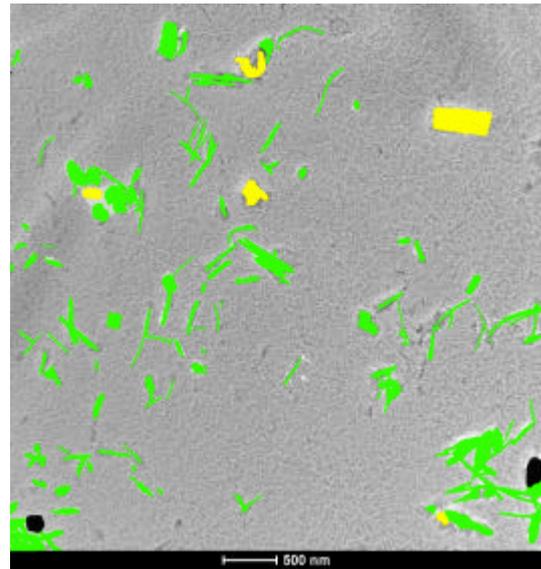


(b)

Figura 44 – (a) Campo 1, bainita, da Figura 43 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados.

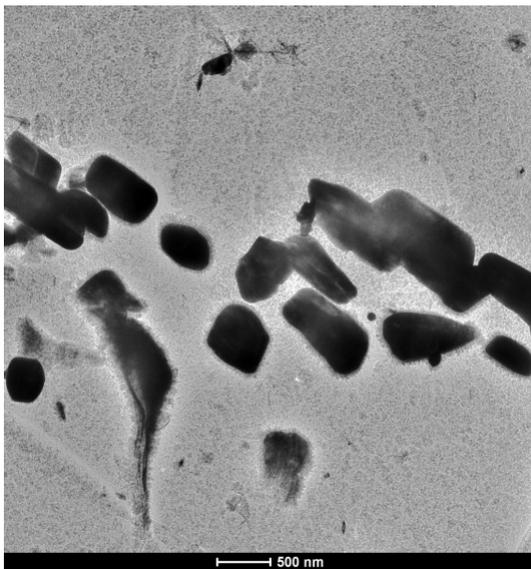


(a)

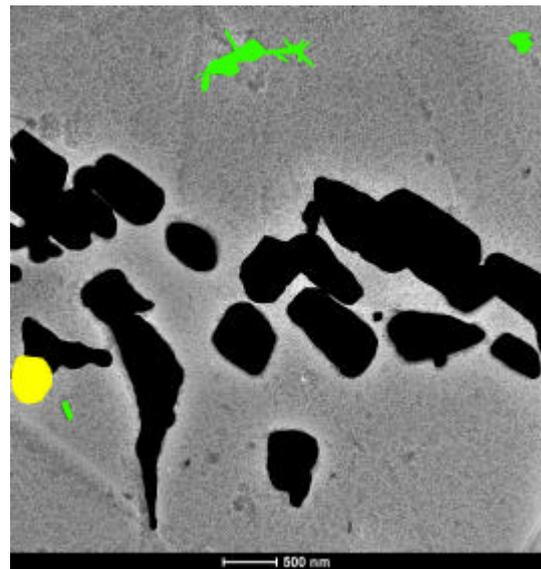


(b)

Figura 45 – (a) Campo 2, ferrita, da Figura 43 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos precipitados. Há maioria de M_2C (verde) e pequenas quantidades de M_7C_3 (amarelo) e de $M_{23}C_6$ (preto).



(a)



(b)

Figura 46 – (a) Campo 3, contorno de grão, da Figura 43 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos precipitados. Quase todos os carbonetos são do tipo $M_{23}C_6$ (preto) e pequenas quantidades de M_2C (verde) e de M_7C_3 (amarelo).

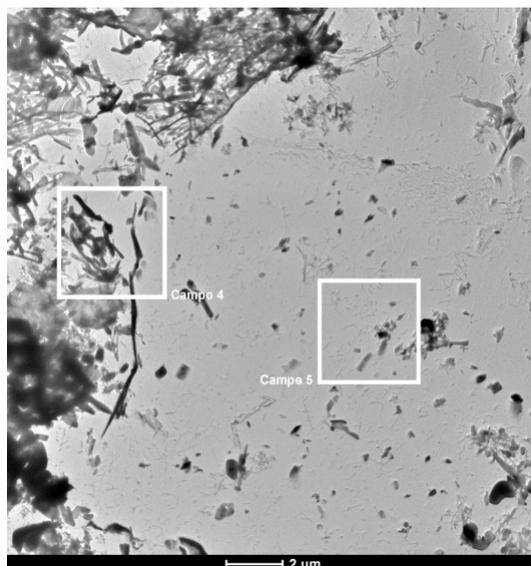


Figura 47 – Imagem da amostra composta por bainita envelhecida a 550°C por 1.000 horas e com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 4 e 5.

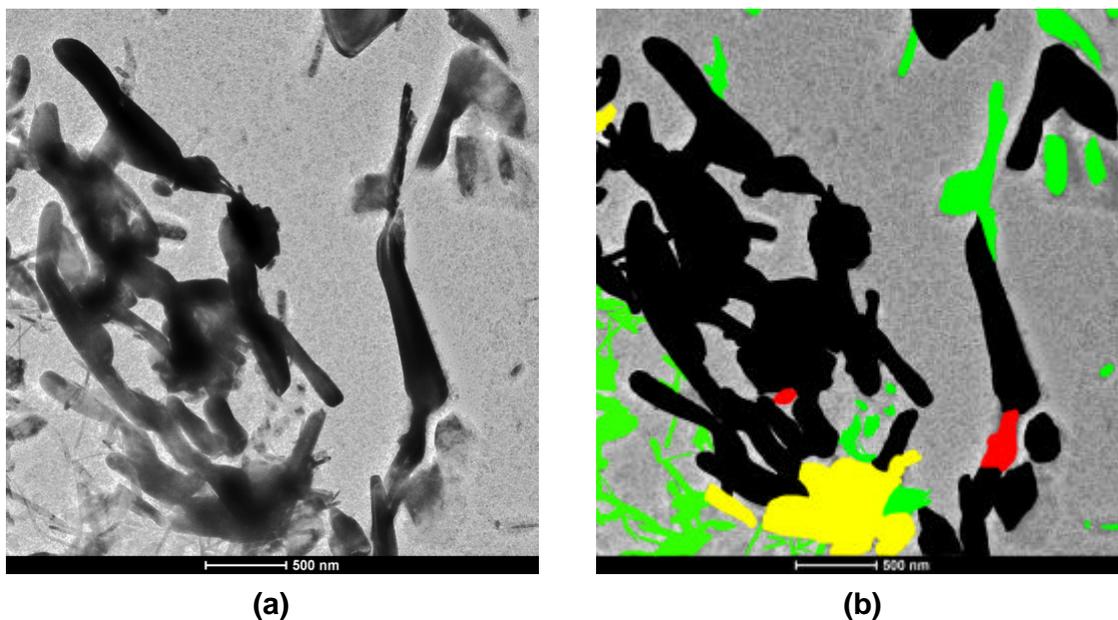


Figura 48 – (a) Campo 4, bainita, da Figura 47 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Maior parte de $M_{23}C_6$ (preto) com pequenas quantidades de M_2C (verde), de M_7C_3 (amarelo) e de M_6C (vermelho).

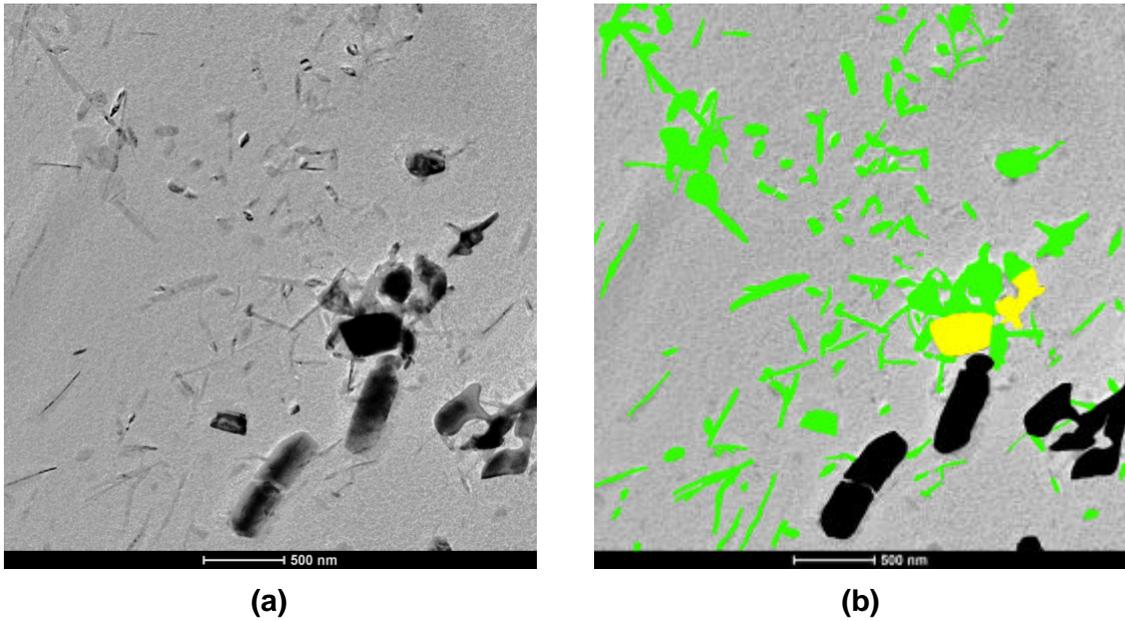


Figura 49 – (a) Campo 5, ferrítico, da Figura 47 – aço envelhecido por 1.000 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há bastante M_2C (verde) com pequenas quantidades de M_7C_3 (amarelo) e de $M_{23}C_3$ (preto).

2.4 Bainita 2.000 horas

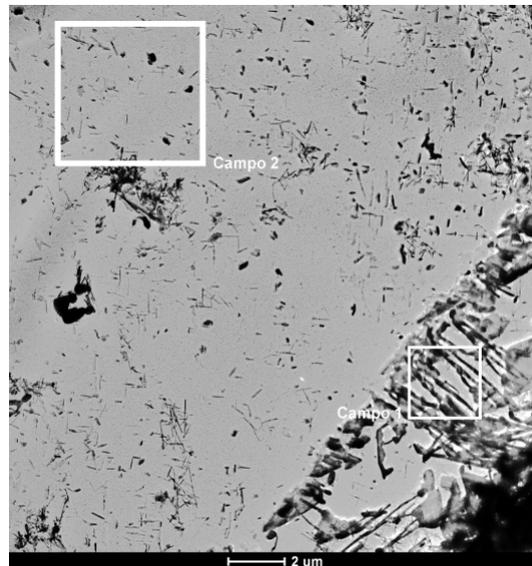
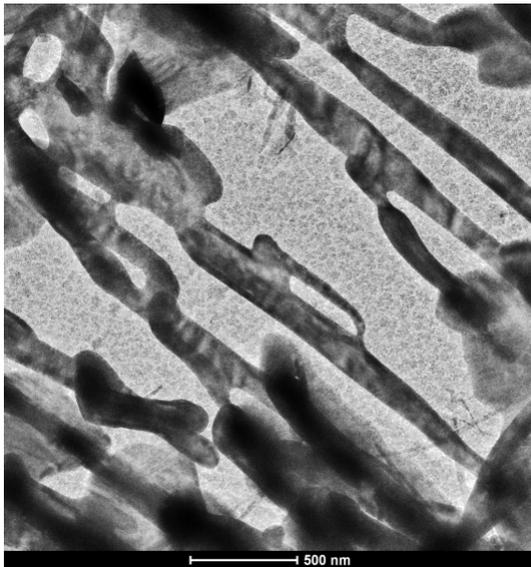
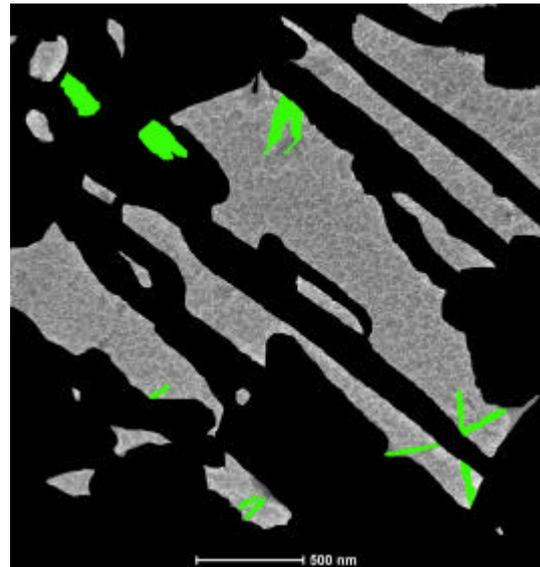


Figura 50 – Imagem da amostra de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecida a 550°C por 2.000 horas, com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 1 e 2.

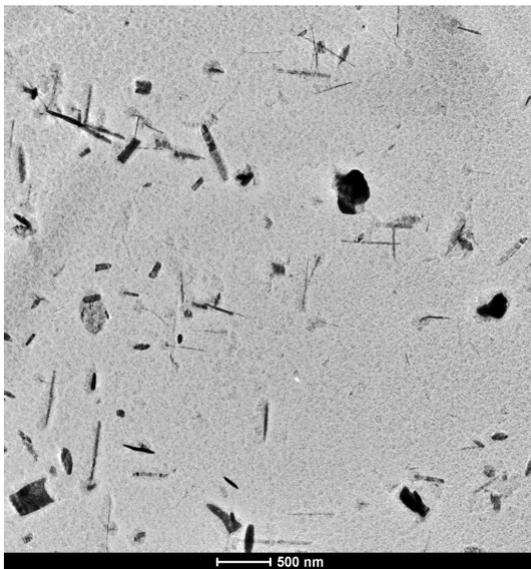


(a)

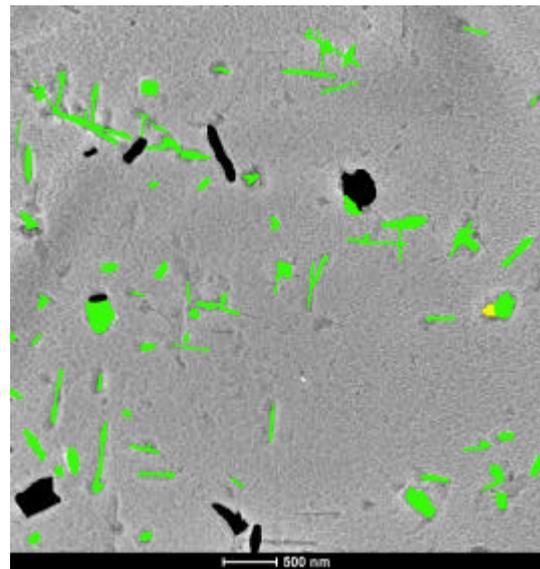


(b)

Figura 51 – (a) Campo 1, bainítico, da Figura 50 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 38.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Nota-se a presença de pequenas quantidades de M_2C (verde) e enorme maioria de precipitados do tipo $M_{23}C_6$ (preto), em forma de lamelas.



(a)



(b)

Figura 52 – (a) Campo 2, ferrítico, da Figura 50 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos. A maior parte dos precipitados presentes é do tipo M_2C (verde). Além dele, aparecem pequenas quantidades de M_7C_3 (amarelo) e de $M_{23}C_6$ (preto).

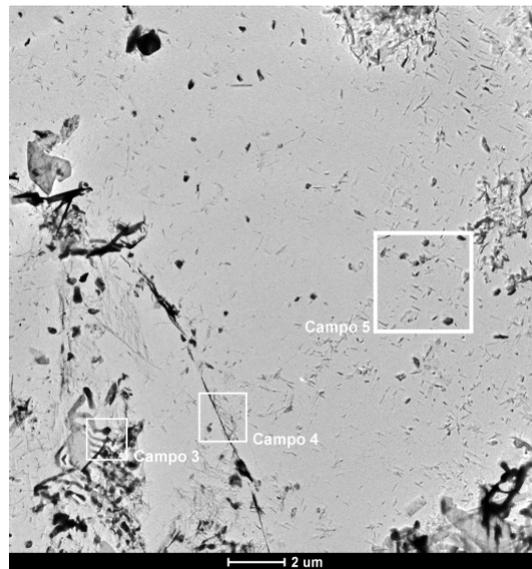
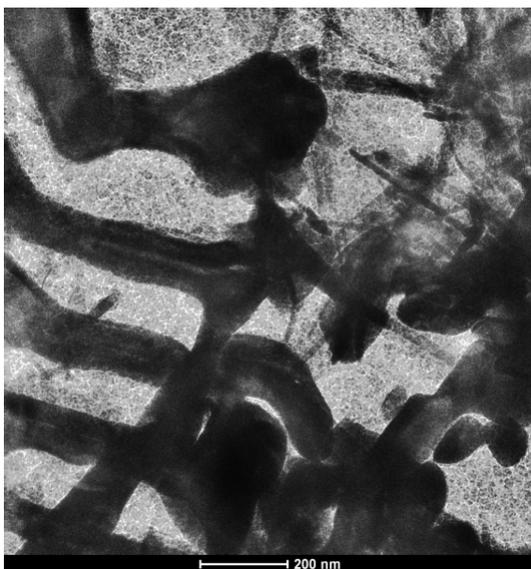
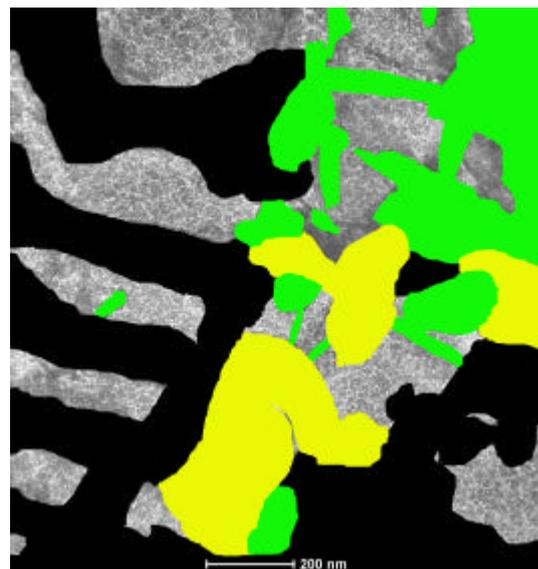


Figura 53 – Imagem da amostra de estrutura composta por ferrita e bainita envelhecida a 550°C por 2.000 horas, com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 3, 4 e 5.



(a)



(b)

Figura 54 – (a) Campo 3, bainítico, da Figura 53 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 38.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Aparecem, em quantidades equivalentes, o M_2C (verde), em forma de emaranhados e de blocos, o M_7C_3 (amarelo), coalescido, e o $M_{23}C_6$ (preto), em forma de blocos e de lamelas.

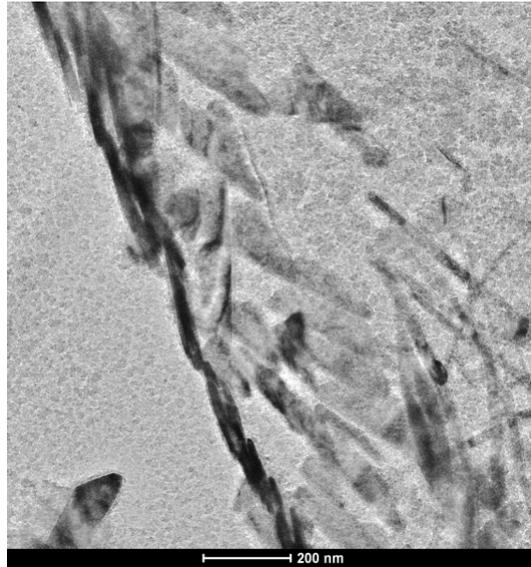
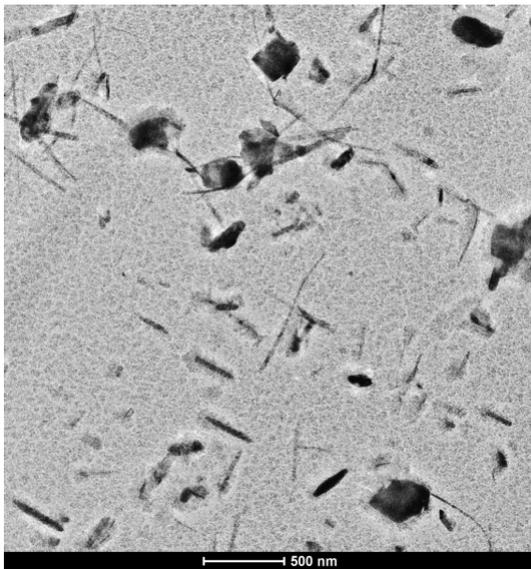
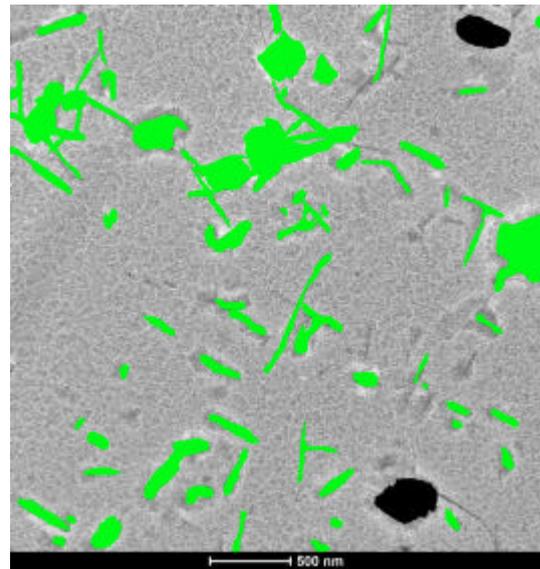


Figura 55 – Campo 4, contorno de grão, da Figura 53 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 38.000 X. Todos os precipitados presentes são do tipo M_2C .



(a)



(b)

Figura 56 – (a) Campo 5, ferrítico, da Figura 53 – aço envelhecido por 2.000 horas a 550°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há maioria de precipitados do tipo M_2C (verde), em forma de emaranhados, de blocos e dispersos na matriz, além de pequena quantidade de $M_{23}C_6$ (preto), em forma de blocos.

Anexo II

Material envelhecido a 575°C

1.1 Ferrita-perlita – 100 horas

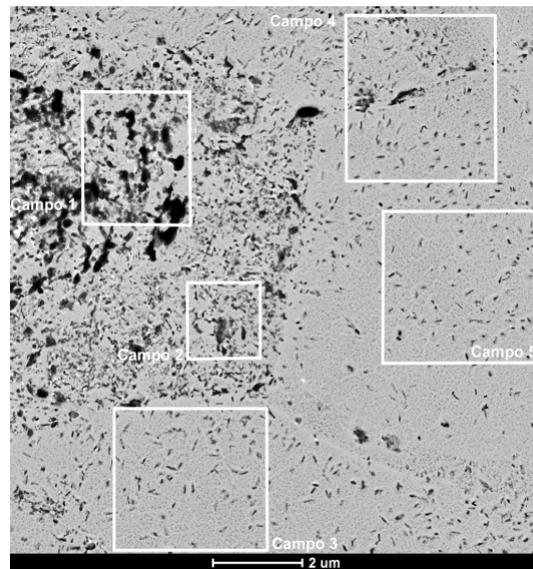


Figura 1 – Imagem da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 100 horas, com aumento de 4.000 X, apresentando cinco campos, apresentados a seguir.

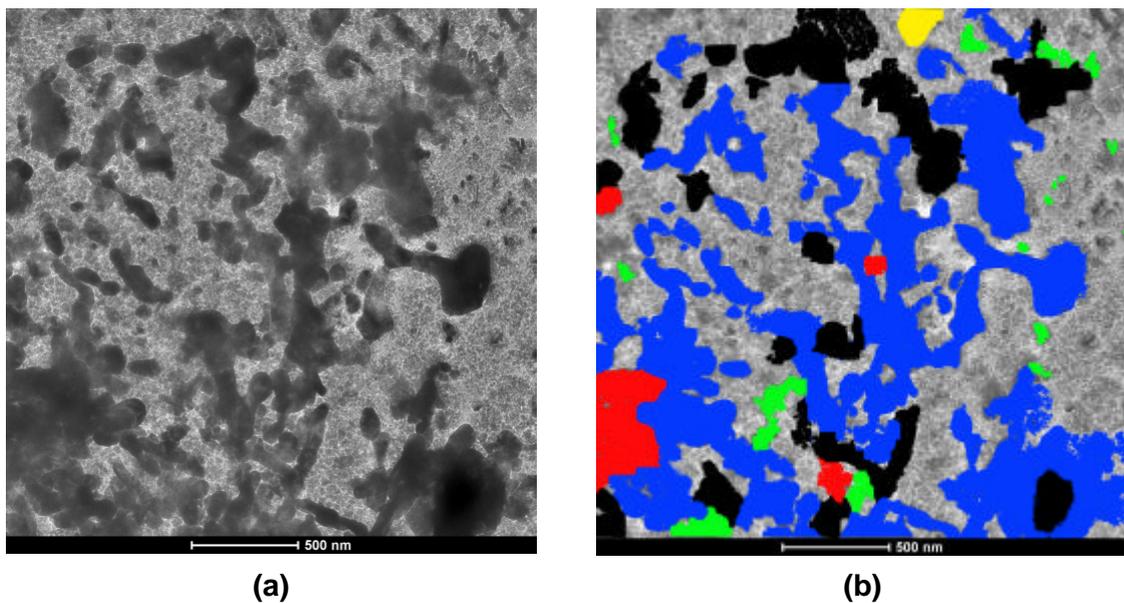


Figura 2 – (a) Campo 1, perlítico, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se observar predominância de M_3C (azul), quantidades razoáveis de $M_{23}C_6$ (preto), poucos carbonetos dos tipos M_2C (verde) e M_6C (vermelho), dispersos, e apenas um carboneto do tipo M_7C_3 (amarelo).

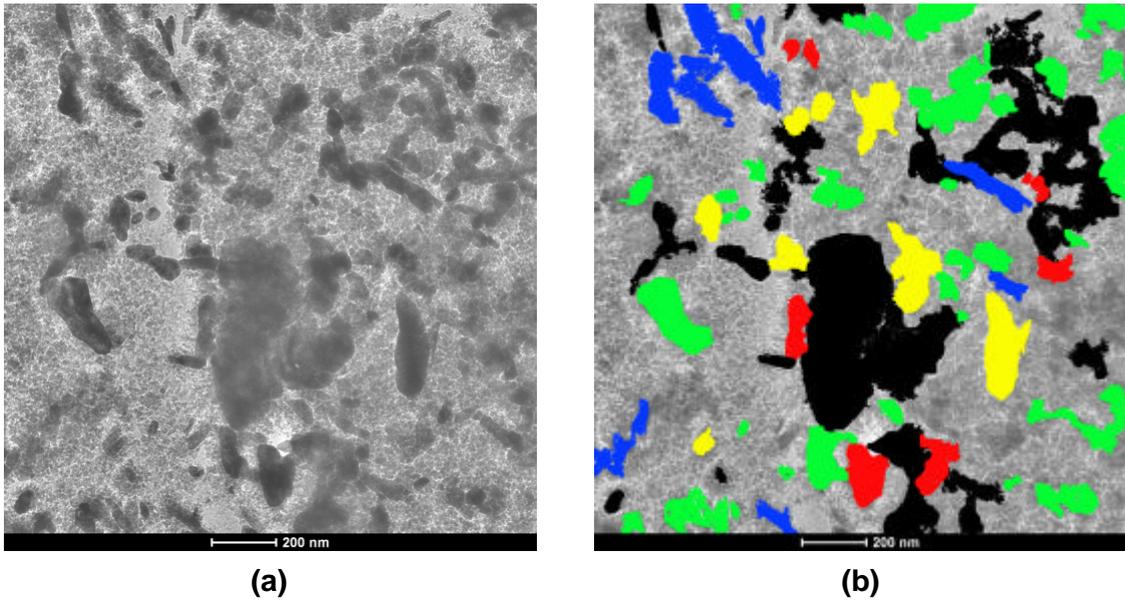


Figura 3 – (a) Campo 2, perlítico, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados: pouco M_3C (azul), carbonetos do tipo $M_{23}C_6$ (preto) tanto grandes quanto dispersos na matriz, M_2C (verde) dispersos e quantidades equivalentes de M_7C_3 (amarelo) e M_6C (vermelho).

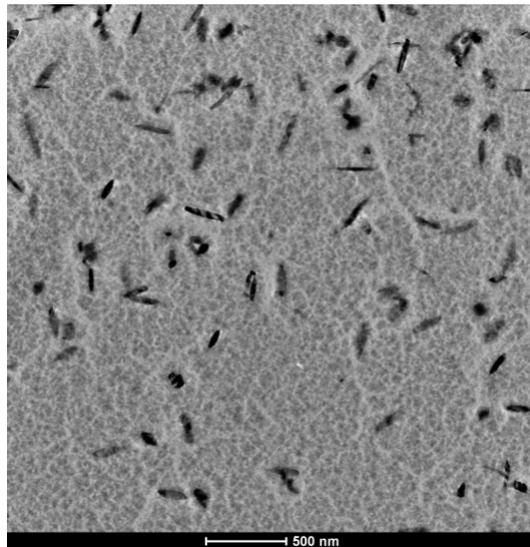
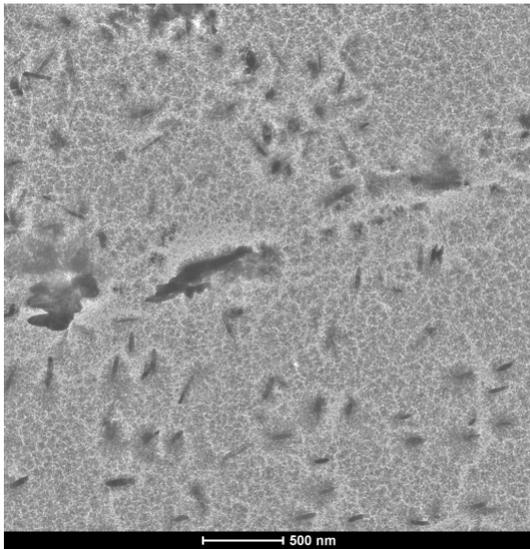
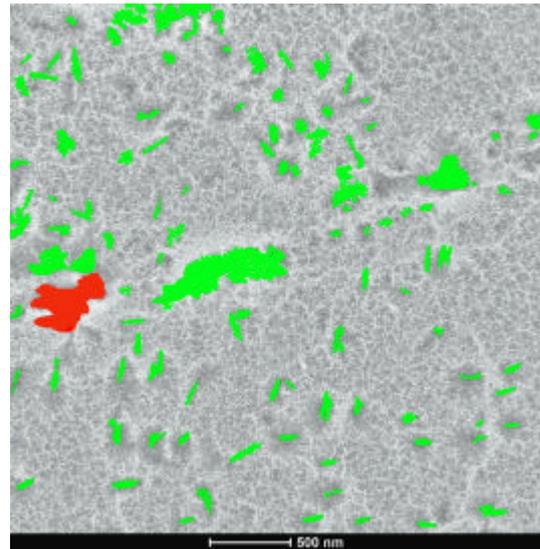


Figura 4 – Campo 3, ferrítico, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X. Todos os precipitados presentes são do tipo M_2C .

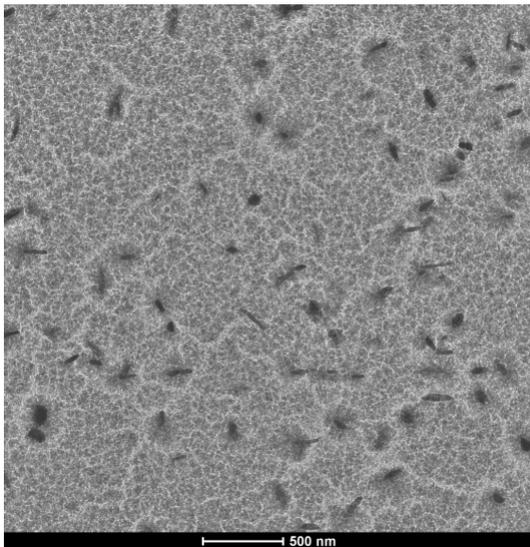


(a)

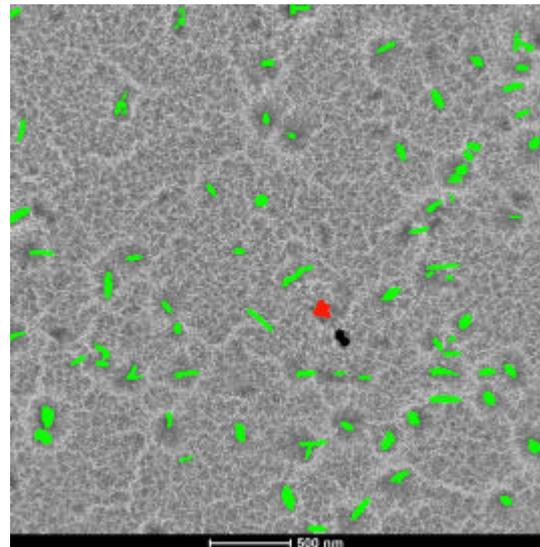


(b)

Figura 5 – (a) Campo 4, contorno de grão, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há uma maioria de carbonetos do tipo M_2C (verde), coalescidos no contorno de grão e finos e dispersos no interior, e apenas um carboneto do tipo M_6C (vermelho), no contorno de grão.



(a)



(b)

Figura 6 – (a) Campo 5, ferrita, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Pode-se notar apenas um precipitado do tipo $M_{23}C_6$ (preto) e um do tipo M_6C (vermelho). A maioria é do tipo M_2C (verde), que aparecem finos e dispersos.

1.2 Ferrita-perlita – 500 horas

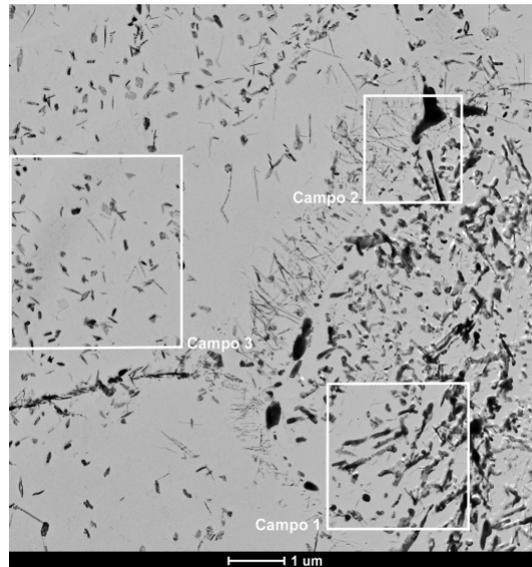


Figura 7 – Imagem da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 500 horas, com aumento de 5.000 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

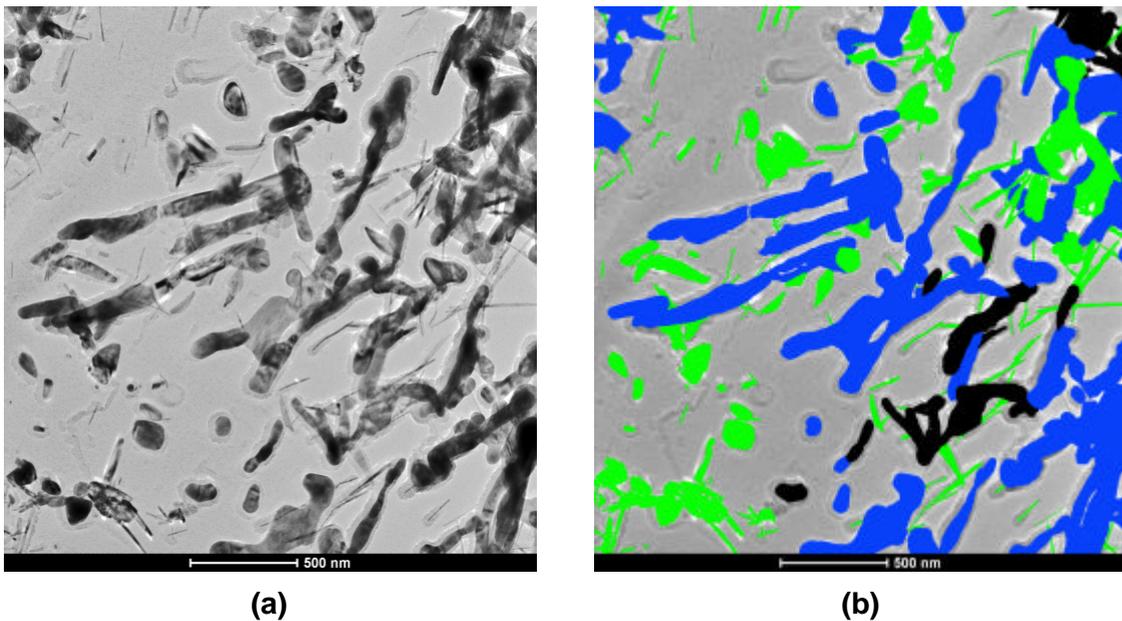
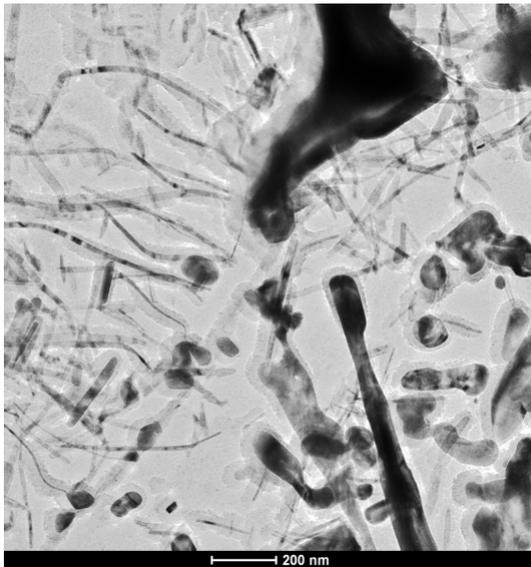


Figura 8 – (a) Campo 1, perlítico, da Figura 7 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se observar predominância de M_3C (azul), pequena quantidade de $M_{23}C_6$ (preto), além de M_2C (verde), tanto disperso quanto em forma de emaranhados.

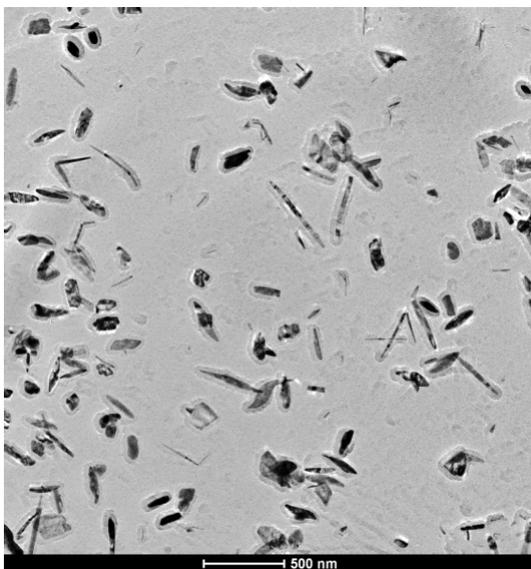


(a)

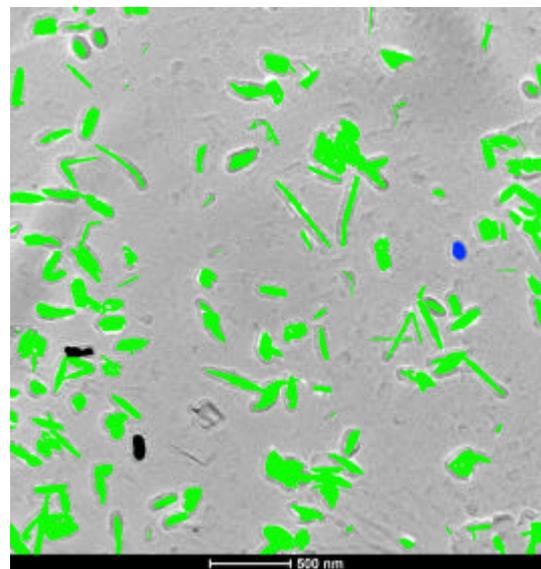


(b)

Figura 9 – (a) Campo 2, contorno de grão, da Figura 7 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados: há M_3C (azul), predominando dentro do grão perlítico, além de M_2C (verde) coalescido e em forma de emaranhados. No grão ferrítico, aparece pouco M_7C_3 (amarelo) e um $M_{23}C_6$ (preto), além de maioria de M_2C , com a configuração de bacia hidrográfica em direção ao contorno. No contorno, estão presentes o M_2C e o M_7C_3 coalescido.



(a)



(b)

Figura 10 – (a) Campo 3, ferrítico, da Figura 7 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há maioria de carbonetos do tipo M_2C (verde) e pequenas quantidades de $M_{23}C_6$ (preto) e de M_3C (azul).

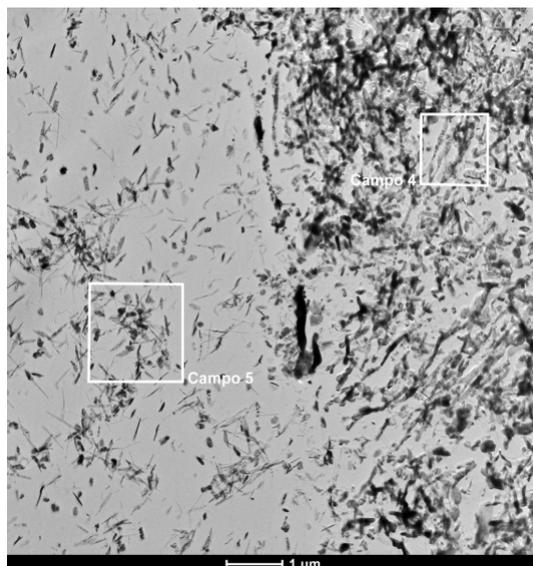


Figura 11 – Imagem da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 500 horas, com aumento de 5.000 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

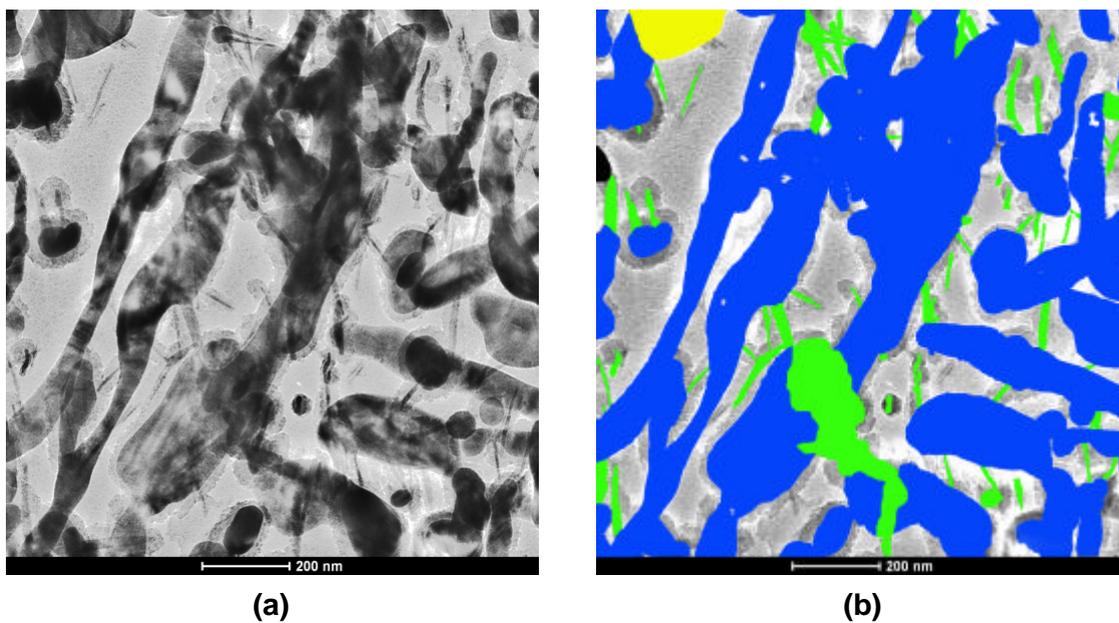


Figura 12 – (a) Campo 4, perlítico, da Figura 11 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 38.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há uma maioria de carbonetos do tipo M_6C (azul), além de M_7C_3 (verde) e pequenas quantidades de $M_{23}C_6$ (amarelo) e de M_7C_3 (preto).

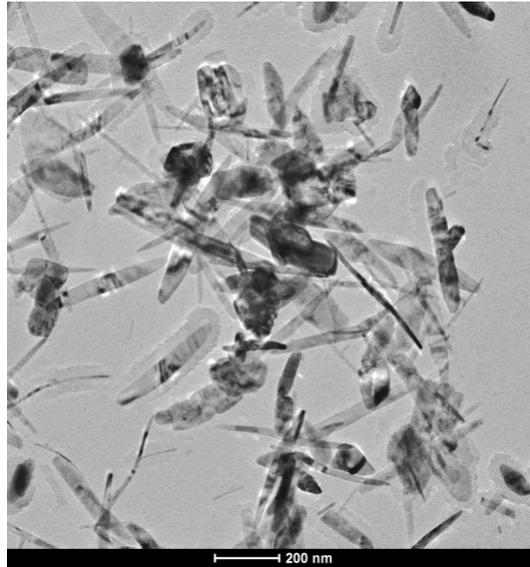


Figura 13 – Campo 5, ferrítico, da Figura 11 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 29.000 X. Todos os precipitados presentes nesta região são do tipo M_2C .

1.3 Ferrita-perlita – 1.000 horas

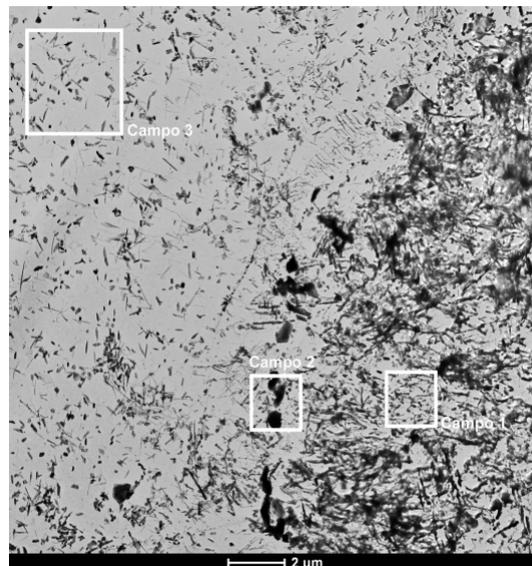
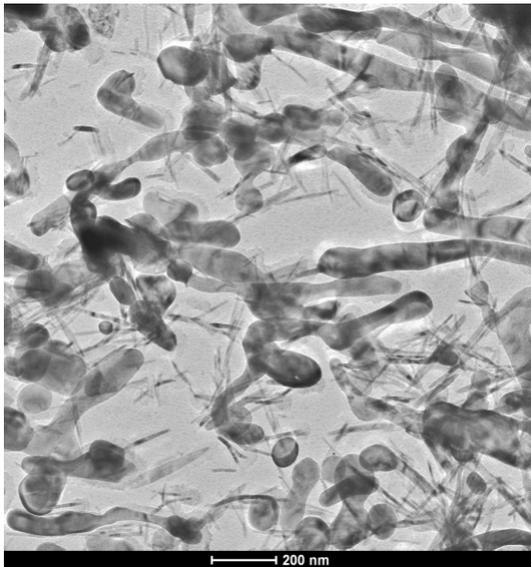
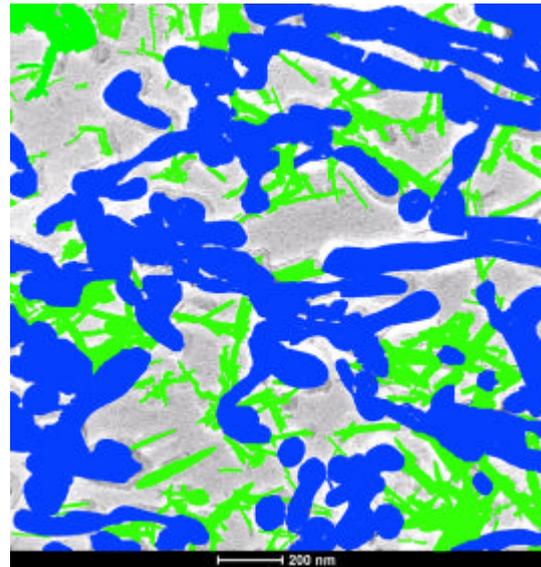


Figura 14 – Imagem da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 1.000 horas, com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

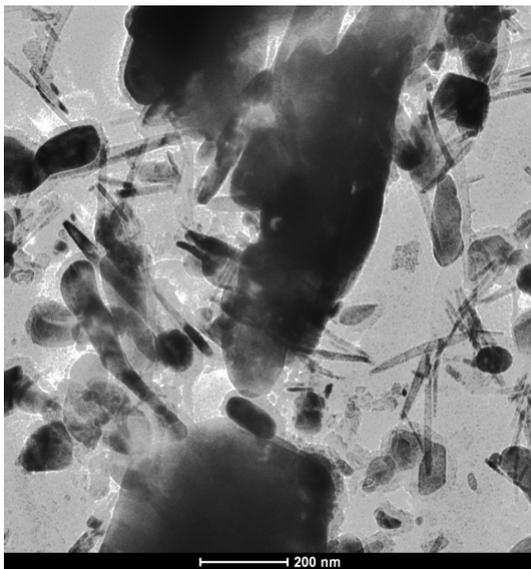


(a)

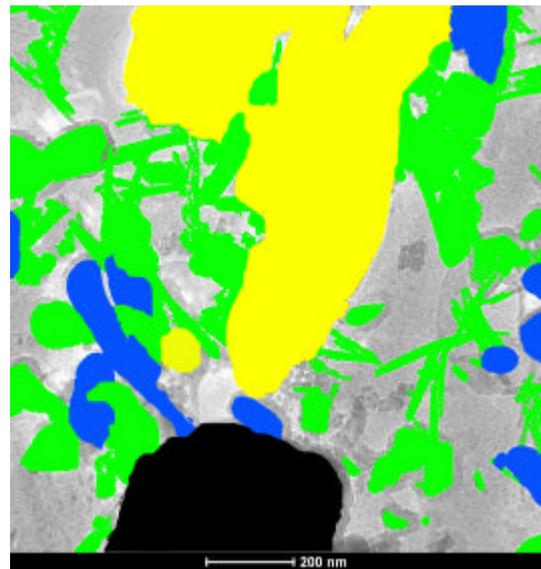


(b)

Figura 15 – (a) Campo 1, perlítico, da Figura 14 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se observar predominância de M_3C (azul) e muitos carbonetos do tipo M_2C (verde).



(a)



(b)

Figura 16 – (a) Campo 2, contorno de grão, da Figura 14 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 38.000 X, e (b) identificação dos precipitados: pouco M_3C (azul), apenas um $M_{23}C_6$ (preto) e um M_7C_3 (amarelo), ambos bastante coalescidos, e grande quantidade de M_2C (verde), que aparecem dispersos e em forma de emaranhados.

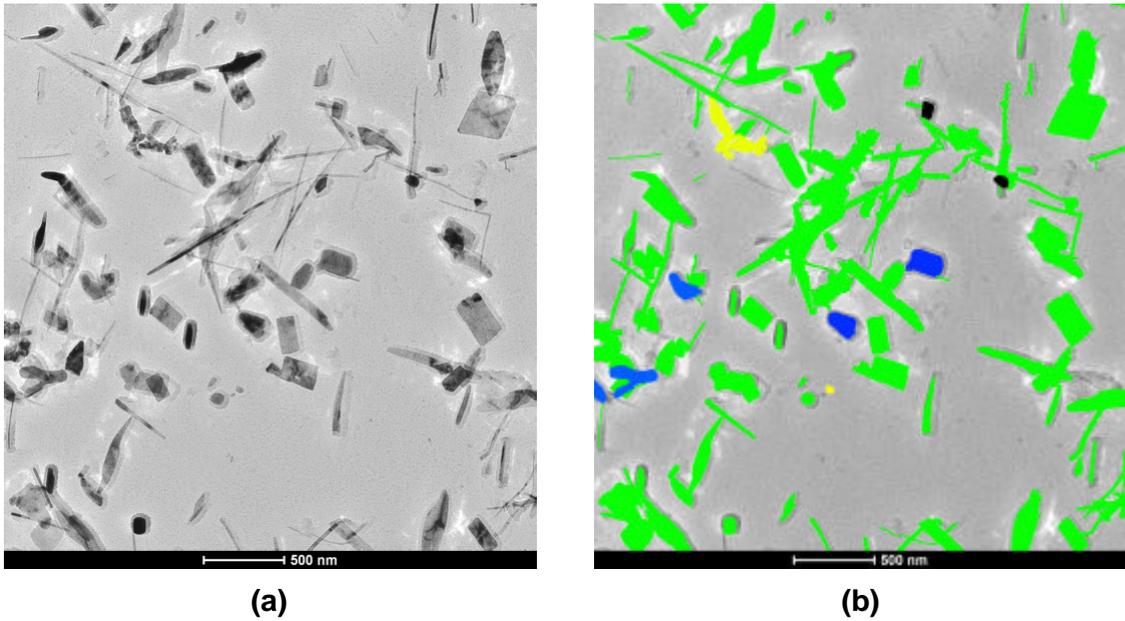


Figura 17 – (a) Campo 3, ferrita, da Figura 14 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. A grande maioria é do tipo M_2C (verde). Além dele, aparecem poucas quantidades de M_3C (azul), de M_7C_3 (amarelo) e de $M_{23}C_6$ (preto).

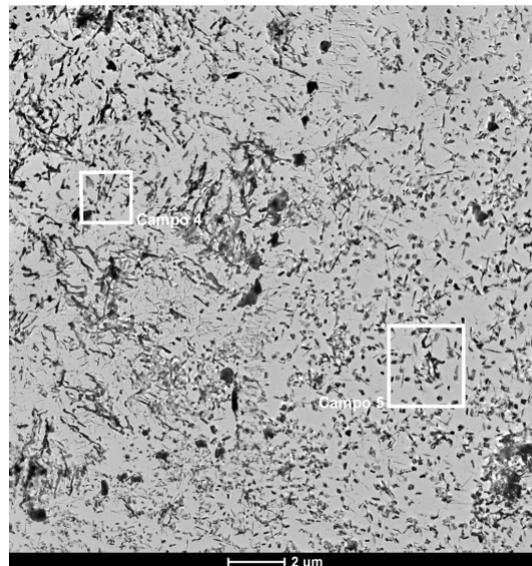
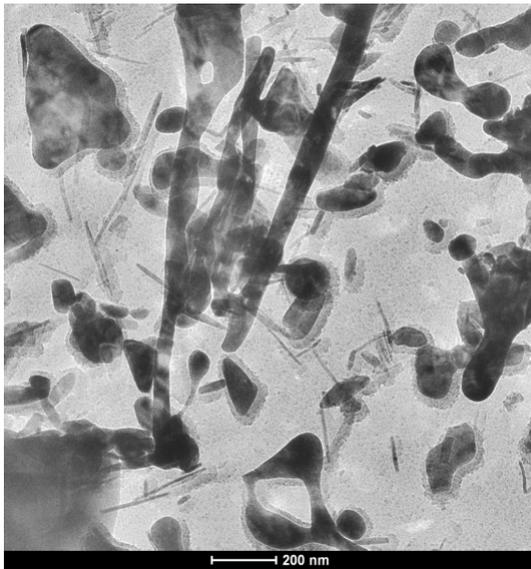
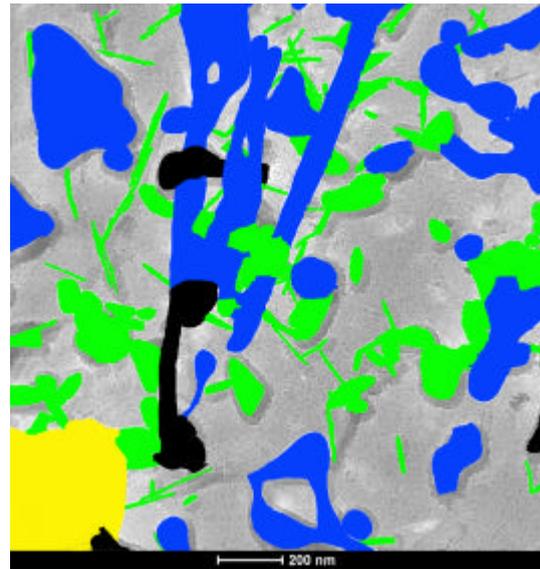


Figura 18 – Imagem da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 1.000 horas, com aumento de 2.250 X, apresentando os campos 4 e 5.

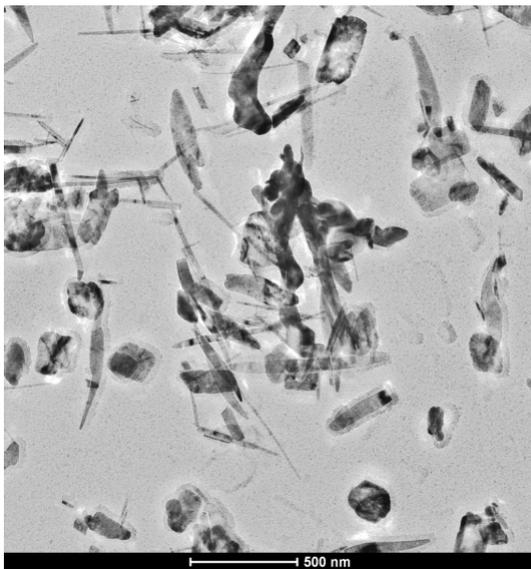


(a)

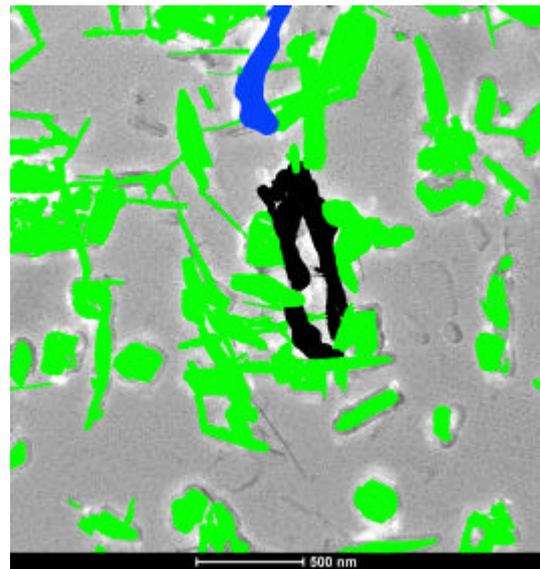


(b)

Figura 19 – (a) Campo 4, perlítico, da Figura 18 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Aparece apenas um carboneto do tipo M_7C_3 (amarelo), coalescido, e pouca quantidade de $M_{23}C_6$ (preto). Predominam os do tipo M_3C (azul) e M_2C (verde).



(a)



(b)

Figura 20 – (a) Campo 5, ferrítico, da Figura 18 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Há maioria de precipitados do tipo M_2C (verde) e poucas quantidades de M_3C e de $M_{23}C_6$ (preto).

1.4 Ferrita-perlita – 2.000 horas

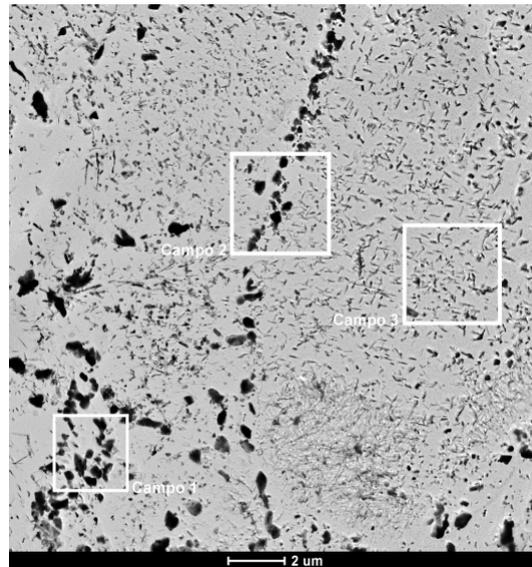


Figura 21 – Imagem da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 2.000 horas, com aumento de 2.550 X, apresentando os campos 1, 2 e 3.

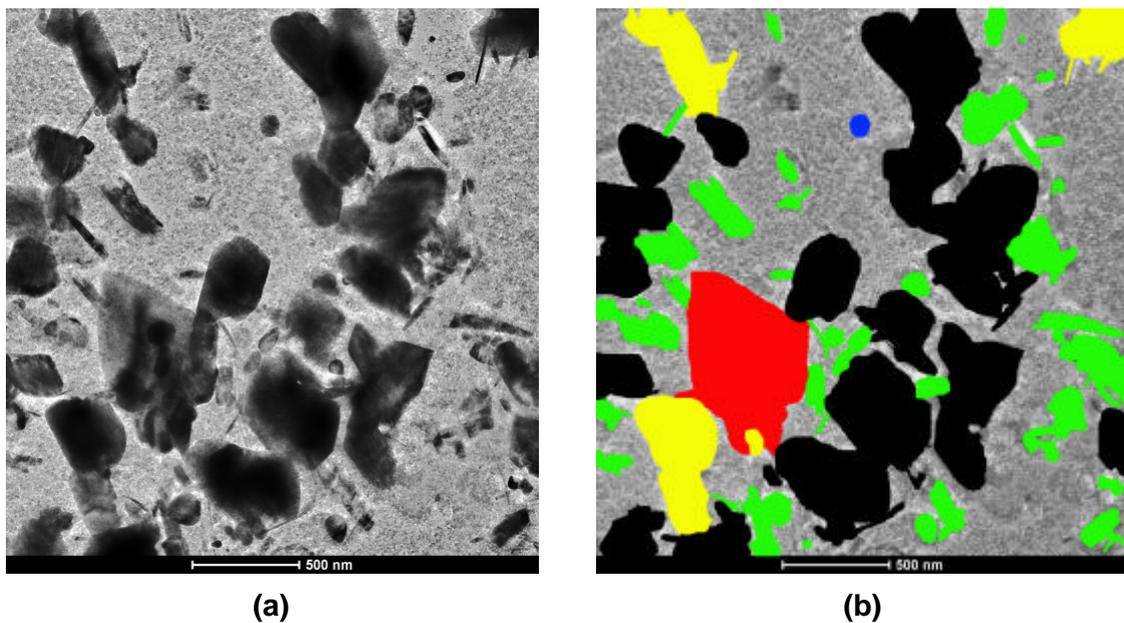
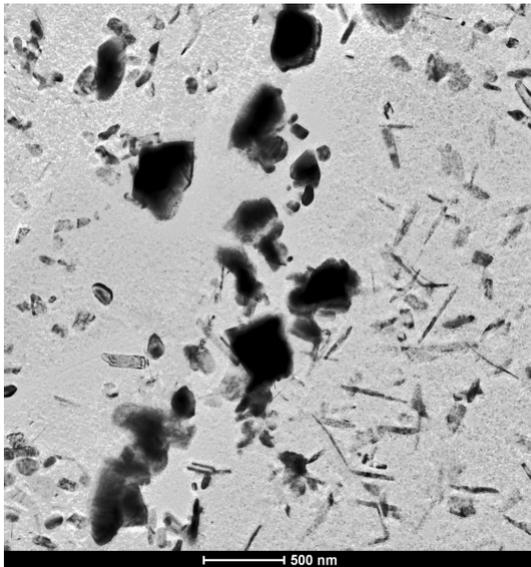
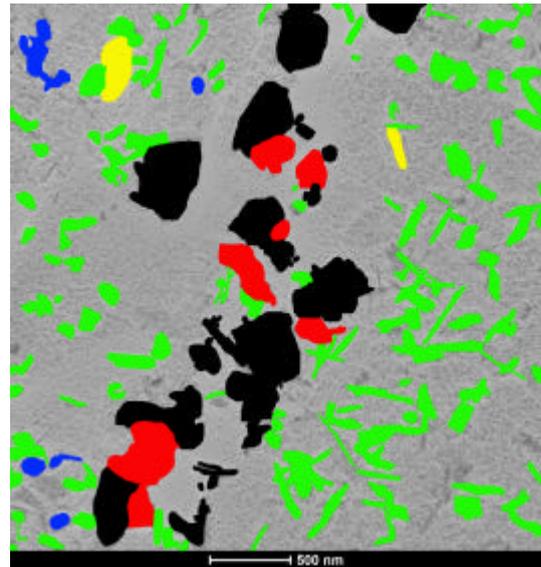


Figura 22 – (a) Campo 1, perlita degradada, da Figura 21 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se observar predominância de M_3C (azul) e muitos carbonetos do tipo M_2C (verde).

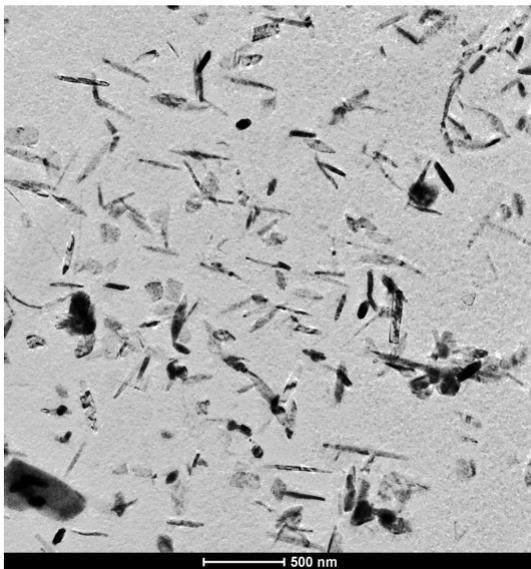


(a)

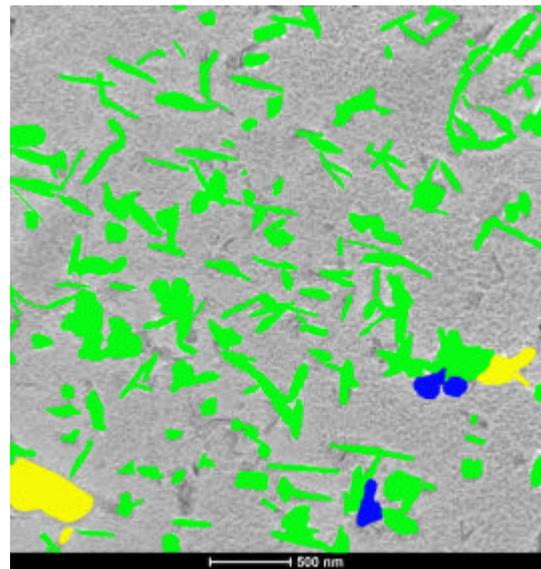


(b)

Figura 23 – (a) Campo 2, contorno de grão, da Figura 21 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se observar predominância de M_3C (azul) e muitos carbonetos do tipo M_2C (verde).



(a)



(b)

Figura 24 – (a) Campo 3, ferrita, da Figura 21 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se observar predominância de M_3C (azul) e muitos carbonetos do tipo M_2C (verde).

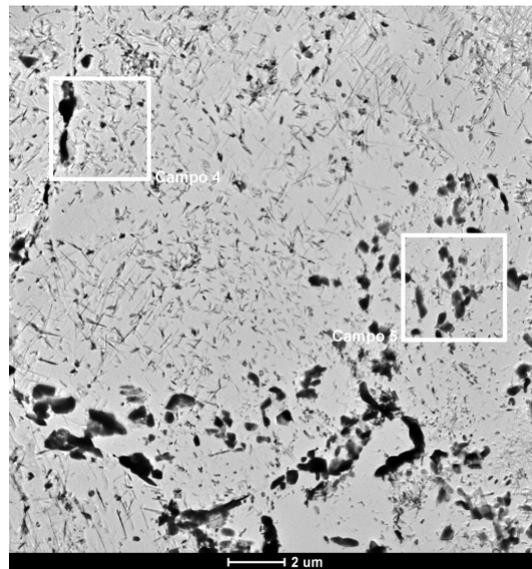


Figura 25 – Imagem da amostra de estrutura composta por ferrita e perlita envelhecida a 575°C por 2.000 horas, com aumento de 2.550 X, apresentando os campos 4 e 5.

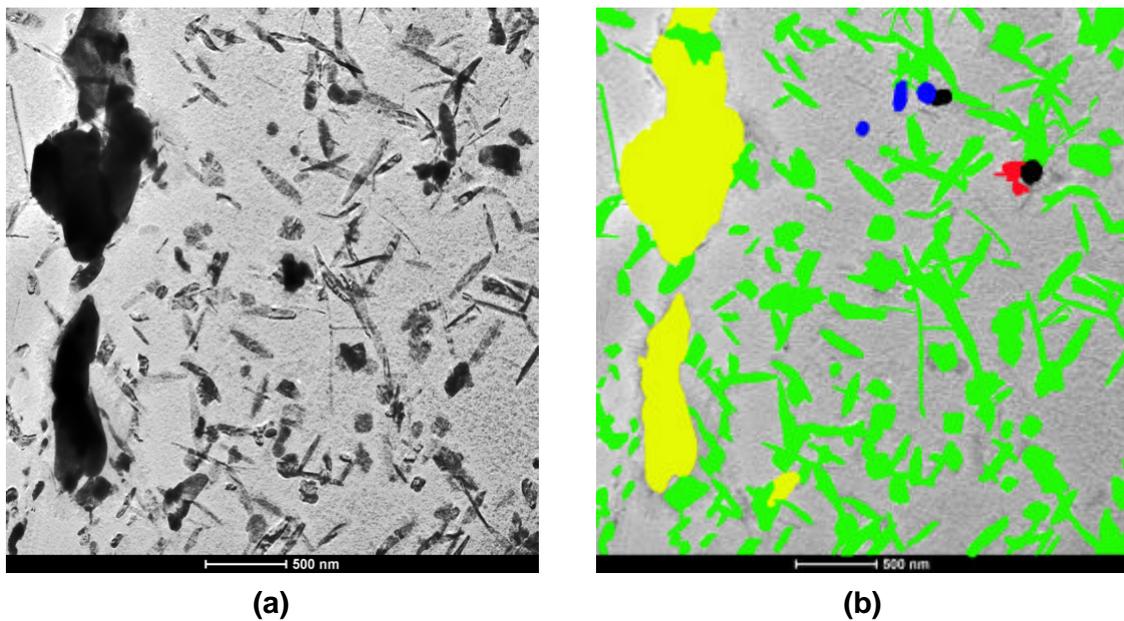


Figura 26 – (a) Campo 4, contorno de grão e ferrita, da Figura 25 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se observar predominância de M_3C (azul) e muitos carbonetos do tipo M_2C (verde).

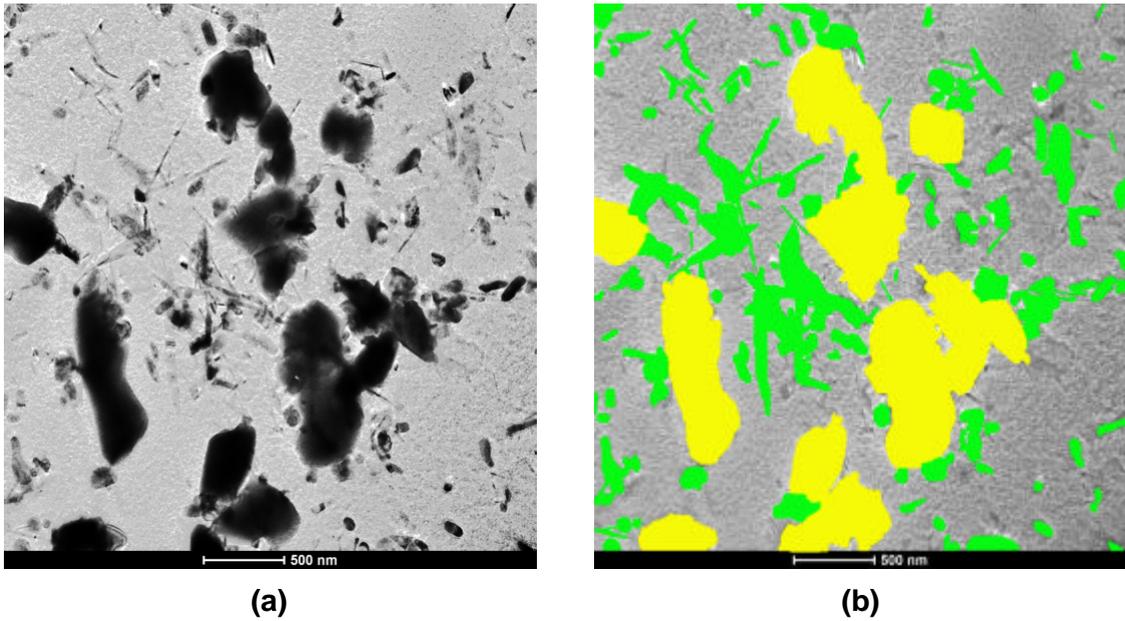


Figura 27 – (a) Campo 5, perlita degradada, da Figura 25 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Pode-se observar predominância de M_3C (azul) e muitos carbonetos do tipo M_2C (verde).

2.1 Bainita – 100 horas

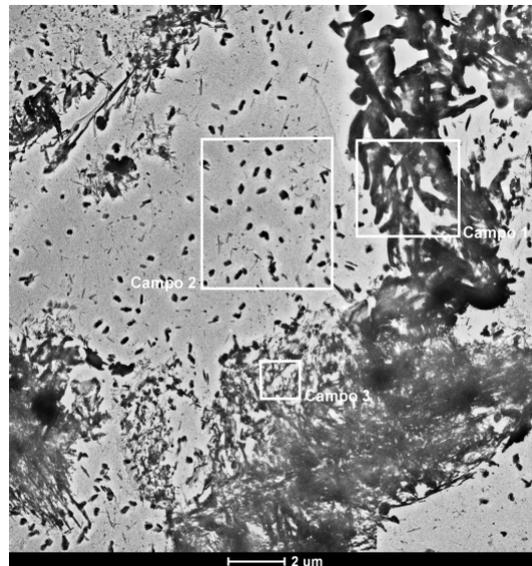
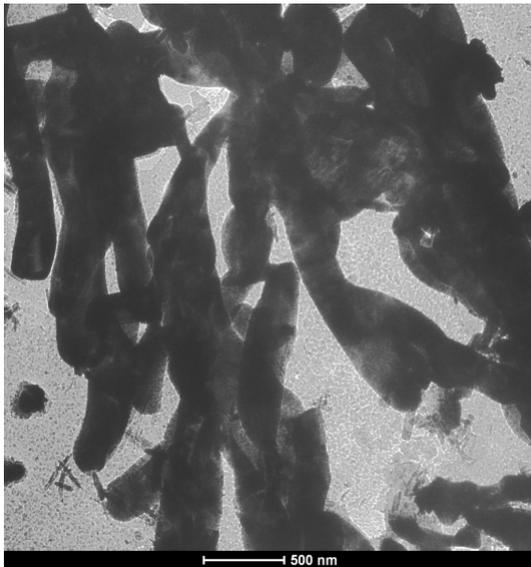


Figura 28 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 575°C por 100 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 1, 2 e 3, apresentados a seguir.

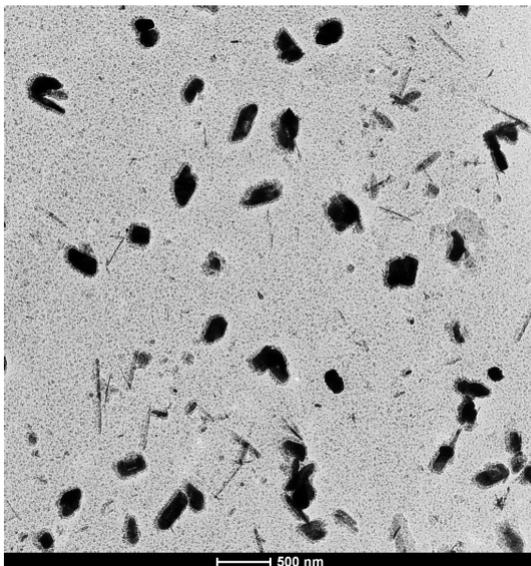


(a)

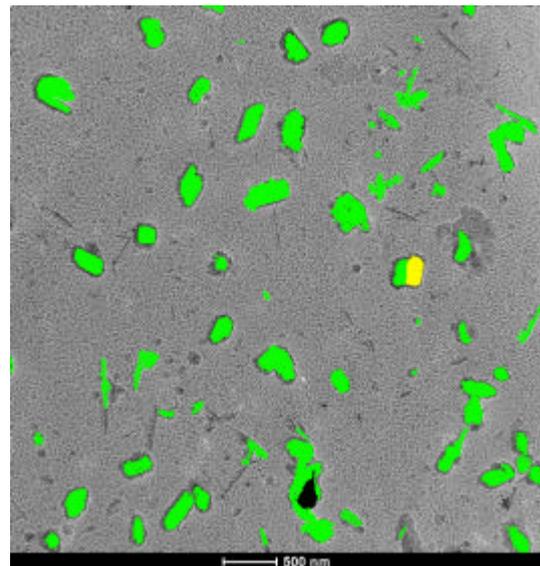


(b)

Figura 29 – (a) Campo 1, bainítico, da Figura 28 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Nota-se a presença de pequenas quantidades de M_2C (verde), embora a maior parte seja do tipo $M_{23}C_6$ (preto).



(a)



(b)

Figura 30 – (a) Campo 2, ferrítico, da Figura 28 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos precipitados: há apenas um carboneto do tipo $M_{23}C_6$ (preto) e um do tipo M_7C_3 (amarelo), além de grande quantidade de M_2C (verde).

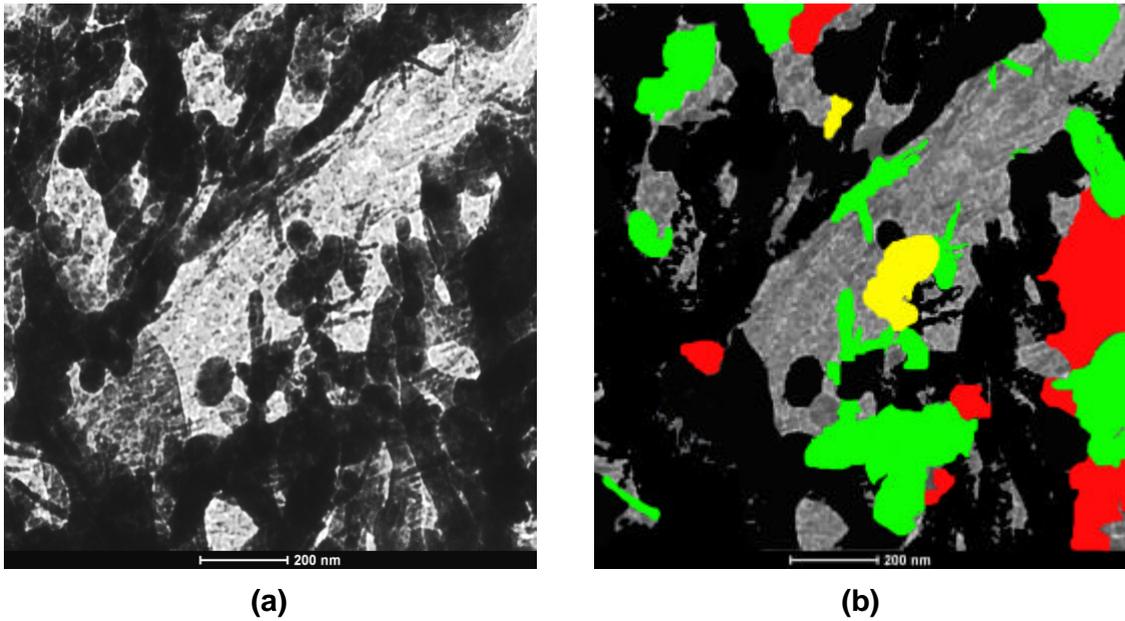


Figura 31 – (a) Campo 3, bainita, da Figura 28 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 38.000 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. À exceção do precipitado tipo M_7C_3 (amarelo), que aparece em pequena quantidade, todos os outros estão presentes em quantidades equivalentes: M_3C (azul), M_2C (verde), $M_{23}C_6$ (preto) e M_6C (vermelho).

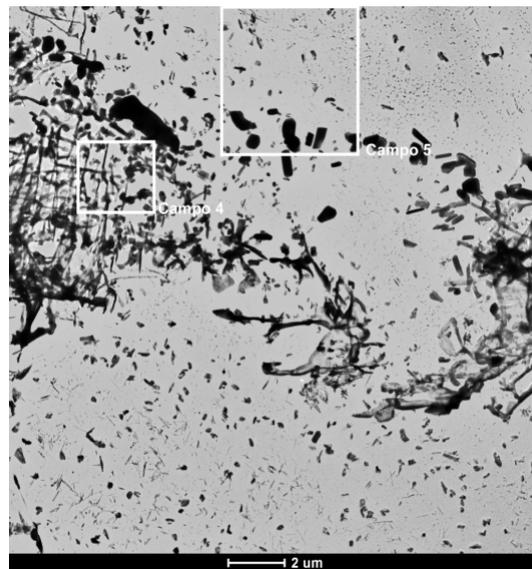
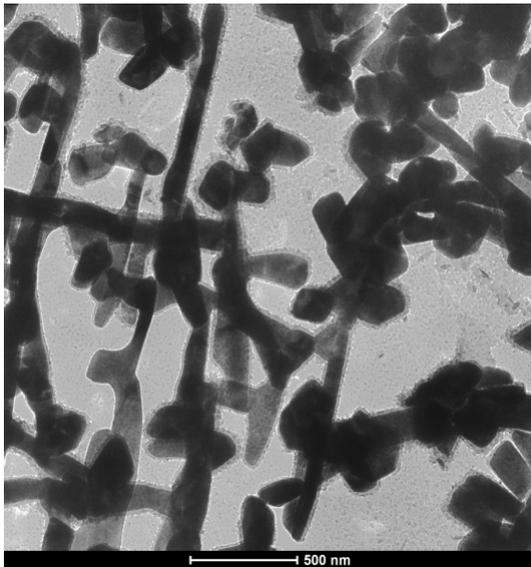
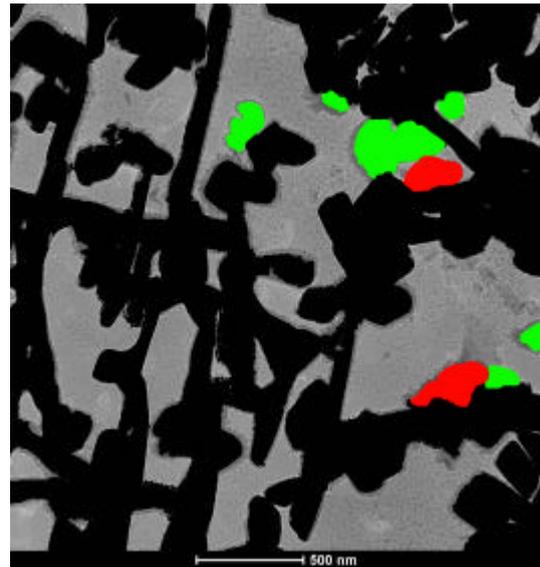


Figura 32 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 575°C por 100 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5, apresentados a seguir.

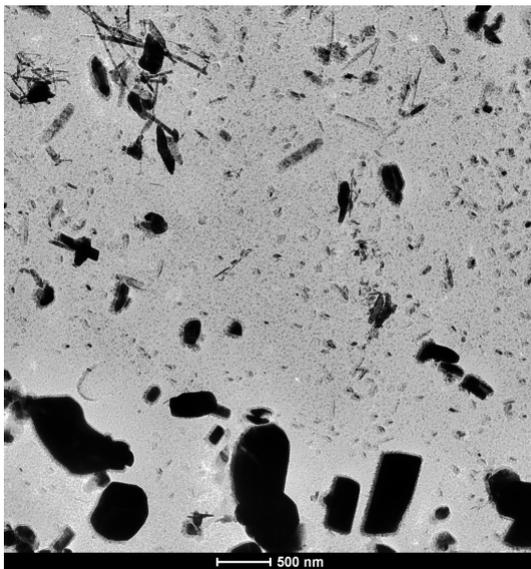


(a)

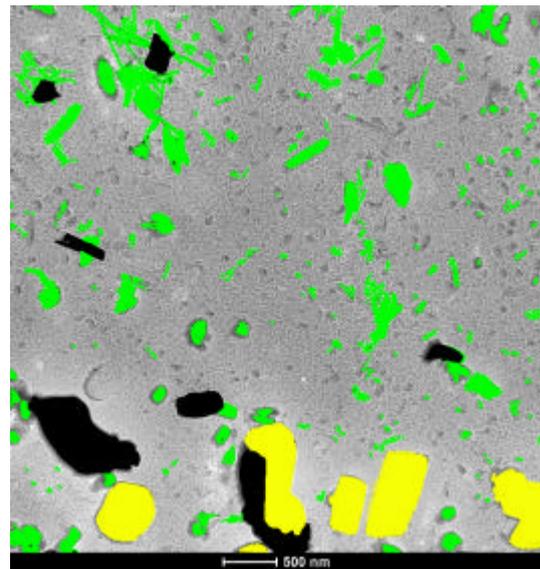


(b)

Figura 33 – (a) Campo 4, bainita, da Figura 32 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados. Há pequenas quantidades de M_2C (verde) e de M_6C (vermelho) e maioria de carbonetos do tipo $M_{23}C_6$ (preto).



(a)



(b)

Figura 34 – (a) Campo 5, contorno de grão e ferrita, da Figura 32 – aço envelhecido por 100 horas a 575°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Há poucos precipitados dos tipos $M_{23}C_6$ (preto) e M_7C_3 (amarelo), grandes, e uma maioria de M_2C (verde), finos e dispersos.

2.2 Bainita – 500 horas

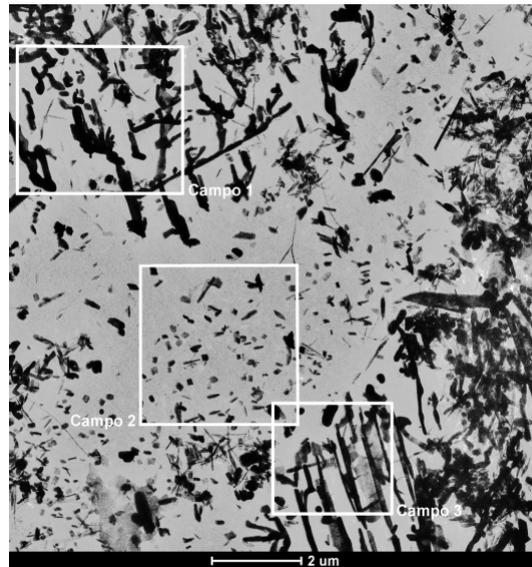


Figura 35 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 575°C por 500 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 1, 2 e 3, apresentados a seguir.

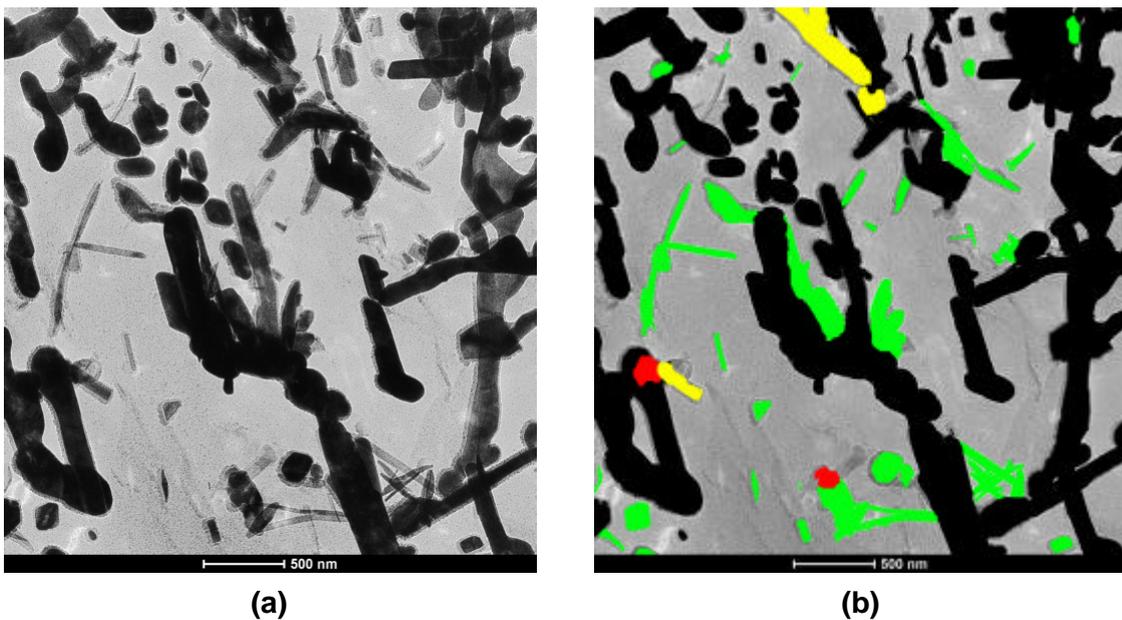
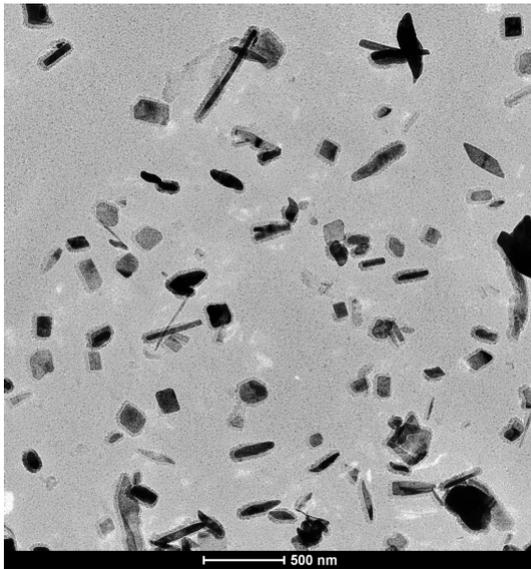
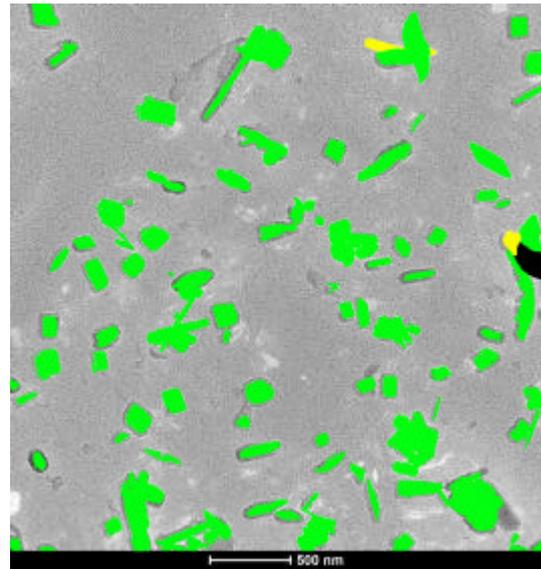


Figura 36 – (a) Campo 1, bainita, da Figura 35 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Nota-se a presença de M_2C (verde) e de $M_{23}C_6$ (preto), sendo que este último predomina, além de pequenas quantidades de M_7C_3 (amarelo) e de M_6C (vermelho).

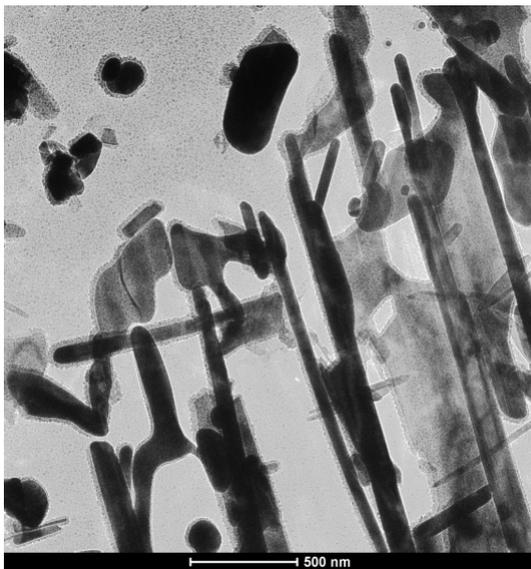


(a)

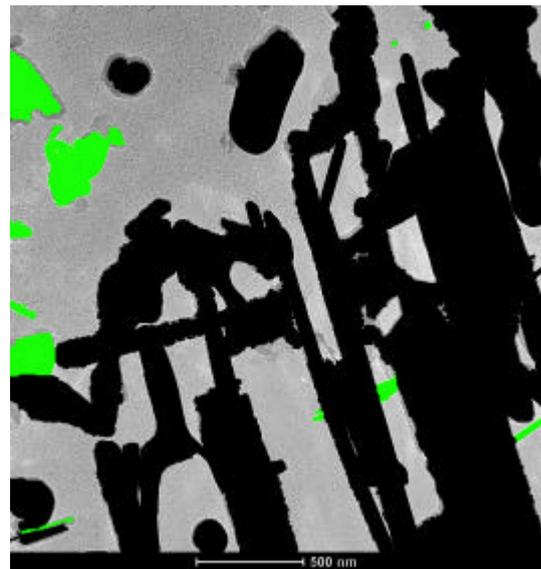


(b)

Figura 37 – (a) Campo 2, ferrita, da Figura 35 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados: há apenas um carboneto do tipo $M_{23}C_6$ (preto) e um do tipo M_7C_3 (amarelo), além de grande quantidade de M_2C (verde), que aparecem dispersos na matriz.



(a)



(b)

Figura 38 – (a) Campo 3, bainita, da Figura 35 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Nota-se predominância de precipitados do tipo $M_{23}C_6$ (preto) e pequena quantidade de M_2C (verde).

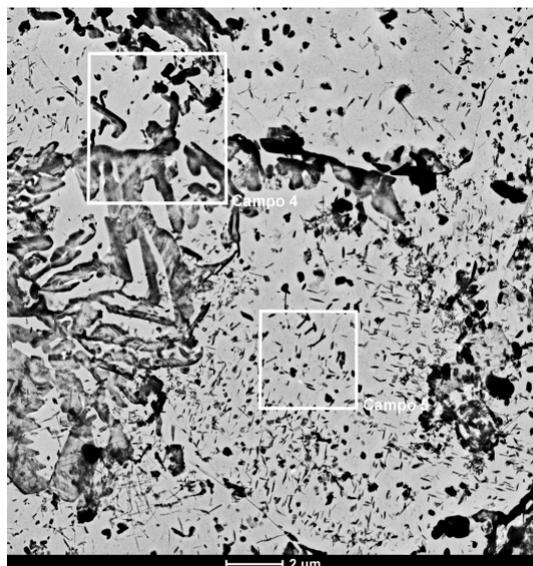


Figura 39 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 575°C por 500 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5, apresentados a seguir.

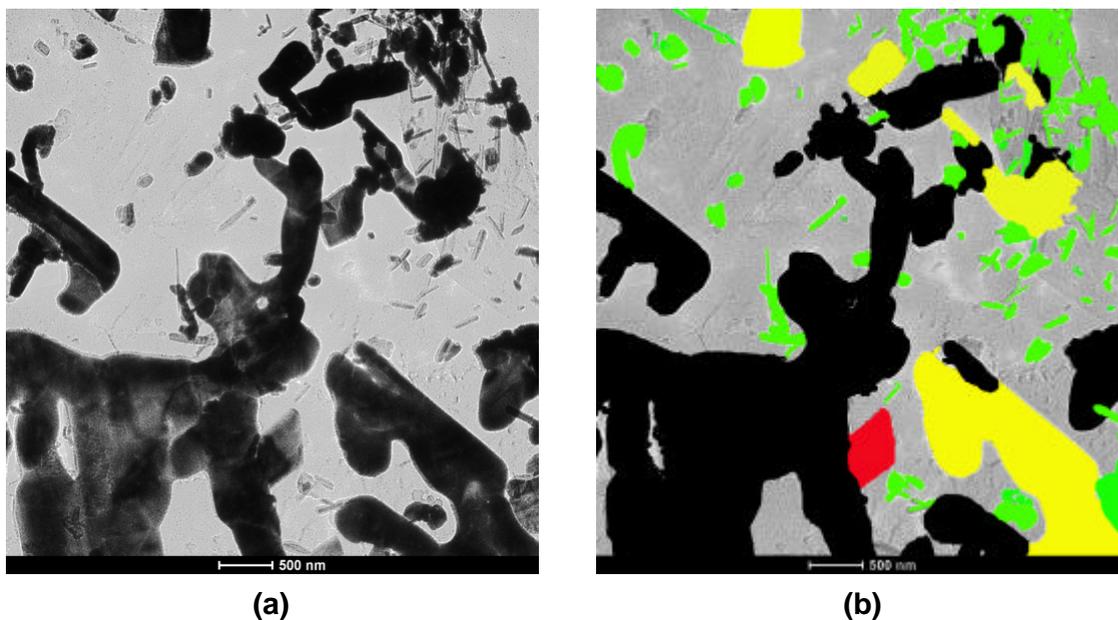


Figura 40 – (a) Campo 4, contorno de grão, da Figura 39 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos precipitados. Há grande quantidade de $M_{23}C_6$ (preto) e de M_7C_3 (amarelo), bastante coalescidos, M_2C (verde), dispersos e em forma de emaranhados, e apenas um M_6C (vermelho).

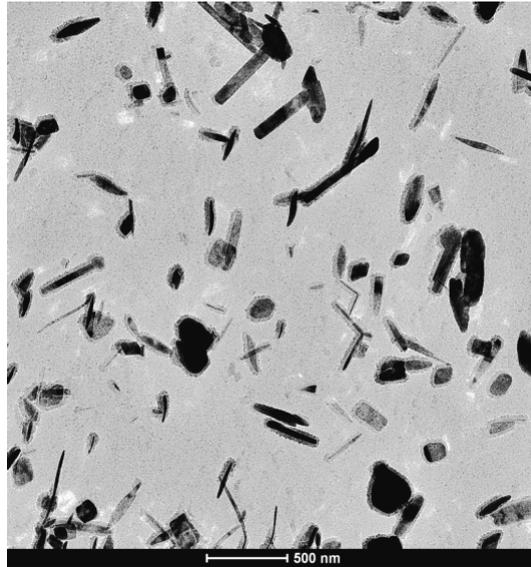


Figura 41 – Campo 5, ferrita, da Figura 39 – aço envelhecido por 500 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X. Todos os precipitados presentes são do tipo M_2C .

2.3 Bainita – 1.000 horas

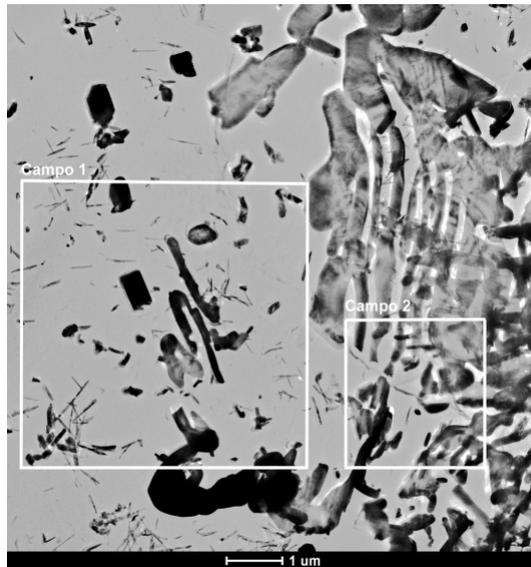
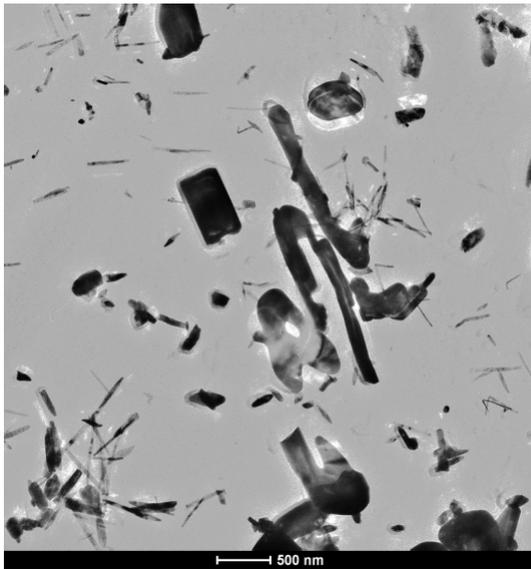
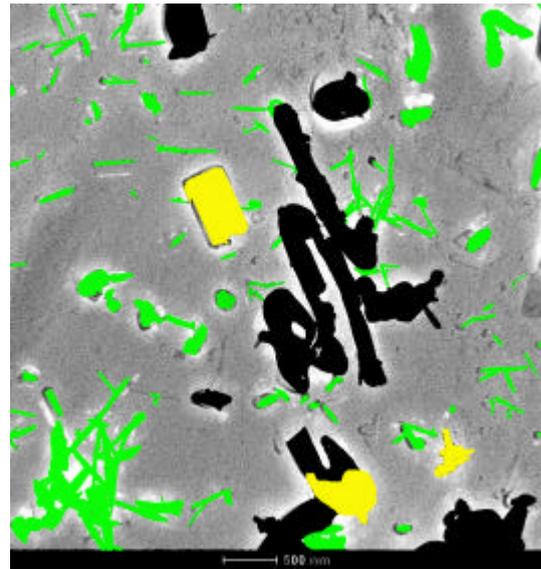


Figura 42 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 575°C por 1.000 horas e com aumento de 5.000 X, mostrando os campos 1 e 2, apresentados a seguir.



(a)

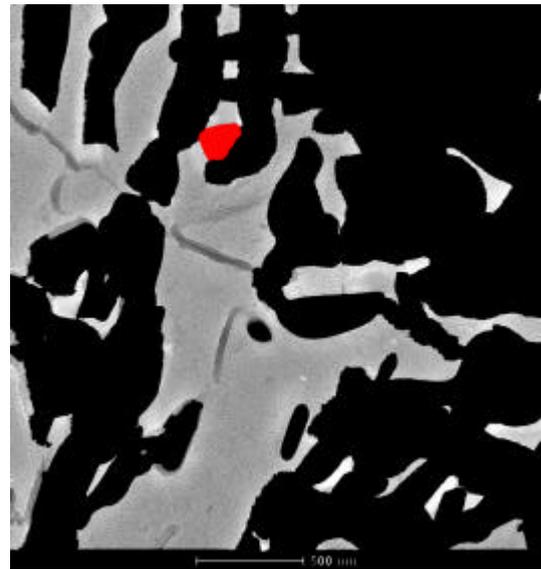


(b)

Figura 43 – (a) Campo 1, contorno de grão, da Figura 42 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos precipitados. Nota-se a presença de M_2C (verde), em forma de emaranhados e dispersos na matriz, grande quantidade de $M_{23}C_6$ (preto), coalescido, além de pequenas quantidades de M_7C_3 (amarelo).



(a)



(b)

Figura 44 – (a) Campo 2, bainítico, da Figura 42 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados: há apenas um carboneto do tipo M_6C (vermelho) enquanto todos os outros são do tipo $M_{23}C_6$ (preto).

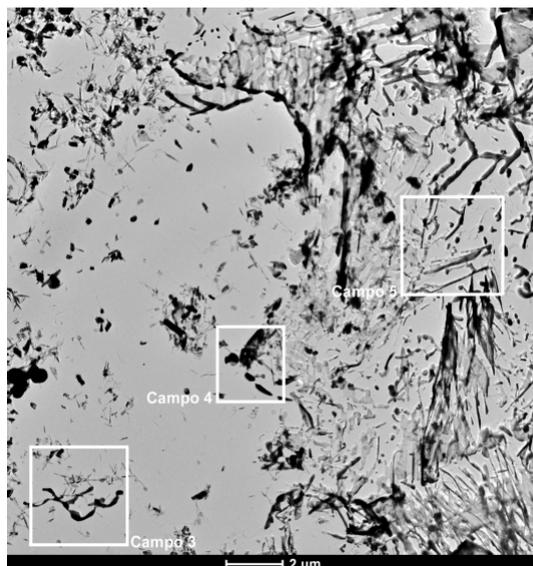


Figura 45 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 575°C por 1.000 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 3, 4 e 5, apresentados a seguir.

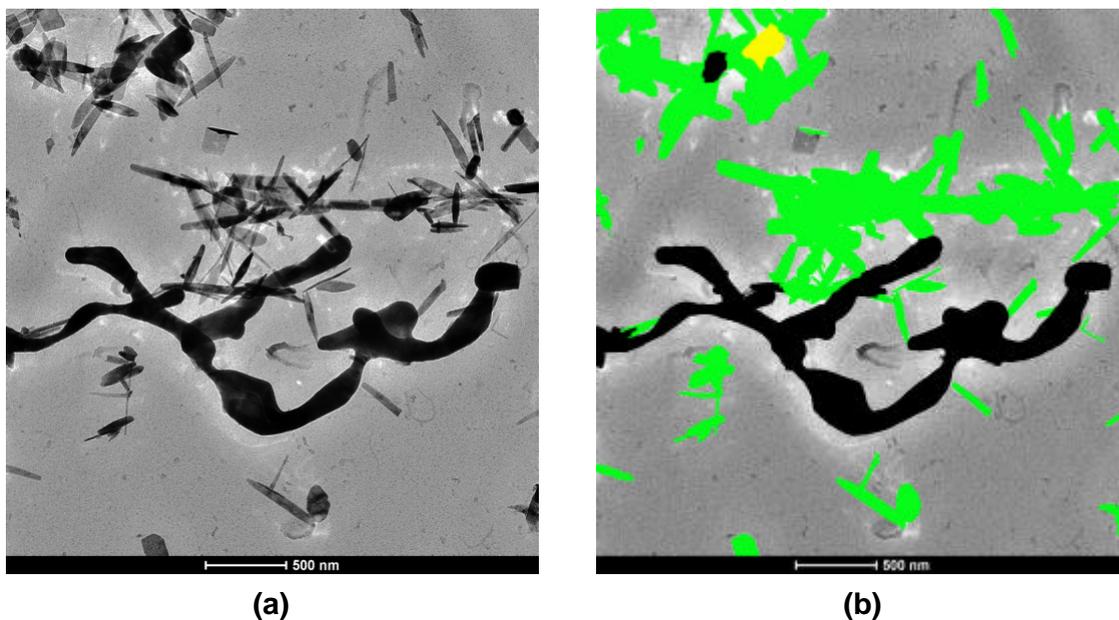


Figura 46 – (a) Campo 3, ferrita, da Figura 45 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Aparece o precipitado do tipo $M_{23}C_6$ (preto), coalescido, apenas um do tipo M_7C_3 (amarelo) e maioria de M_2C (verde), tanto dispersos quanto na forma de emaranhados.

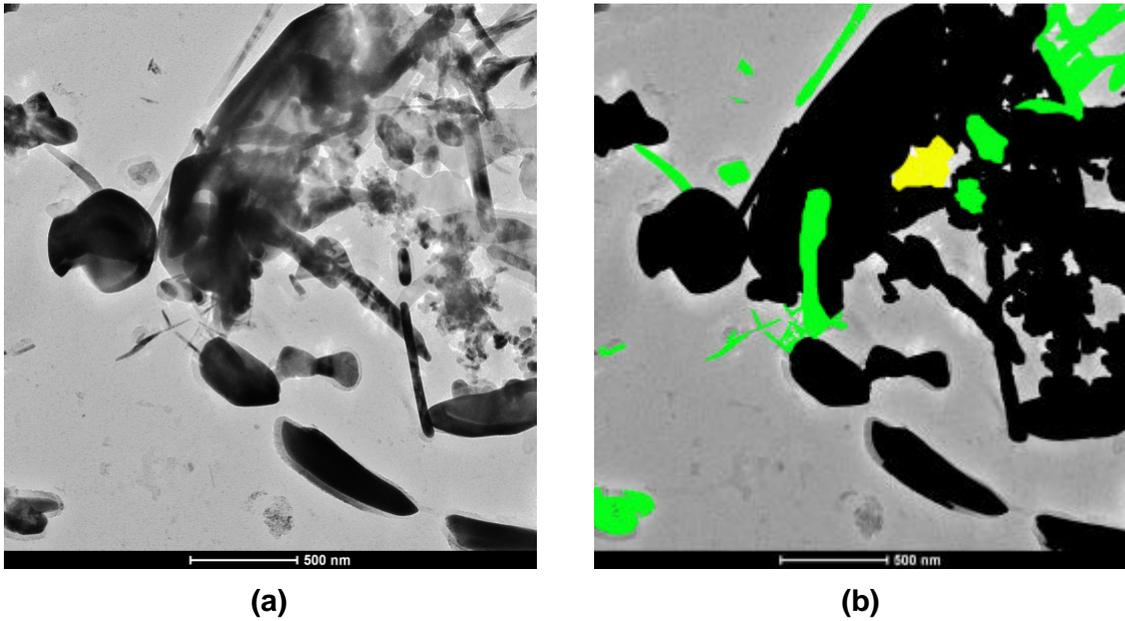


Figura 47 – (a) Campo 4, contorno de grão, da Figura 45 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados. Há pouca quantidade de M_7C_3 (amarelo) e de M_2C (verde), sendo que este último aparece em forma de emaranhados. Predomina o $M_{23}C_6$ (preto), tanto coalescido e quanto em forma de aglomerados.

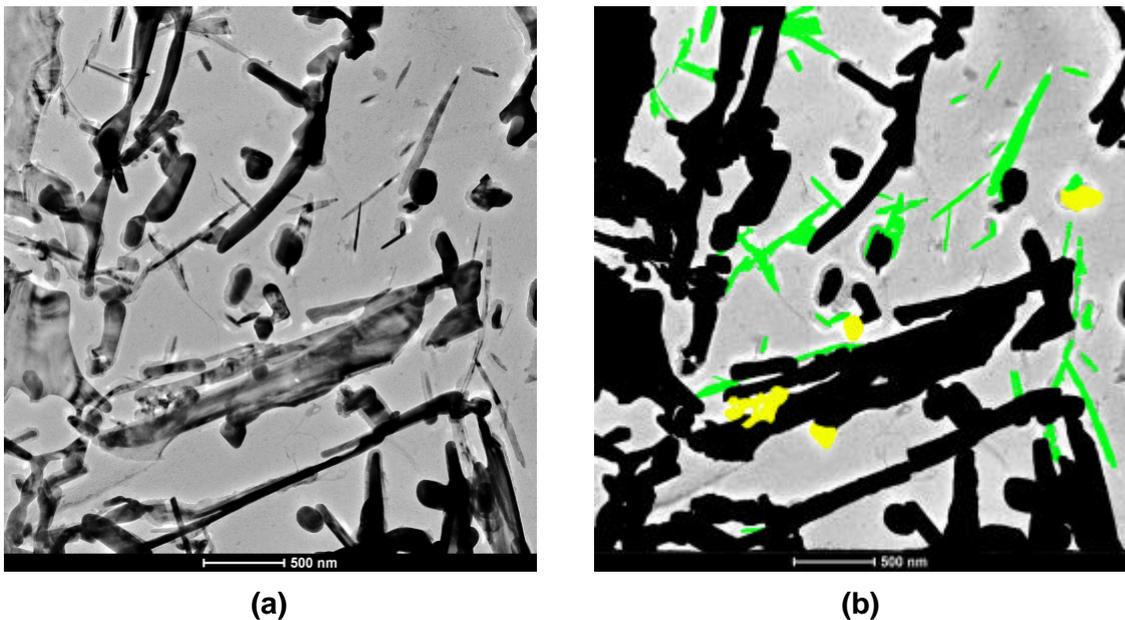


Figura 48 – (a) Campo 5, bainita, da Figura 45 – aço envelhecido por 1.000 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há grande quantidade de $M_{23}C_6$ (preto), que predomina, além de poucos precipitados dos tipos M_2C (verde) e M_7C_3 (amarelo).

2.4 Bainita – 2.000 horas

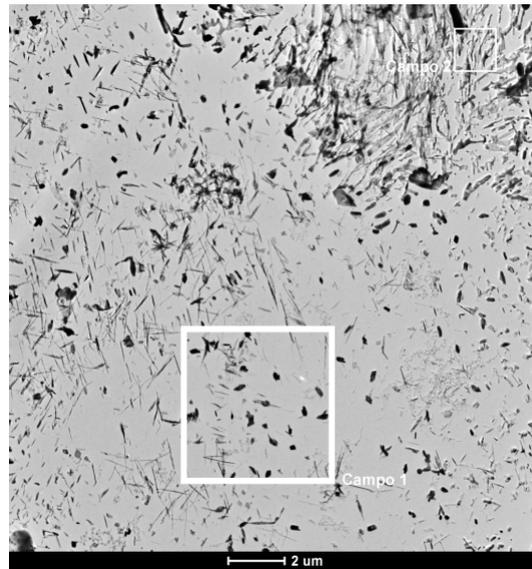


Figura 49 – Imagem da amostra de estrutura ferrítico-bainítica envelhecida a 575°C por 2.000 horas e com aumento de 2.550 X, apresentando os campos 1 e 2.

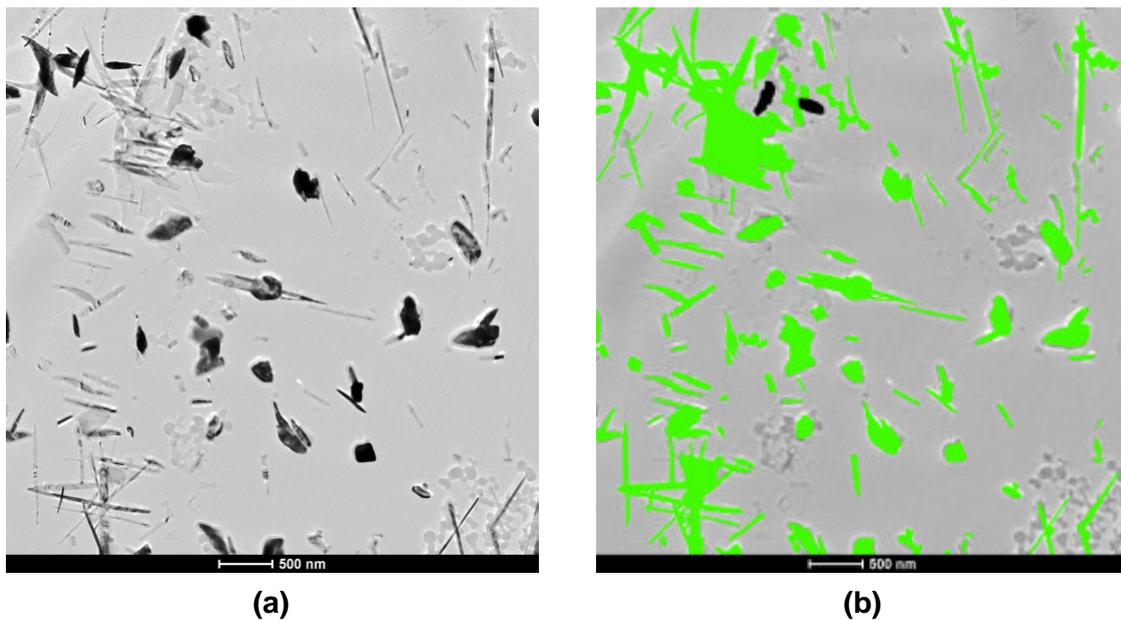


Figura 50 – (a) Campo 1, ferrita, da Figura 49 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há maioria de precipitados M_2C (verde) e e pequena quantidade de $M_{23}C_6$ (preto).

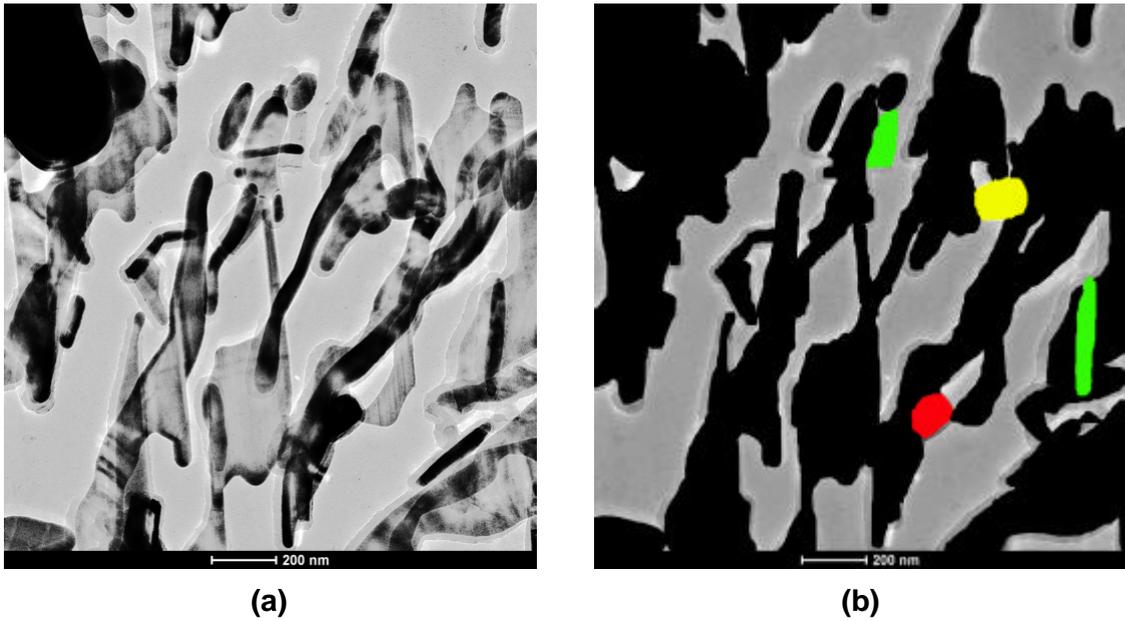


Figura 51 – (a) Campo 2, bainita, da Figura 49 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há grande quantidade de $M_{23}C_6$ (preto), que predomina, além de poucos precipitados dos tipos M_2C (verde), M_7C_3 (amarelo) e M_6C (vermelho).

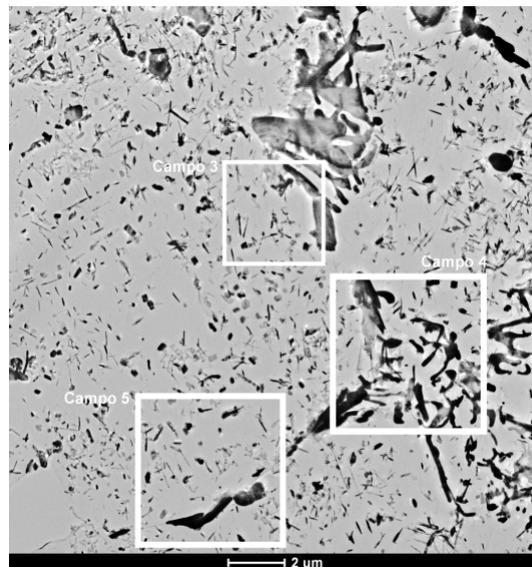
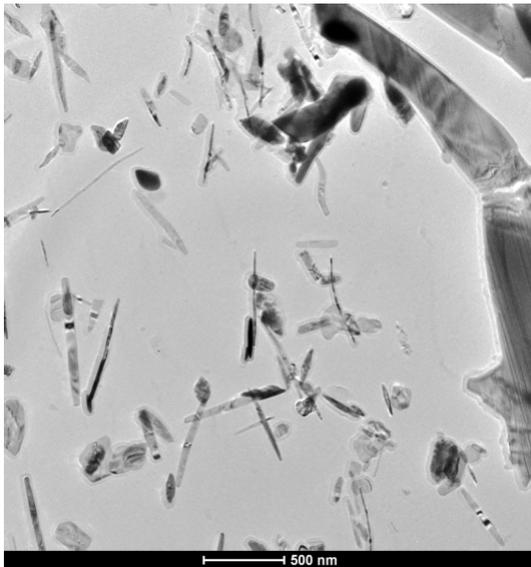
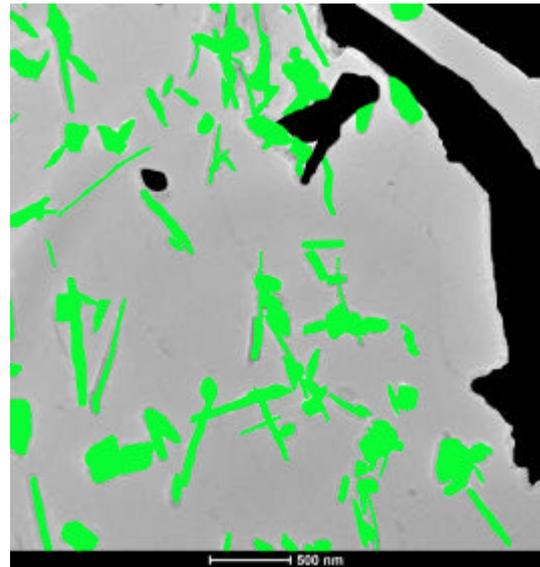


Figura 52 – Imagem da amostra de estrutura ferrítico-bainítica envelhecida a 575°C por 2.000 horas e com aumento de 2.550 X, apresentando os campos 3, 4 e 5.

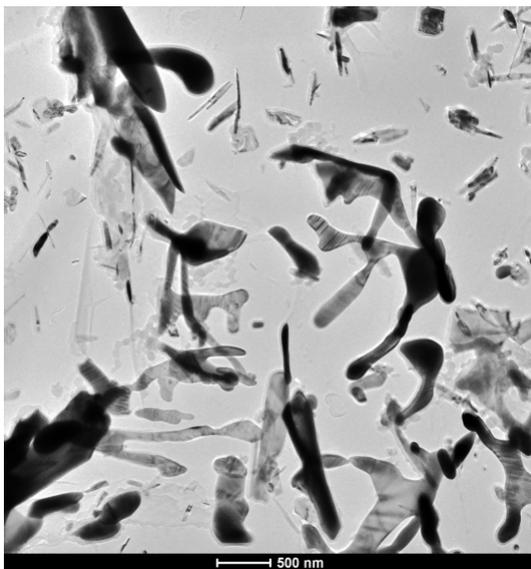


(a)

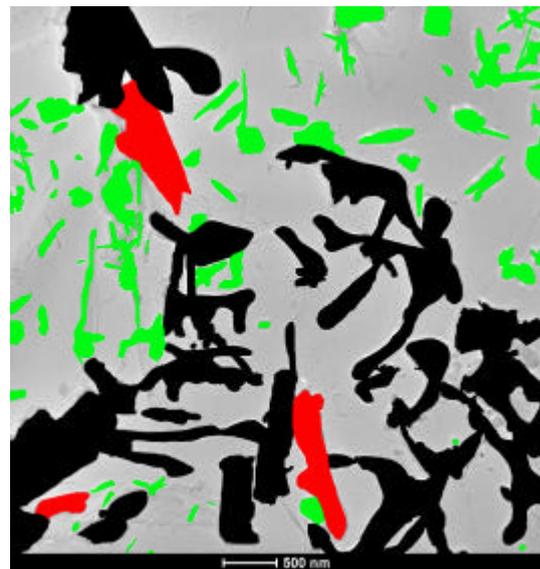


(b)

Figura 53 – (a) Campo 3, contorno de grão e ferrita, da Figura 52 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. A maioria dos precipitados é do tipo M_2C (verde), que aparece acicular e disperso na matriz ferrítica. Além dele, também está presente o $M_{23}C_6$ (preto), em forma de lamelas.

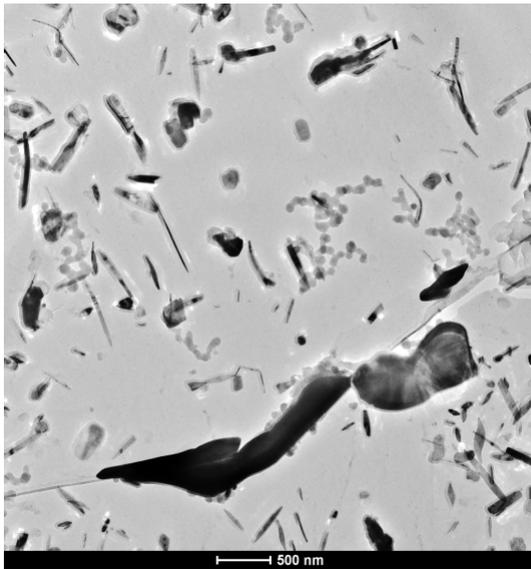


(a)

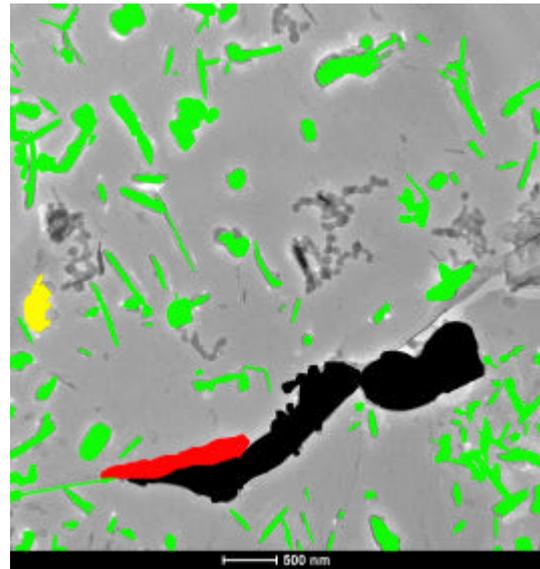


(b)

Figura 54 – (a) Campo 4, bainita, da Figura 52 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos. Aparecem lamelas fragmentadas de $M_{23}C_6$ (preto), além de M_2C (verde), disperso na matriz, e M_6C (vermelho).



(a)



(b)

Figura 55 – (a) Campo 5, contorno de grão e ferrita, da Figura 52 – aço envelhecido por 2.000 horas a 575°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos. Na ferrita, predomina o M_2C (verde) e aparece apenas um precipitado M_7C_3 (amarelo). No contorno, há $M_{23}C_6$ (preto) e M_6C (vermelho) coalescidos.

Anexo III

Material envelhecido a 600°C

1.1 Ferrita-perlita – 100 horas

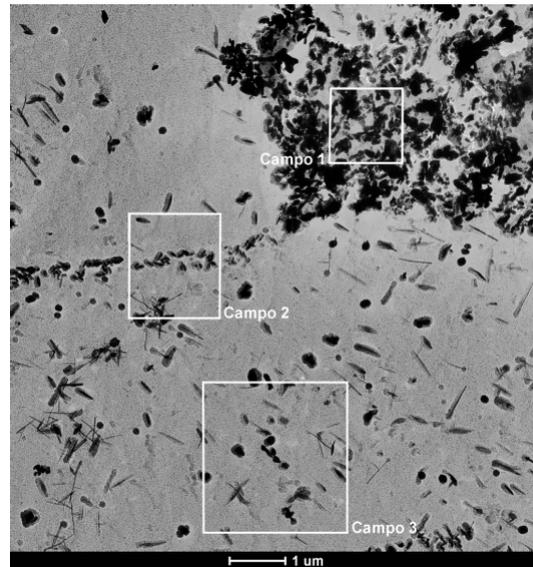


Figura 1 – Imagem da amostra perlítica, envelhecida por 100 horas a 600°C e com aumento de 5.000 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

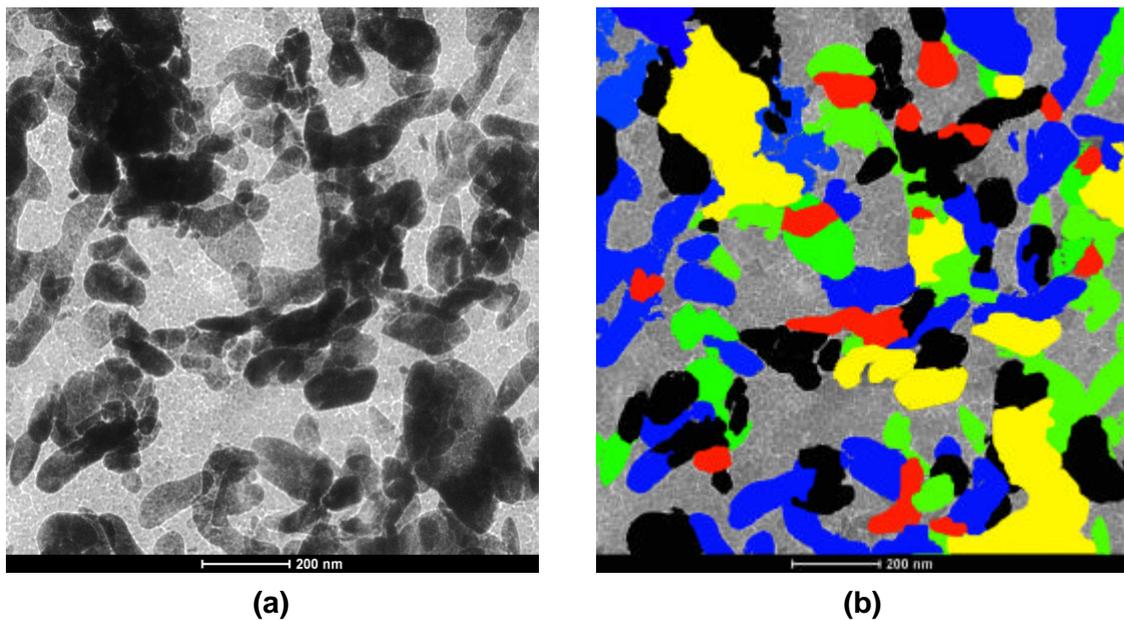


Figura 2 – Campo 1, perlítico, (a) da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 38.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Nota-se que, à exceção do M_7C_3 (amarelo), que aparece coalescido, há a presença de todos os tipos de carbonetos esperados – sem coalescimento – em quantidades e tamanhos equivalentes: M_2C (verde), M_3C (azul), $M_{23}C_6$ (preto) e M_6C (vermelho).

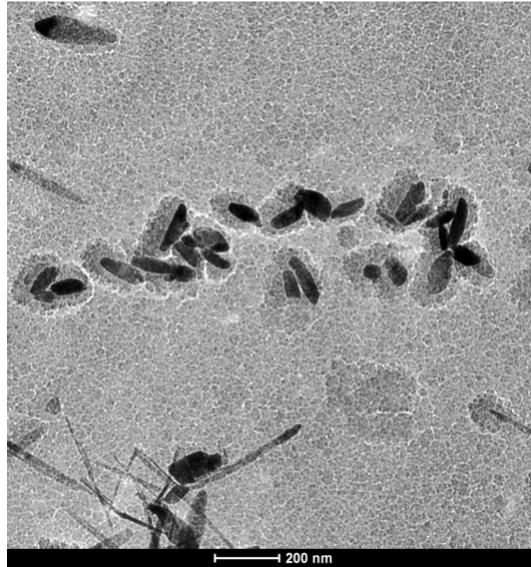


Figura 3 – Campo 2, ferrítico, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 29.000 X. Todos os precipitados na imagem são do tipo M_2C .

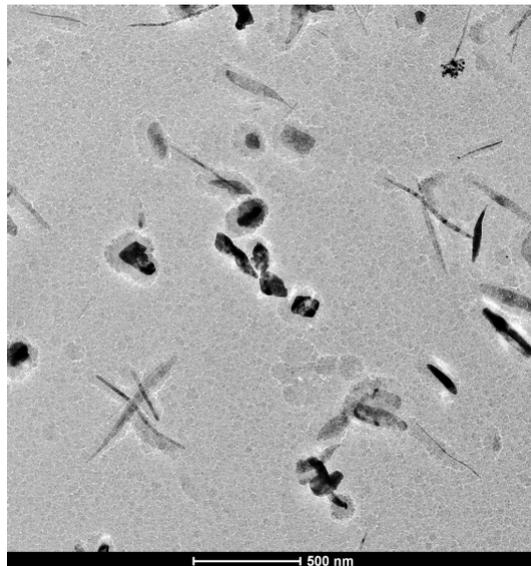


Figura 4 – Campo 3, ferrítico, da Figura 1 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 19.500 X. Todos os carbonetos presentes são do tipo M_2C .

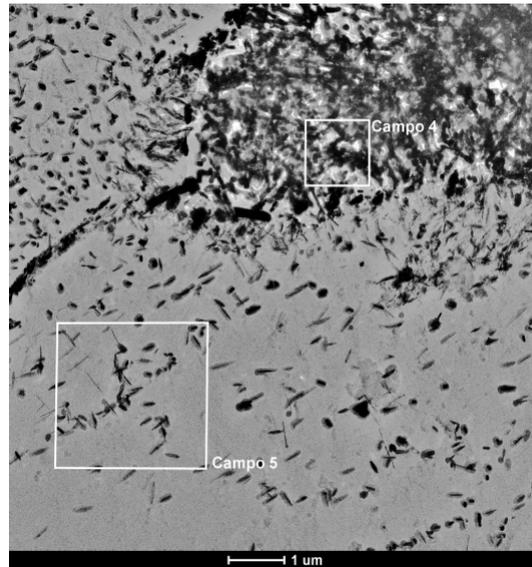
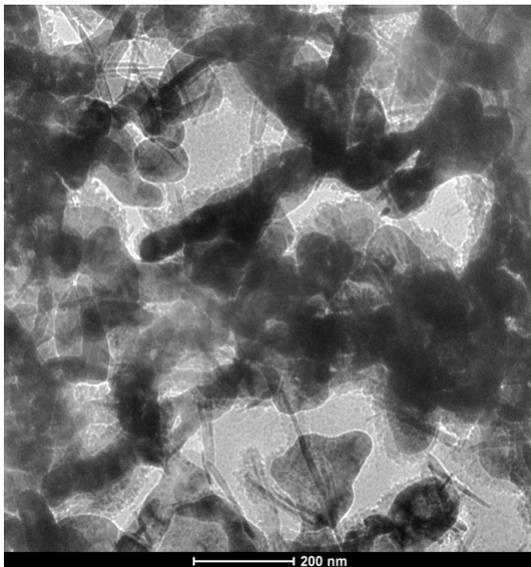
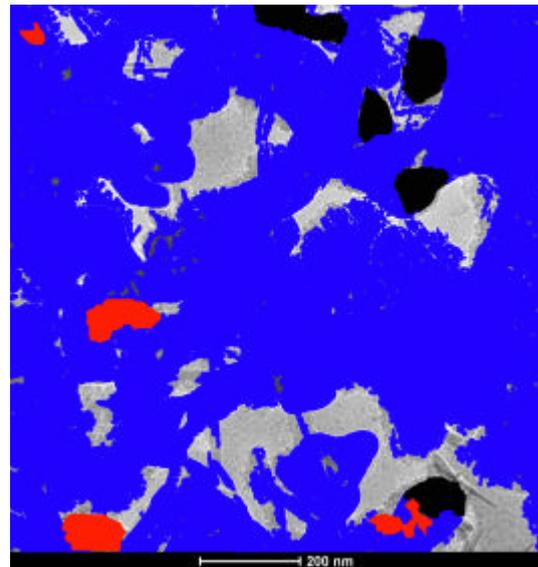


Figura 5 – Imagem da amostra perlítica, com aumento de 5.000 X, mostrando os campos 4 e 5.



(a)



(b)

Figura 6 – Campo 4, perlítico, (a) mostrado na Figura 5 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 43.000 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Há pequenas quantidades de $M_{23}C_6$ (preto) e de M_6C (vermelho), enquanto a maior parte dos precipitados é do tipo M_3C (azul).

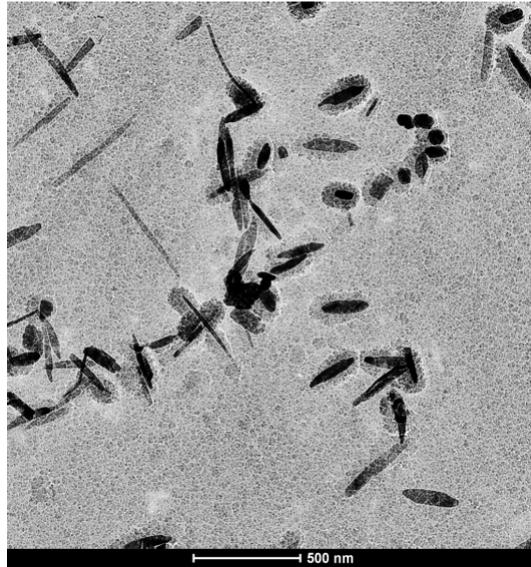


Figura 7 – Campo 5, ferrítico, mostrado na Figura 5 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 19.500 X. Todos os precipitados são do tipo M_2C .

1.2 Ferrita-perlita – 500 horas

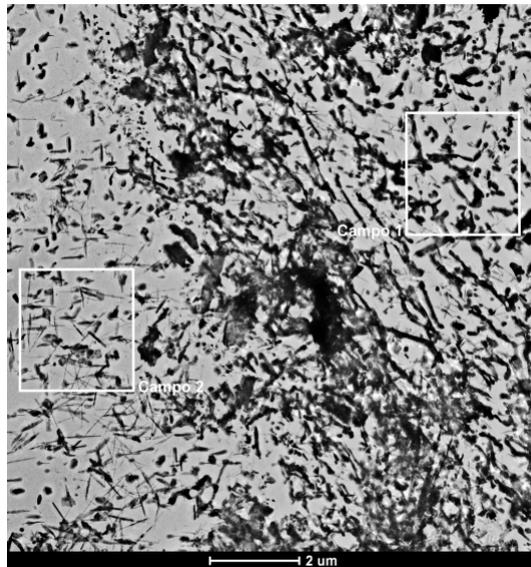
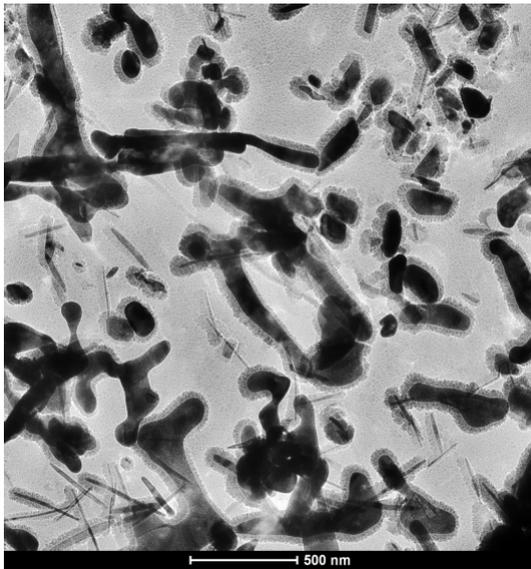
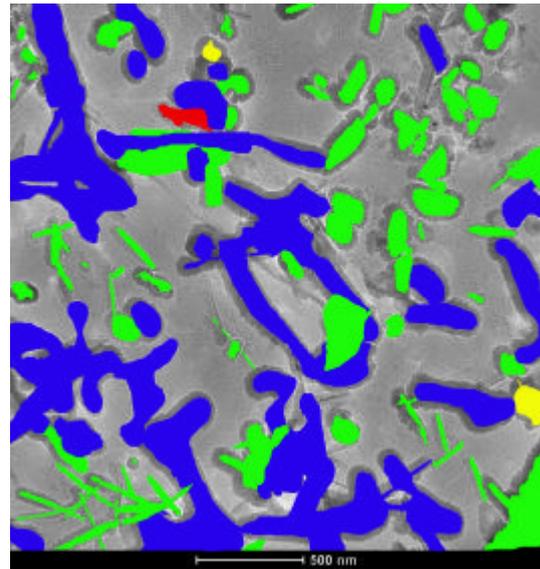


Figura 8 – Imagem da amostra perlítica, envelhecida por 500 horas a 600°C e com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1 e 2.

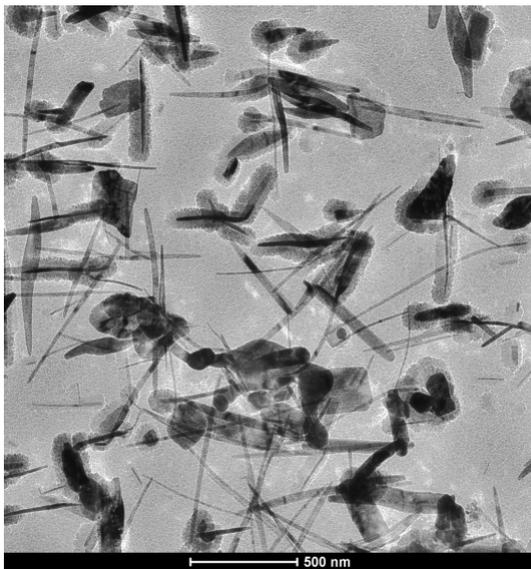


(a)

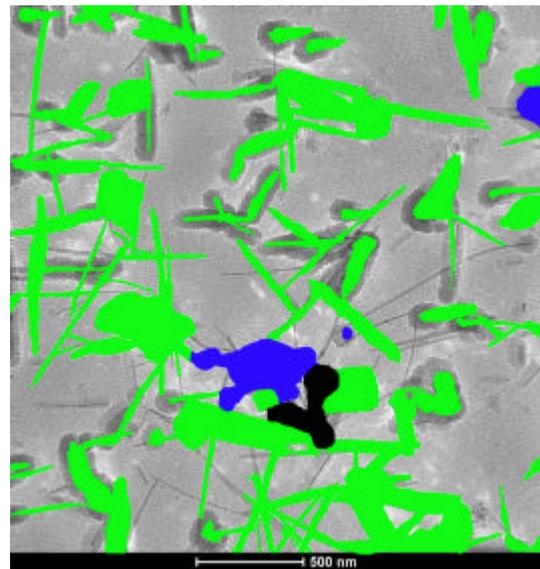


(b)

Figura 9 – Campo 1, perlita, (a) da Figura 8 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos carbonetos. Nota-se a presença de apenas um precipitado do tipo M_7C_3 (amarelo) e um M_6C (vermelho). A maioria dos carbonetos presentes é do tipo M_3C (azul) e M_2C (verde).



(a)



(b)

Figura 10 – (a) Campo 2, ferrítico, da Figura 8 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há maioria de M_2C (verde) e pequenas quantidades de M_3C (azul) e de $M_{23}C_6$ (preto).

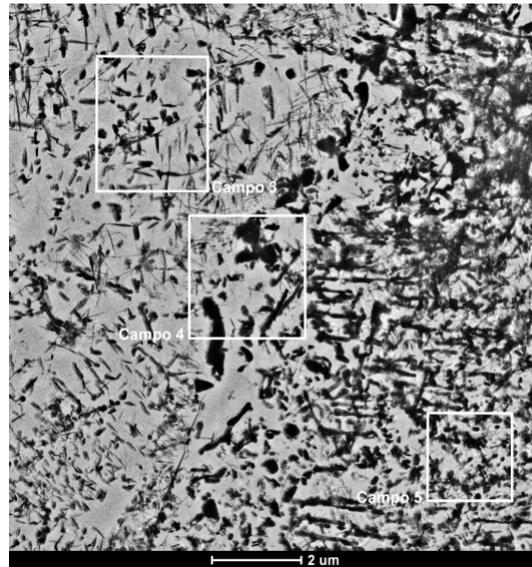
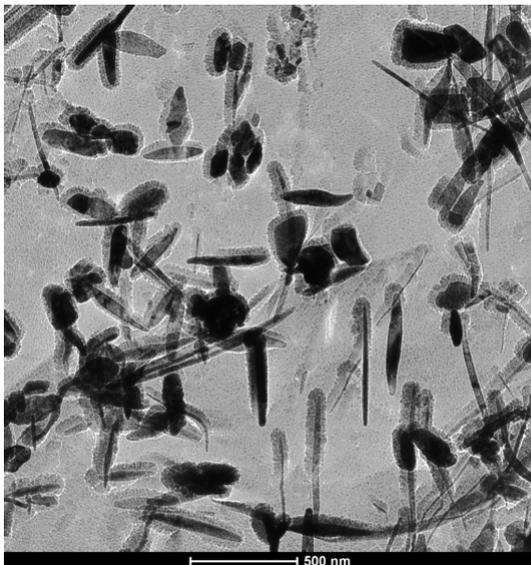
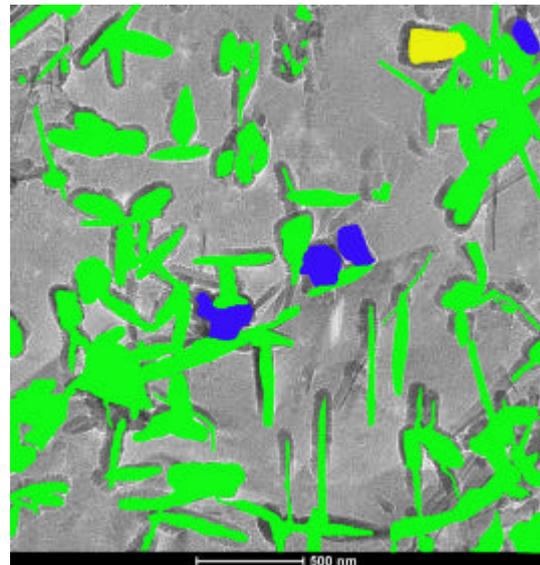


Figura 11 – Imagem da amostra perlítica, com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 3, 4 e 5.

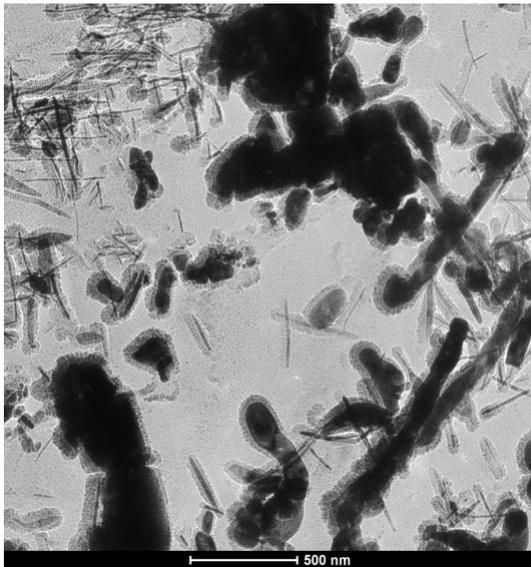


(a)

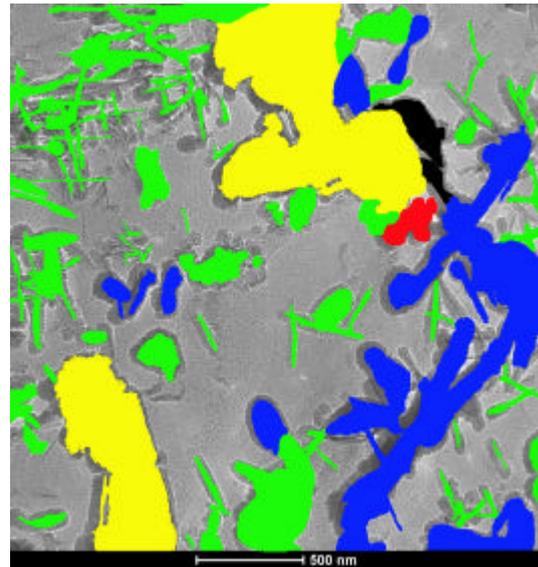


(b)

Figura 12 – (a) Campo 3, ferrita, da Figura 11 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados. Há maioria de carbonetos do tipo M_2C (verde) e pequenas quantidades de M_3C (azul) e de M_7C_3 (amarelo).

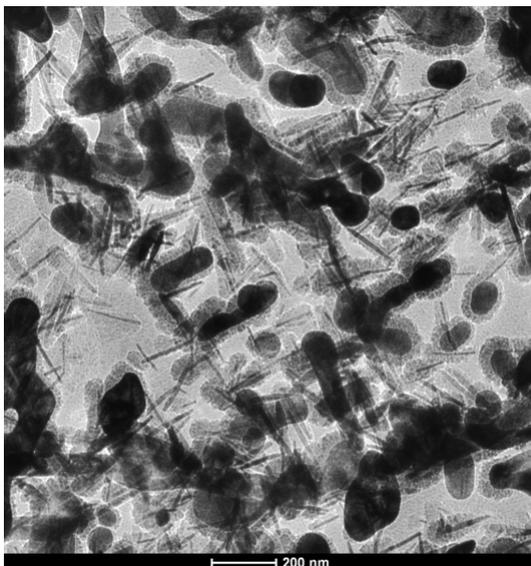


(a)

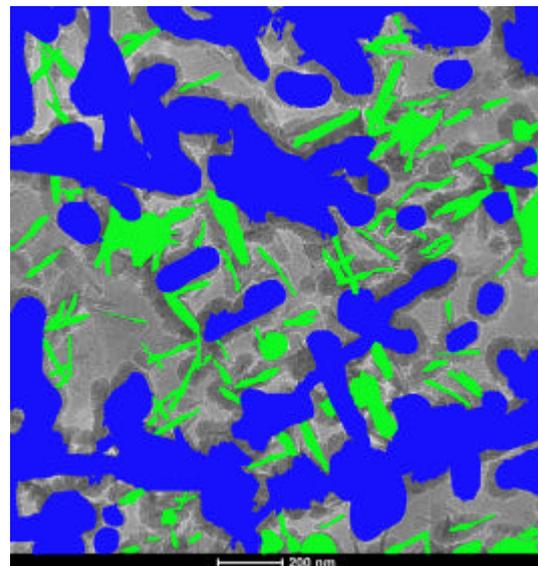


(b)

Figura 13 – Campo 4, contorno de grão, (a) mostrado na Figura 11 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Podem-se notar pequenas quantidades de M_6C (vermelho) e de $M_{23}C_6$ (preto). O M_7C_3 (amarelo) aparece bastante coalescido, enquanto o M_2C (verde) está disperso e em forma de emaranhados. Também está presente o M_3C (azul).



(a)



(b)

Figura 14 – (a) Campo 5, perlita, mostrado na Figura 11 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Aparecem apenas os do tipo M_2C (verde) e M_3C (azul), sendo que o último predomina.

1.3 Ferrita-perlita – 1.000 horas

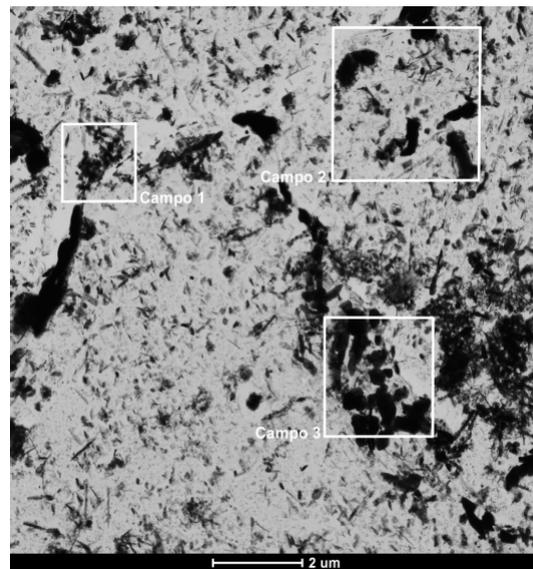


Figura 15 – Imagem da amostra perlítica, com aumento de 4.000 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

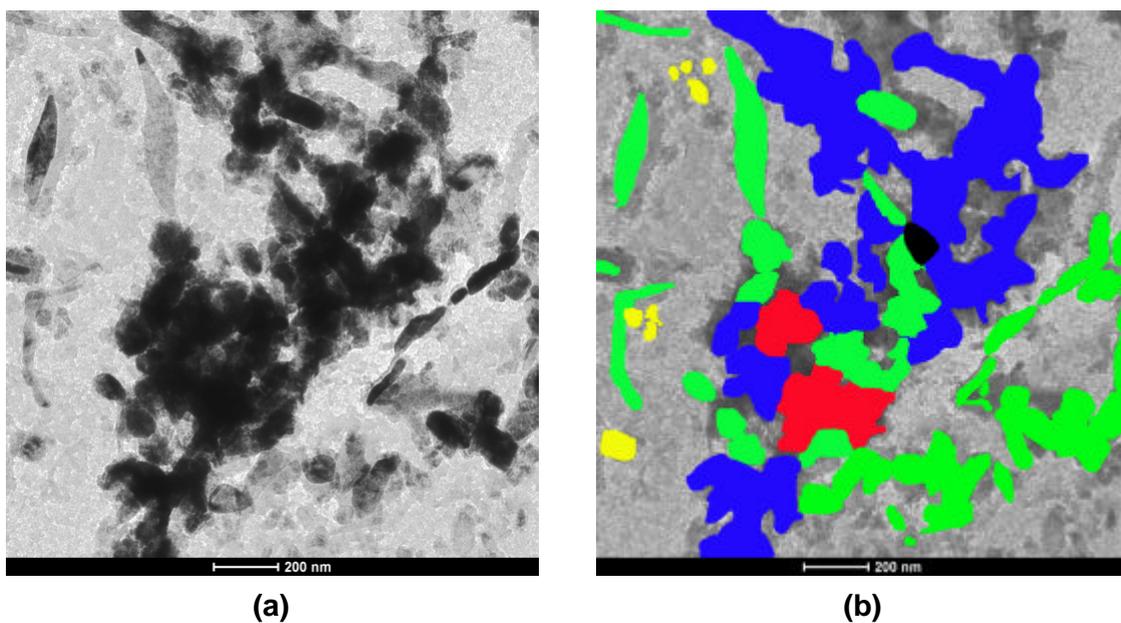
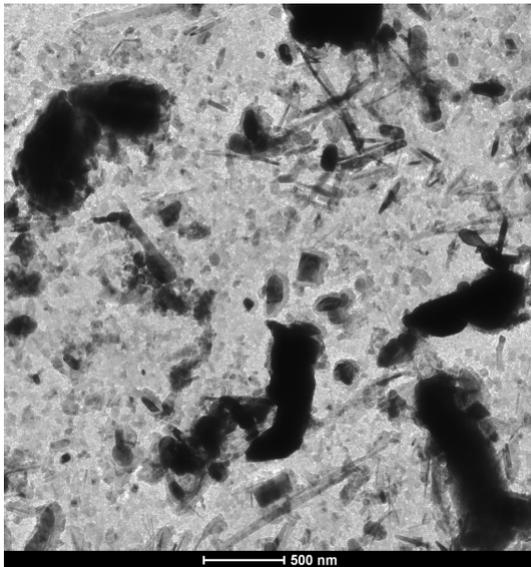
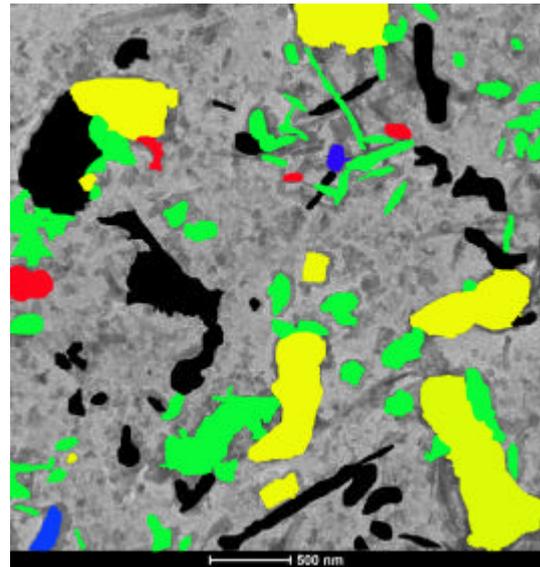


Figura 16 – (a) Campo 1, contorno de grão, mostrado na Figura 15 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Aparecem os precipitados M_2C (verde) e M_3C (azul), que predominam, além de pouca quantidade de M_7C_3 (amarelo) e de M_6C (vermelho).

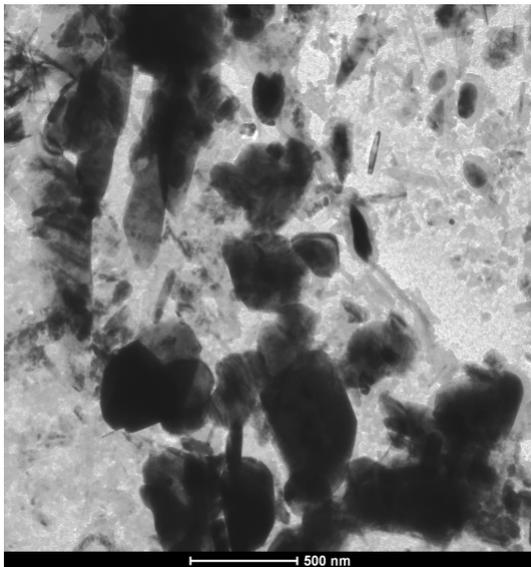


(a)

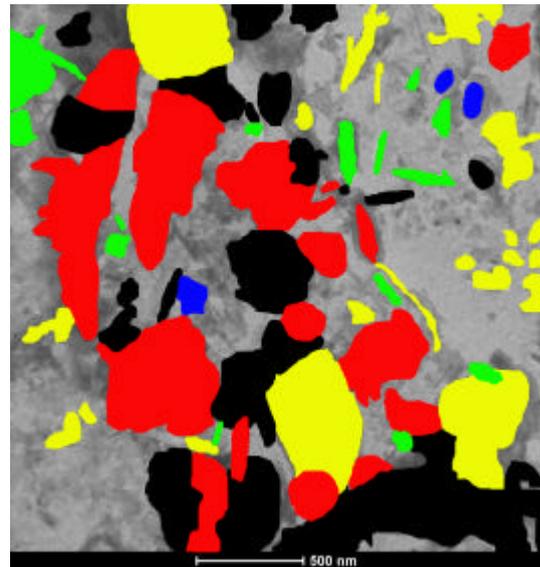


(b)

Figura 17 – (a) Campo 2, contorno de grão e ferrita, mostrado na Figura 15 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Nota-se a presença de $M_{23}C_6$ (preto) e de M_7C_3 (amarelo), coalescidos, e M_2C (verde), disperso na matriz. Além deles, há pequenas quantidades de M_3C (azul) e de M_6C (vermelho).



(a)



(b)

Figura 18 – (a) Campo 3, contorno de grão e perlita, mostrado na Figura 15 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C – e com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos carbonetos. Notam-se pequenas quantidades de M_3C (azul) e de M_2C (verde). Em quantidades equivalentes, aparecem o M_7C_3 (amarelo), o $M_{23}C_6$ (preto) e o M_6C (vermelho), todos coalescidos.

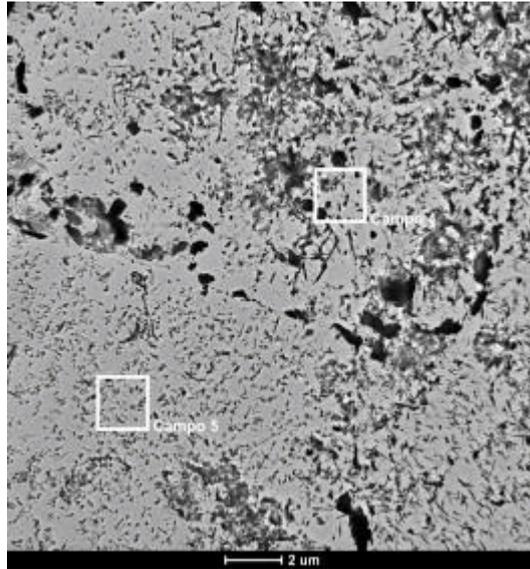


Figura 19 – Imagem da amostra perlítica, com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5.

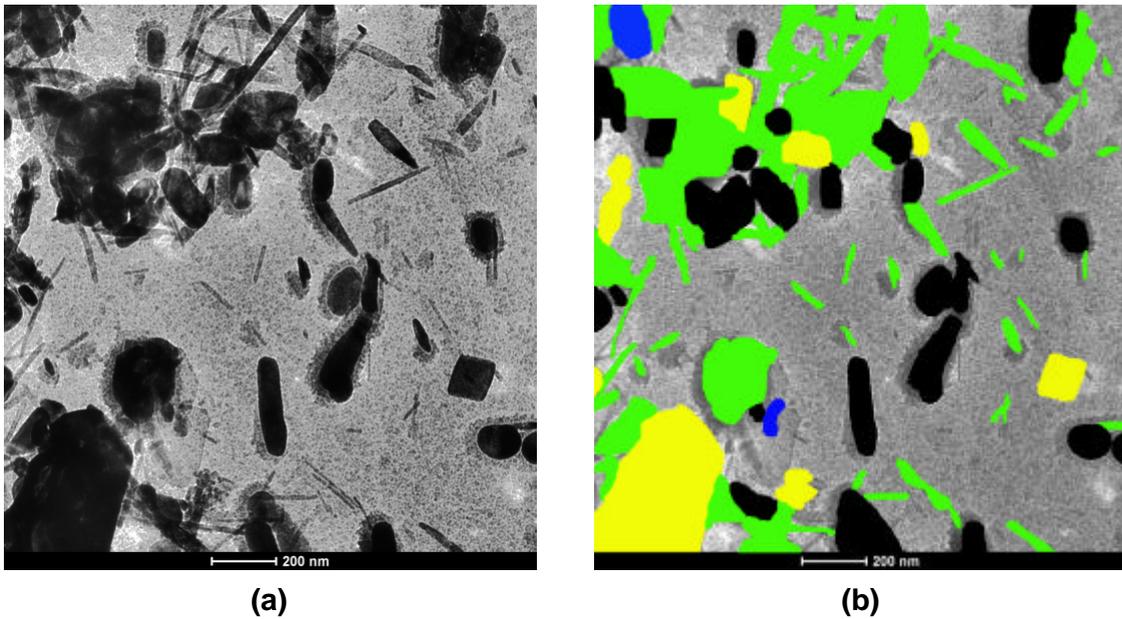


Figura 20 – (a) Campo 4, perlita, mostrado na Figura 19 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C – e com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há pequenas quantidades de M_3C (azul). Além dele, estão presentes os precipitados do tipo M_2C (verde), em forma de aglomerados e dispersos na matriz, $M_{23}C_6$ (preto) e M_7C_3 (amarelo), que aparece em forma de blocos, sendo um deles bastante coalescido.

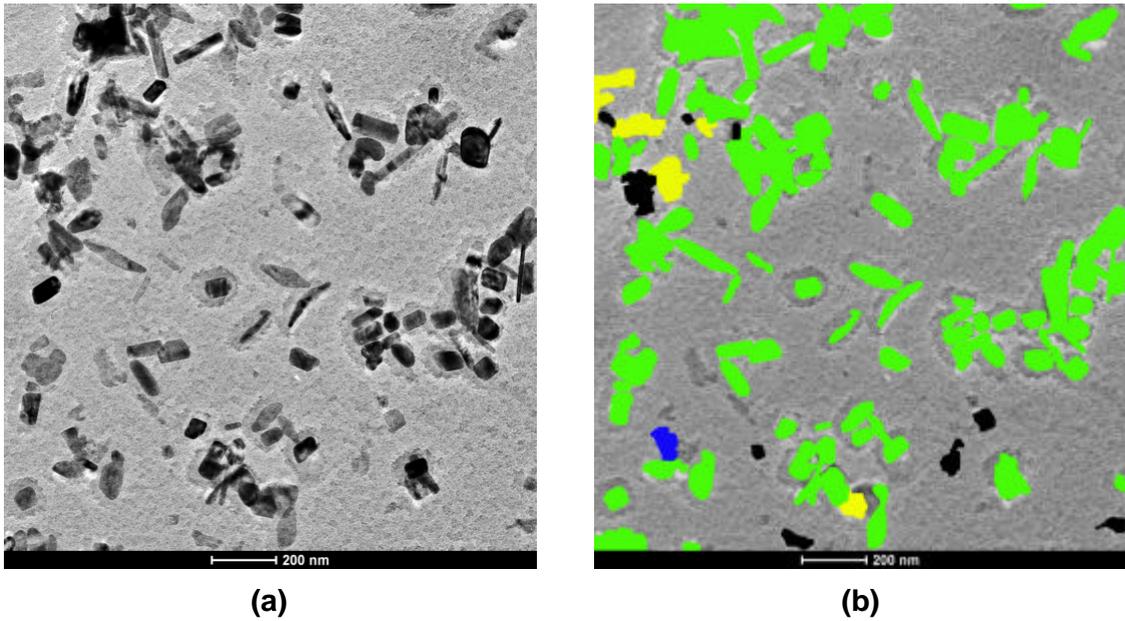


Figura 21 – (a) Campo 5, ferrita, mostrado na Figura 19 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C – e com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há pequenas quantidades de M_6C (azul), de M_7C_3 (amarelo) e de $M_{23}C_6$ (preto). Predominam os precipitados do tipo M_2C (verde).

1.4 Ferrita-perlita – 2.000 horas

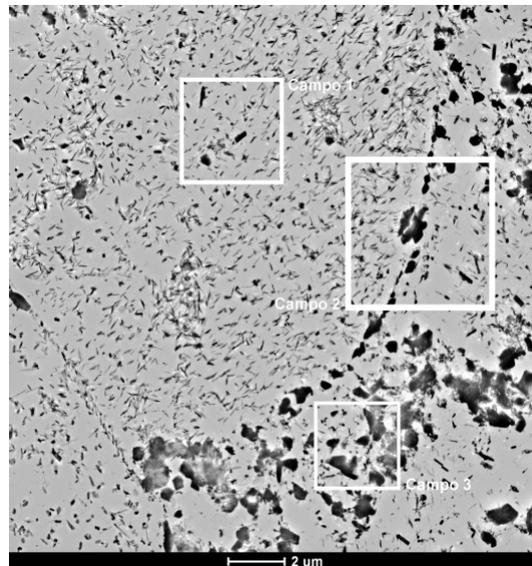
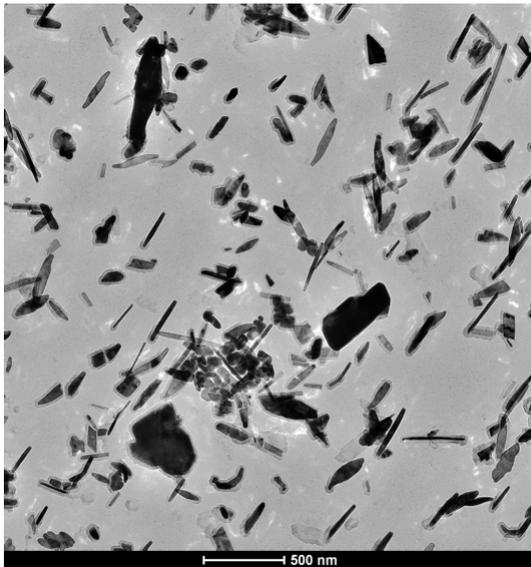
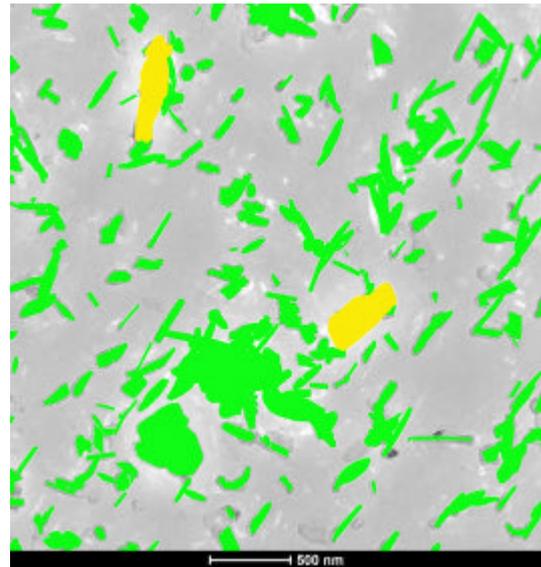


Figura 22 – Imagem da amostra perlítica, envelhecida a 600°C por 2.000 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 1, 2 e 3.

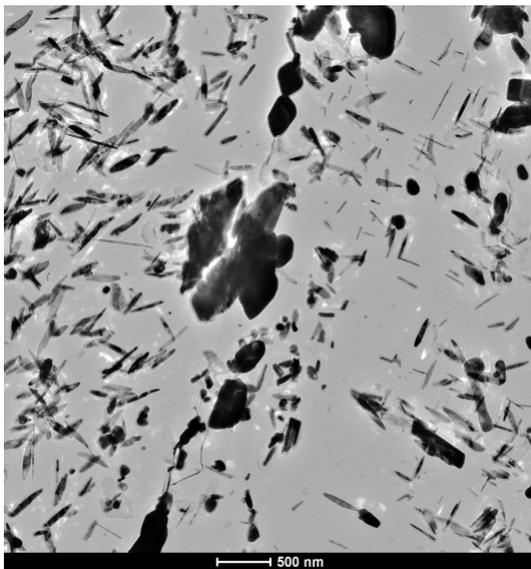


(a)

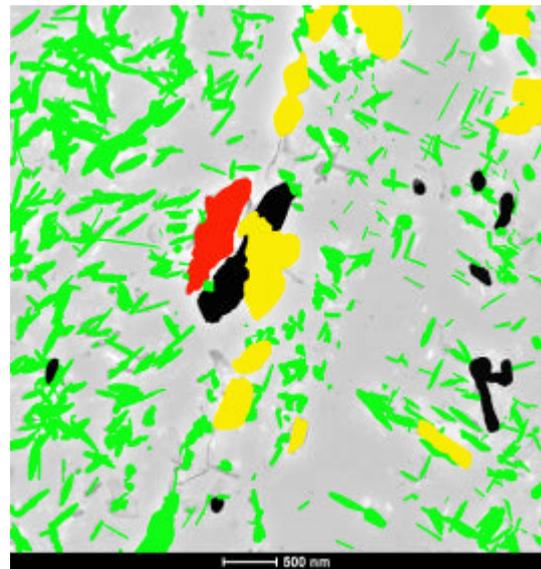


(b)

Figura 23 – (a) Campo 1, ferrita, mostrado na Figura 22 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há apenas dois precipitados do tipo M_7C_3 (amarelo) e maioria de M_2C (verde), que aparece disperso, em forma de emaranhados e em forma de blocos.



(a)



(b)

Figura 24 – (a) Campo 2, contorno de grão, mostrado na Figura 22 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos carbonetos. No grão ferrítico, há apenas um $M_{23}C_6$ (preto), enquanto todos os outros são M_2C (verde); no grão perlítico, há mais $M_{23}C_6$, além de M_7C_3 (amarelo) e M_2C disperso; no contorno de grão, o M_2C também aparece, mas estão presentes o $M_{23}C_6$, o M_7C_3 e o M_6C (vermelho), todos coalescidos.

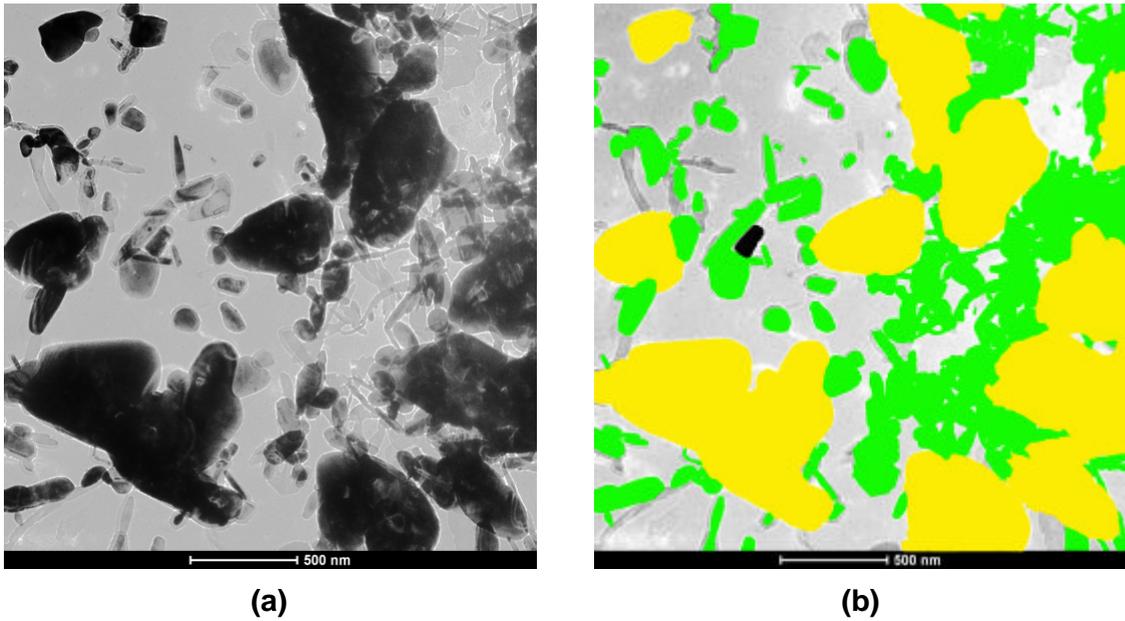


Figura 25 – (a) Campo 3, perlita degradada, da Figura 22 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos carbonetos. Está presente apenas um precipitado do tipo $M_{23}C_6$ (preto). Além dele, aparecem vários do tipo M_7C_3 (amarelo), coalescido, e M_2C (verde), em forma de blocos e emaranhados.

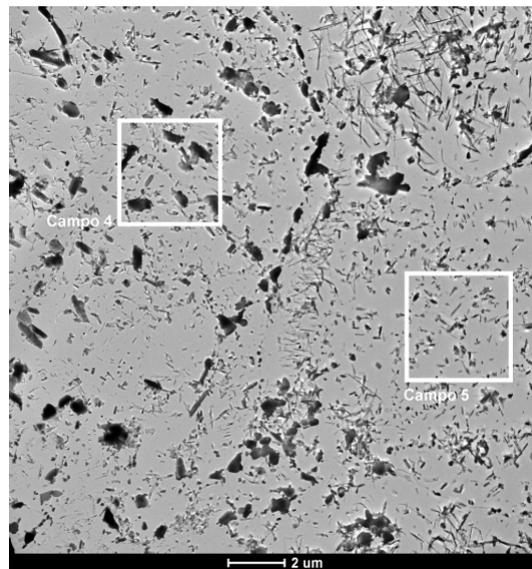
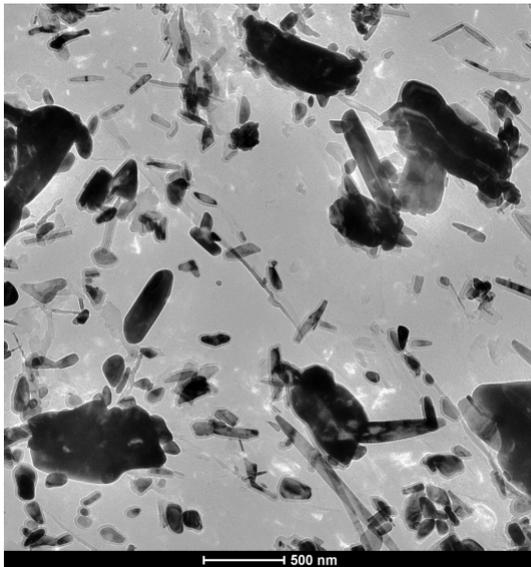
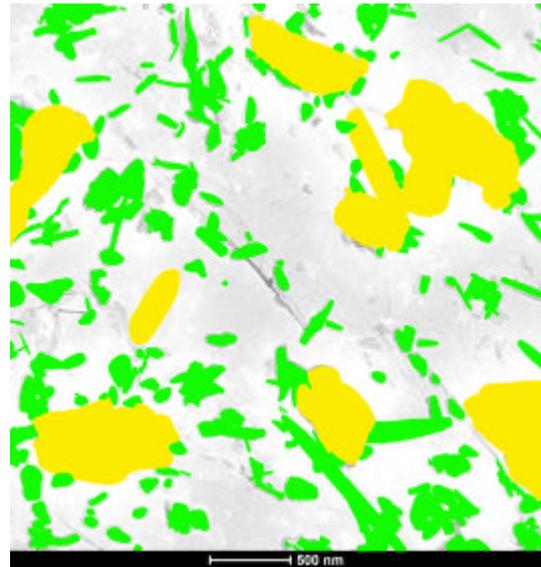


Figura 26 – Imagem da amostra perlítica, envelhecida a 600°C por 2.000 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5.



(a)



(b)

Figura 27 – (a) Campo 4, perlita degradada, da Figura 24 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Aparecem apenas precipitados do tipo M_7C_3 (amarelo), coalescido, e M_2C (verde), em forma de emaranhados.

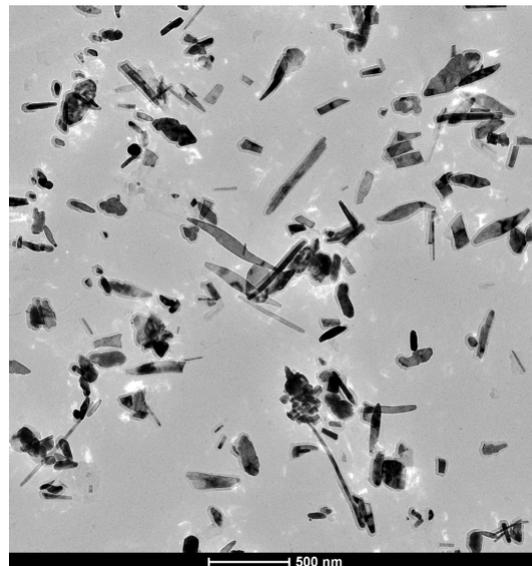


Figura 28 – Campo 5, ferrítico, da Figura 24 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 15.000 X. Todos os precipitados presentes são do tipo M_2C .

2.1 Bainita – 100 horas

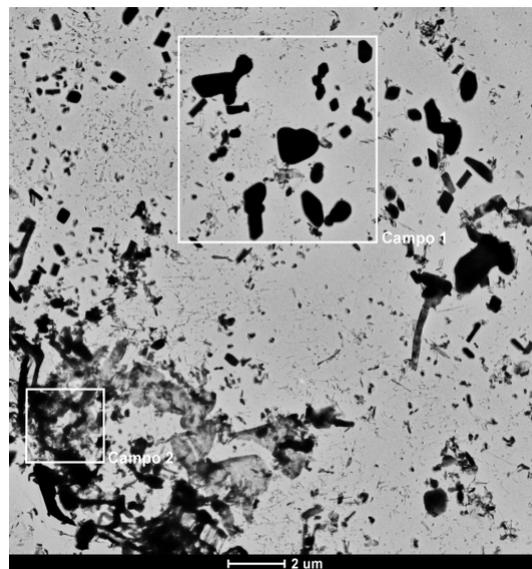


Figura 29 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 600°C por 100 horas e com aumento de 2.250 vezes. Podem-se notar os campos 1 e 2, mostrados a seguir.

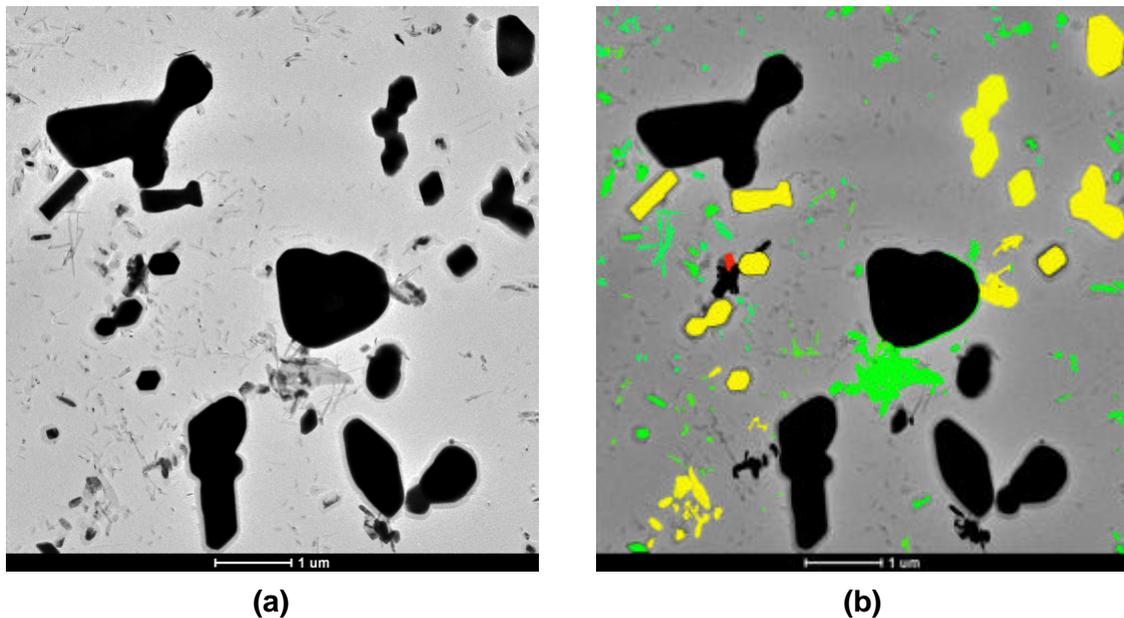


Figura 30 – (a) Campo 1, contorno de grão, mostrado na Figura 29 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 7.000 X, e a identificação dos precipitados (b). Pode-se observar que o $M_{23}C_6$ (preto) se encontra coalescido e aparece em grandes quantidades. O M_7C_3 (amarelo) aparece menor e mais disperso, enquanto o M_2C (verde) se mostra pequeno e disperso na matriz. Nota-se também um pequeno M_6C (vermelho).

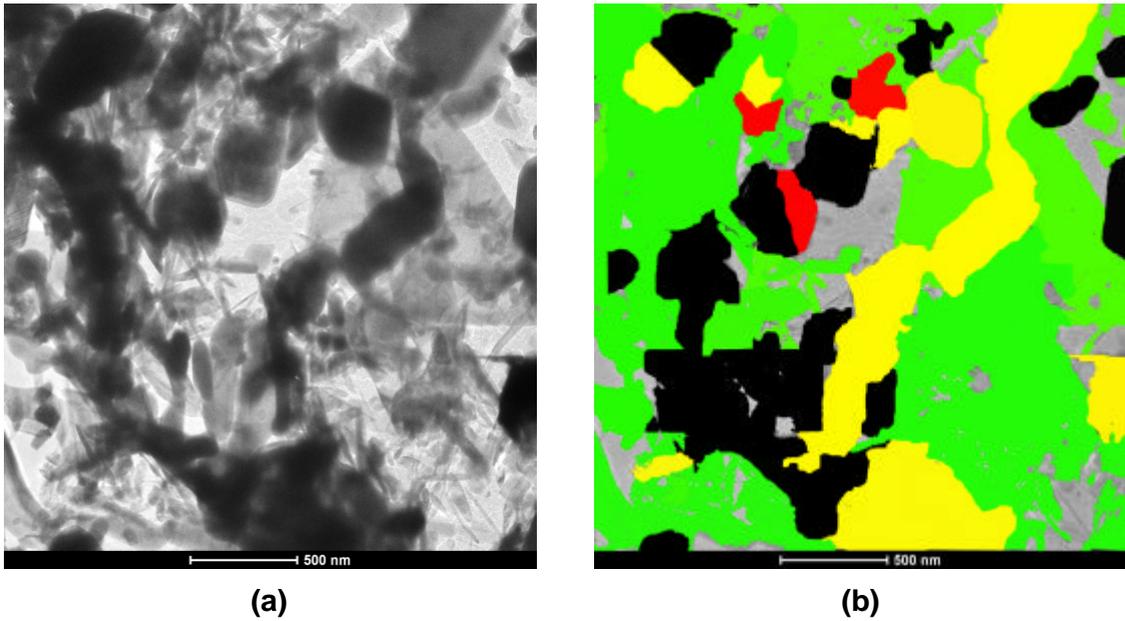


Figura 31 – (a) Campo 2, bainita, apresentado na Figura 29 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 19.500 X, e (b) identificação dos precipitados. Há grandes emaranhados de M_2C (verde), $M_{23}C_6$ (preto), emaranhado e coalescido, M_7C_3 (amarelo) e pequena quantidade de M_6C (vermelho).

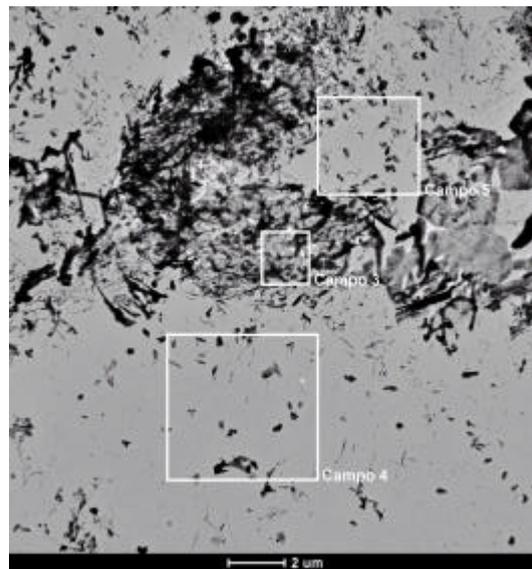
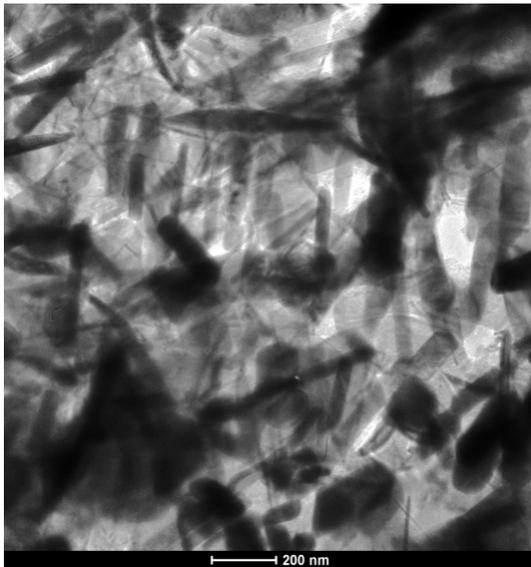
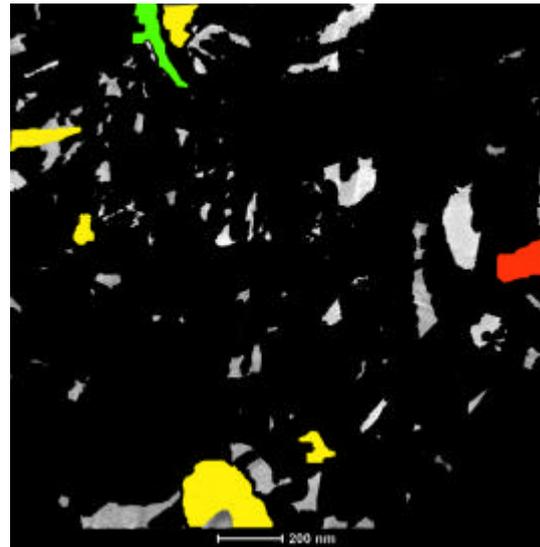


Figura 32 – Imagem da amostra bainítica envelhecida a 600°C por 100 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 3, 4 e 5.

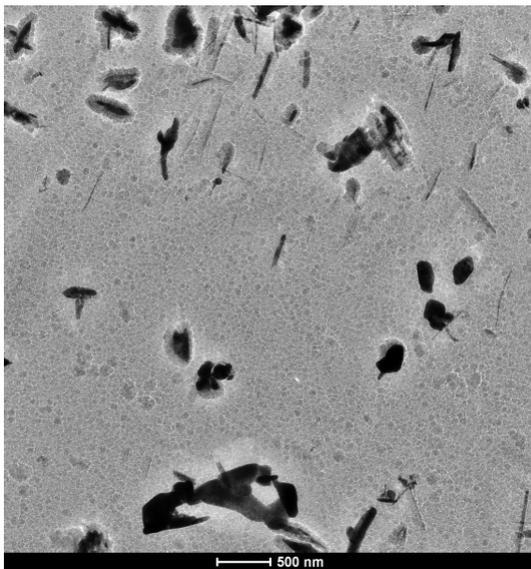


(a)

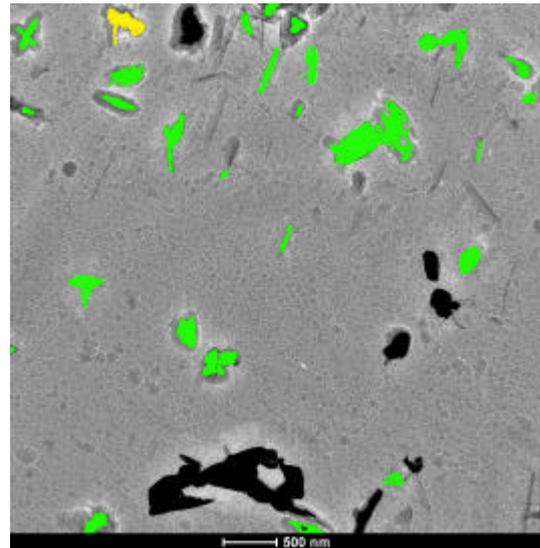


(b)

Figura 33 – (a) Campo 3, bainita, da Figura 32 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Notam-se pequenas quantidades dos precipitados do tipo M_2C (verde), M_7C_3 (amarelo) e M_6C (vermelho) e uma grande quantidade de $M_{23}C_6$ (preto).



(a)



(b)

Figura 34 – (a) Campo 4, ferrita, da Figura 32 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 10.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Está presente uma pequena quantidade de M_7C_3 (amarelo), alguns precipitados do tipo $M_{23}C_6$ (preto) coalescidos e M_2C (verde) tanto dispersos quanto na forma de emaranhados.

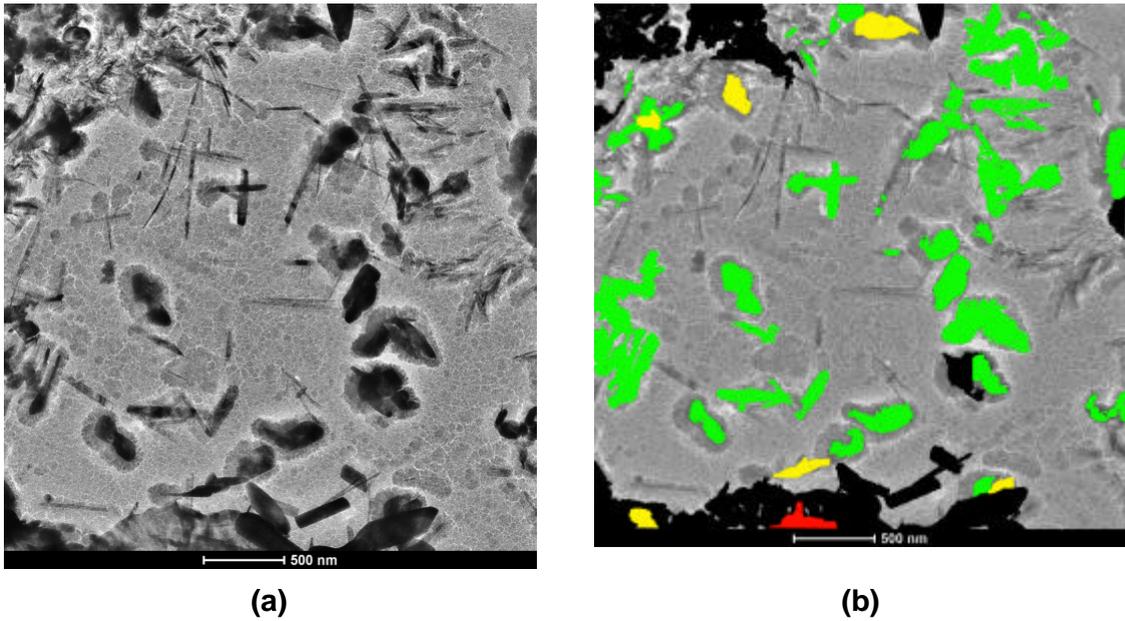


Figura 35 – (a) Campo 5, ferrita, da Figura 32 – aço envelhecido por 100 horas a 600°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Está presente apenas um carboneto do tipo M_6C (vermelho), além de M_7C_3 (amarelo) em pouca quantidade, $M_{23}C_6$ (preto) e maioria de M_2C (verde), tanto dispersos quanto na forma de emaranhados.

2.2 Bainita – 500 horas

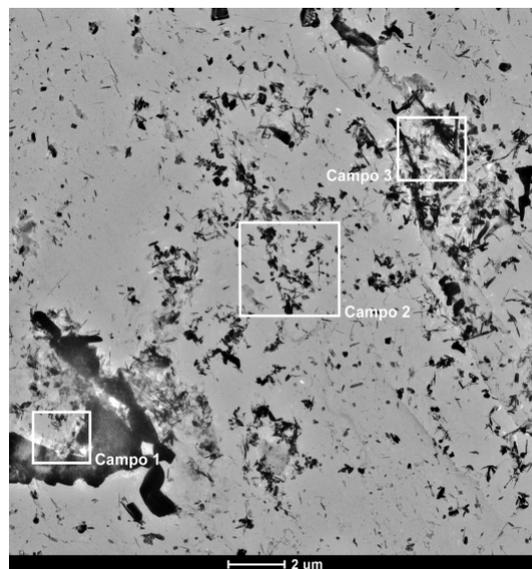
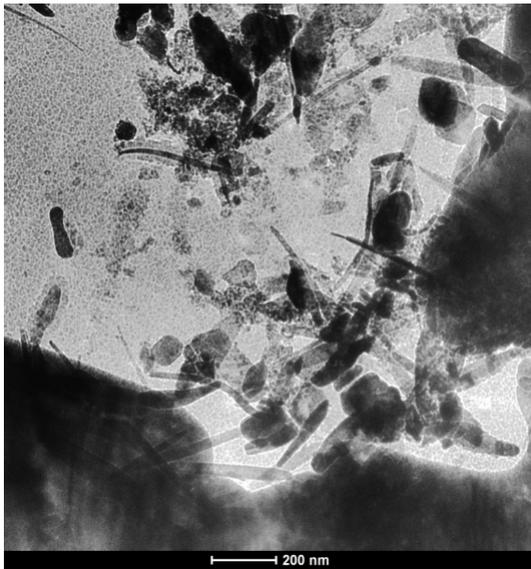
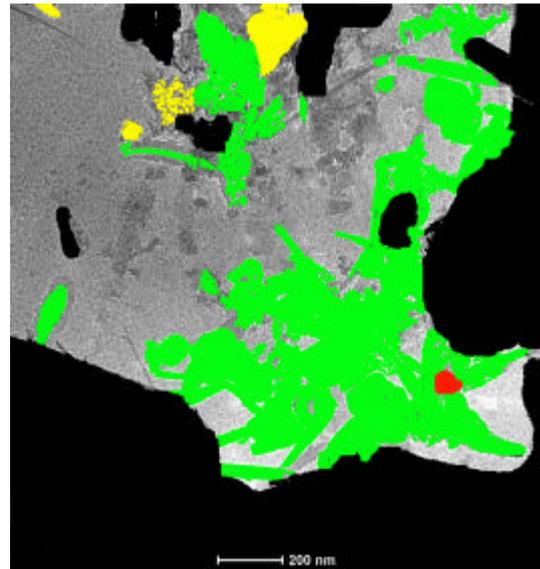


Figura 36 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 600°C por 500 horas e com aumento de 2.250 vezes, mostrando os campos 1, 2 e 3.

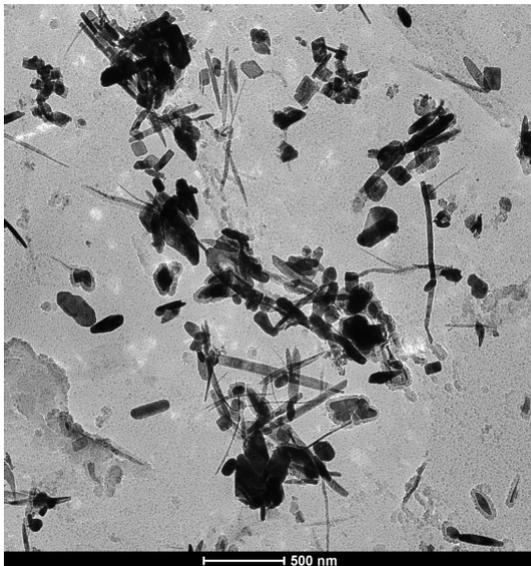


(a)

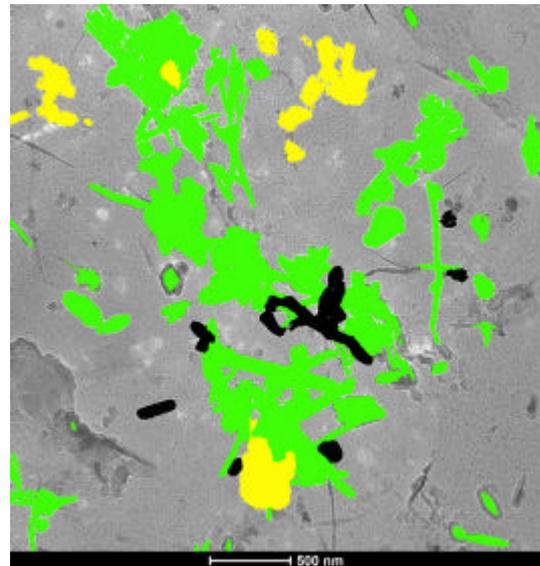


(b)

Figura 37 – (a) Campo 1, bainita, mostrado na Figura 36 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C –, com aumento de 29.000 X, e a identificação dos precipitados (b). Pode-se observar que o $M_{23}C_6$ (preto) se encontra coalescido e aparece em grandes quantidades. O M_7C_3 (amarelo) aparece menor e mais disperso, enquanto o M_2C (verde) se mostra pequeno e disperso na matriz. Nota-se também um pequeno M_6C (vermelho) em meio a um emaranhado de M_2C .



(a)



(b)

Figura 38 – (a) Campo 2, ferrita, apresentado na Figura 36 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C – e com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há pouca quantidade de $M_{23}C_6$ (preto). Além dele, há grandes emaranhados de M_2C (verde) e de M_7C_3 (amarelo).

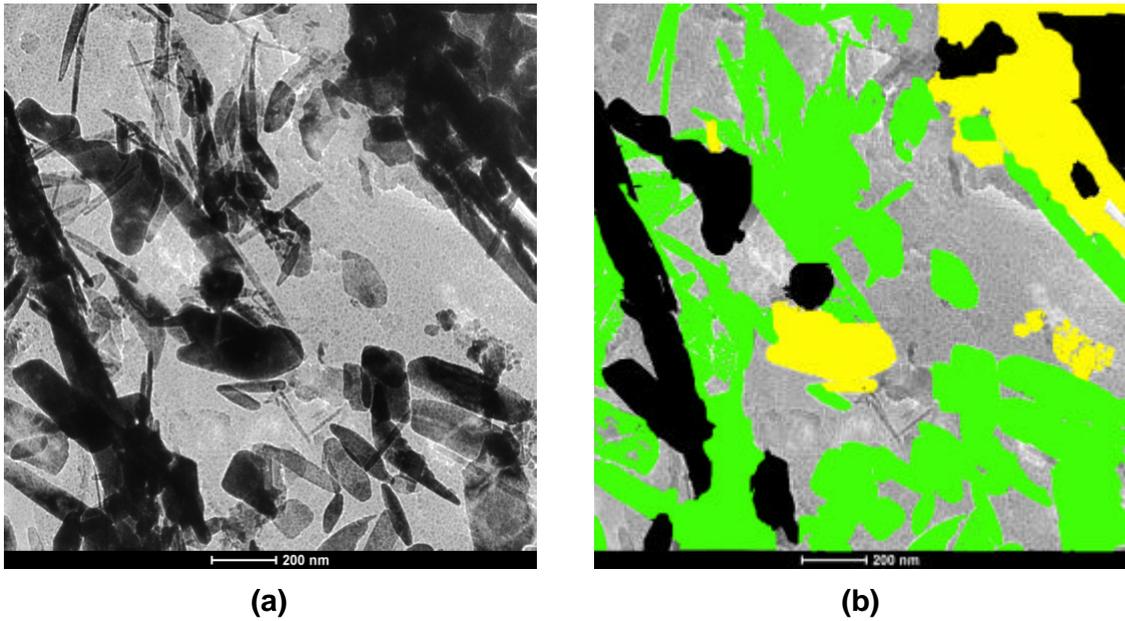


Figura 39 – (a) Campo 3, bainita, da Figura 36 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos carbonetos presentes. Há uma maioria de precipitados do tipo M_2C (verde), além de M_7C_3 (amarelo) e de $M_{23}C_6$ (preto).

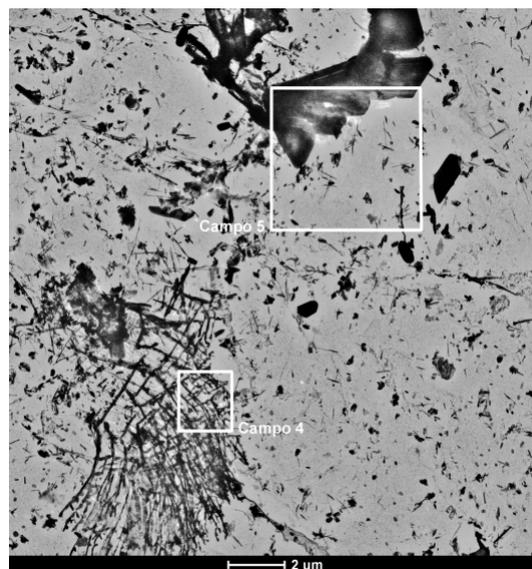
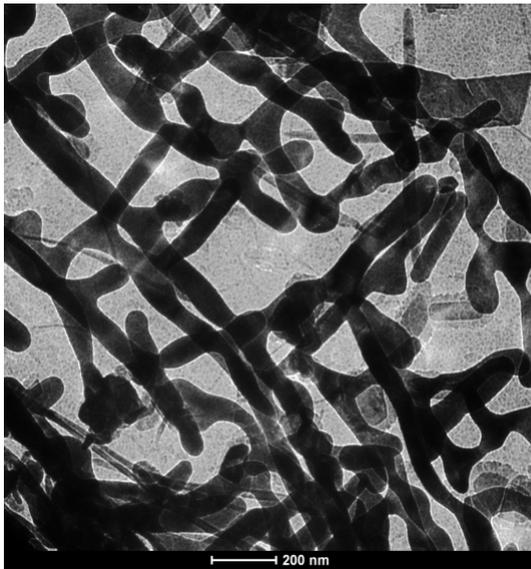
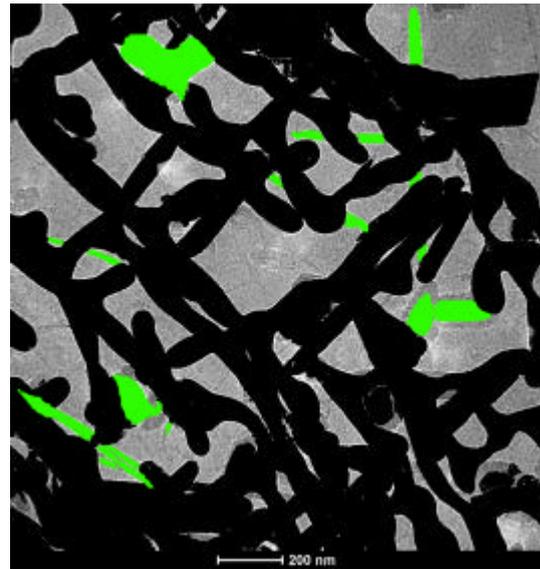


Figura 40 – Imagem da amostra bainítica envelhecida a 600°C por 500 horas e com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 4 e 5.

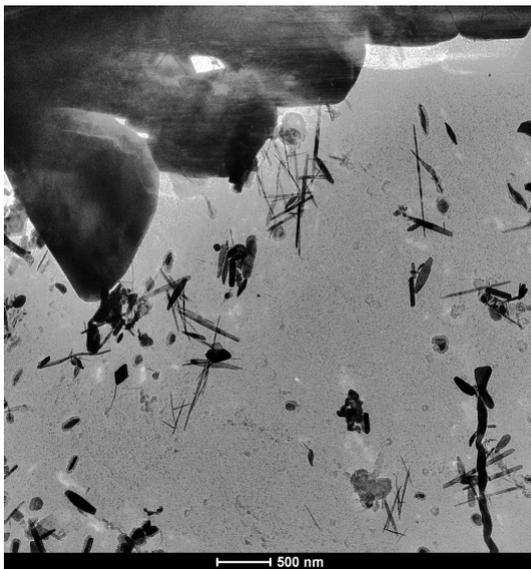


(a)

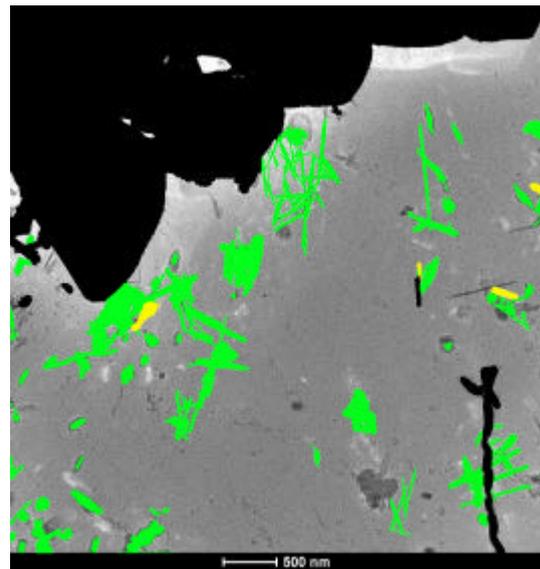


(b)

Figura 41 – (a) Campo 4, bainita, da Figura 40 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos carbonetos. Há uma maioria de precipitados do tipo $M_{23}C_6$ (preto) e pouca quantidade de M_2C (verde).



(a)



(b)

Figura 42 – (a) Campo 5, contorno de grão, da Figura 40 – aço envelhecido por 500 horas a 600°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos precipitados. Aparece pequena quantidade de M_7C_3 (amarelo), $M_{23}C_6$ (preto), muito coalescido e também disperso na matriz, além de M_2C (verde), tanto dispersos quanto na forma de emaranhados.

2.3 Bainita – 1.000 horas

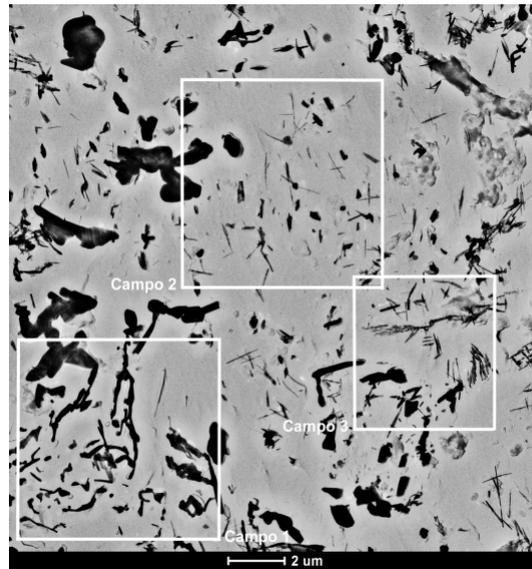


Figura 43 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 600°C por 1.000 horas e com aumento de 2.250 vezes, mostrando os campos 1, 2 e 3.

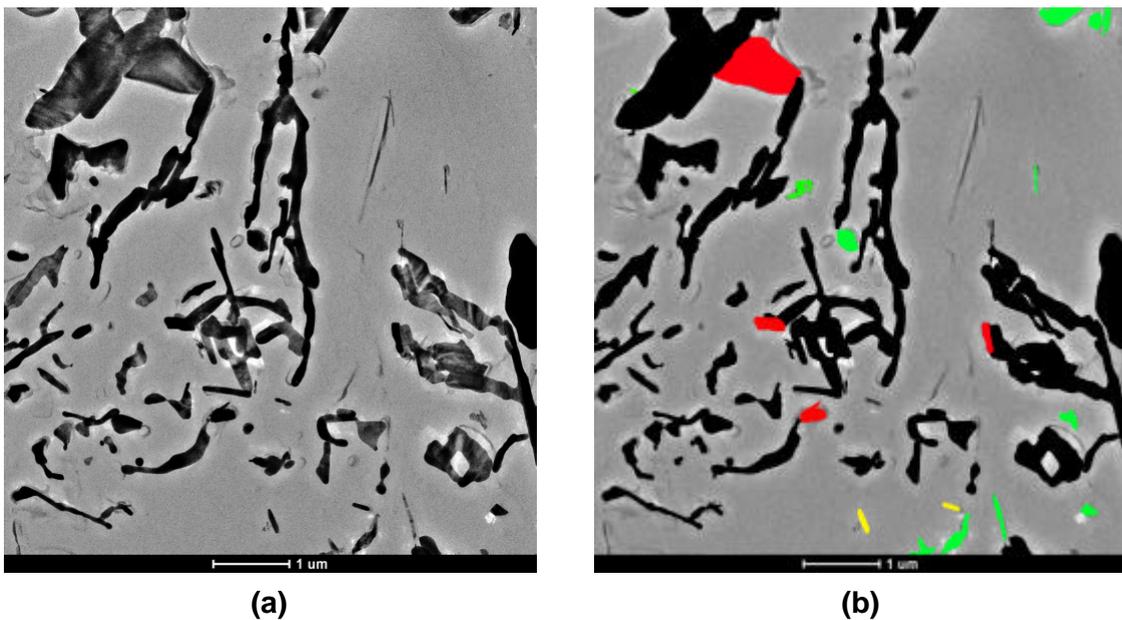
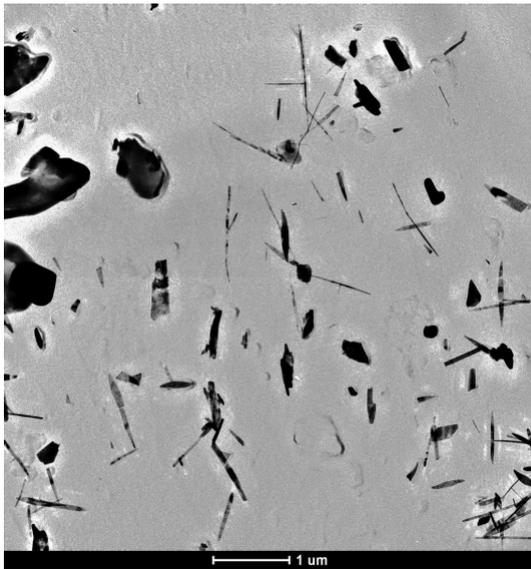
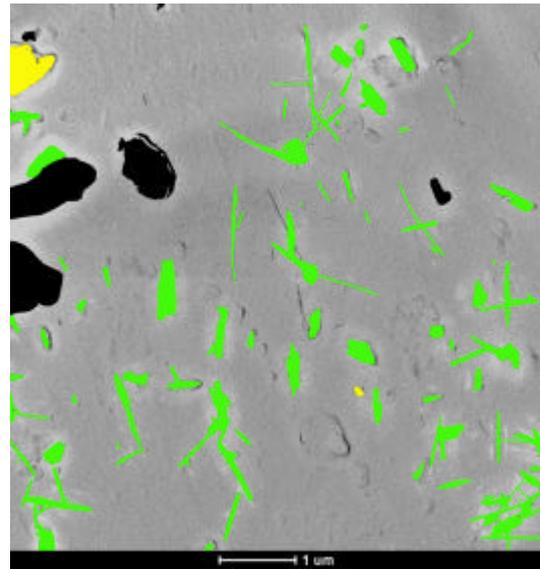


Figura 44 – (a) Campo 1, bainita, da Figura 43 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C –, com aumento de 7.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há poucas quantidades de M₂C (verde) e de M₇C₃ (amarelo). Podem-se notar as lamelas de M₂₃C₆ (preto) fragmentadas em comparação com as condições anteriores, além de aumento na quantidade de M₆C (vermelho).

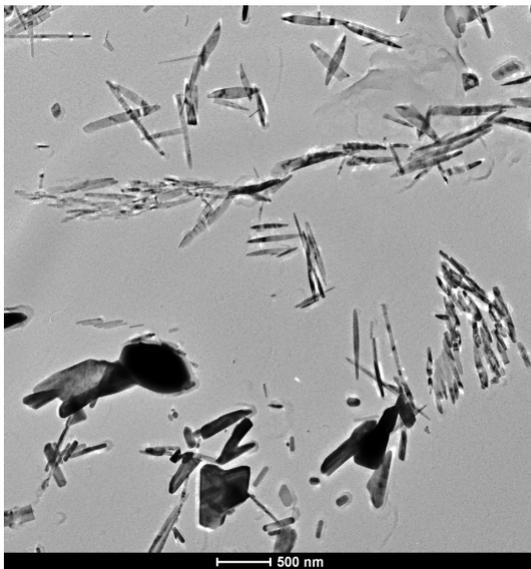


(a)

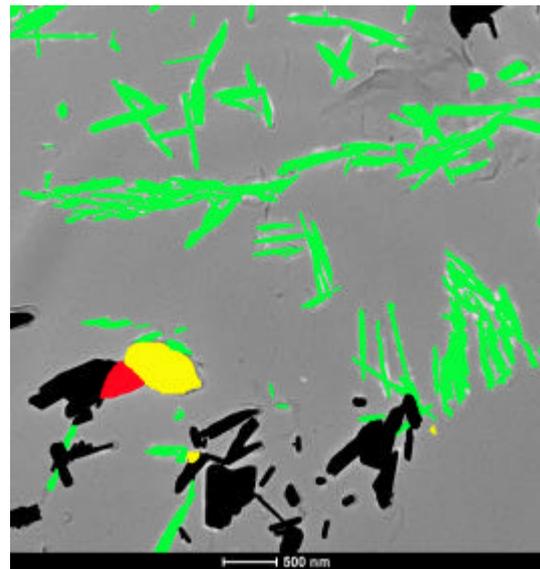


(b)

Figura 45 – (a) Campo 2, ferrita, da Figura 43 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C –, com aumento de 7.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há maioria de M_2C (verde), além de M_7C_3 (amarelo) e de $M_{23}C_6$ (preto) em forma de blocos coalescidos.



(a)



(b)

Figura 46 – (a) Campo 3, bainita, da Figura 43 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos precipitados. Há maioria de M_2C (verde), em forma de aglomerados e dispersos na matriz, além de M_7C_3 (amarelo), de $M_{23}C_6$ (preto) e de M_6C (vermelho).

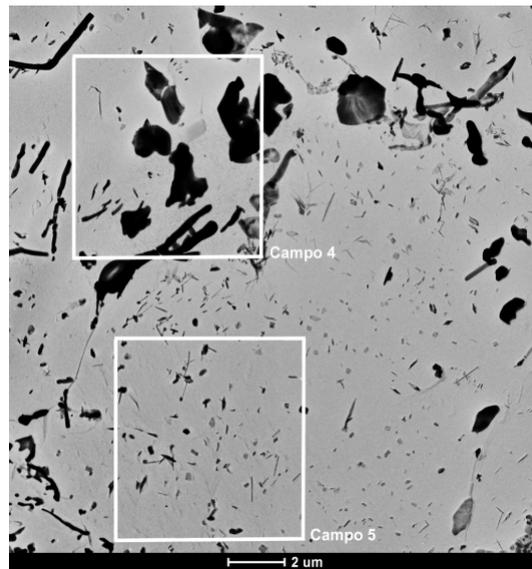


Figura 47 – Imagem da amostra bainítica, envelhecida a 600°C por 1.000 horas e com aumento de 2.250 vezes, mostrando os campos 4 e 5.

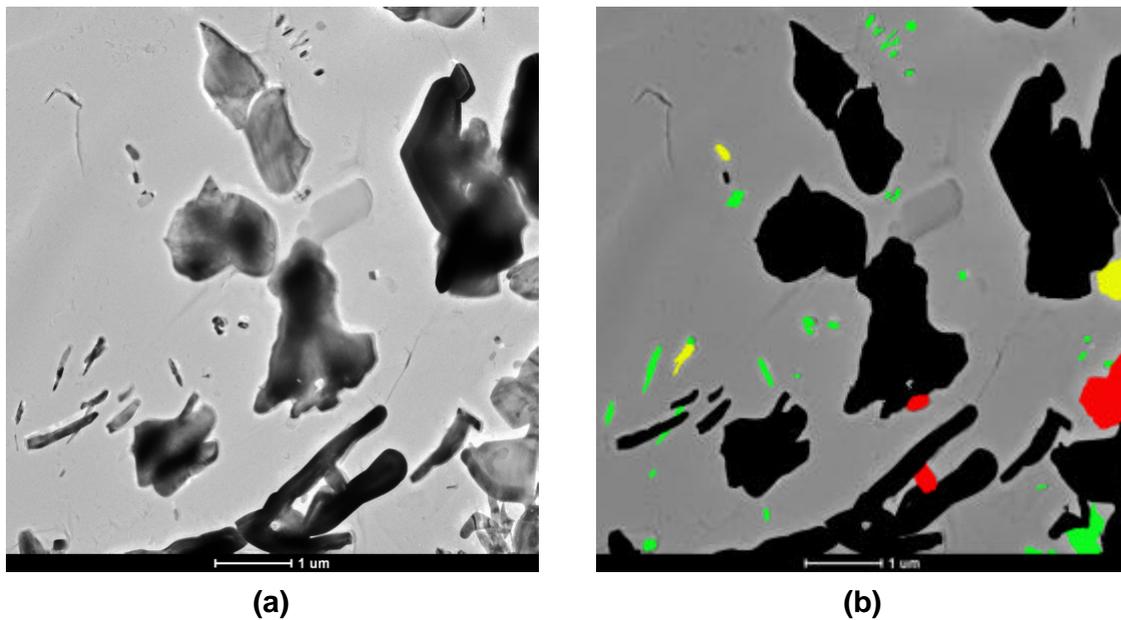


Figura 48 – (a) Campo 4 contorno, da Figura 47 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C –, com aumento de 7.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há maioria de $M_{23}C_6$ (preto), na forma de grandes blocos, além de pequenas quantidades de M_2C (verde), de M_7C_3 (amarelo) e de M_6C (vermelho).

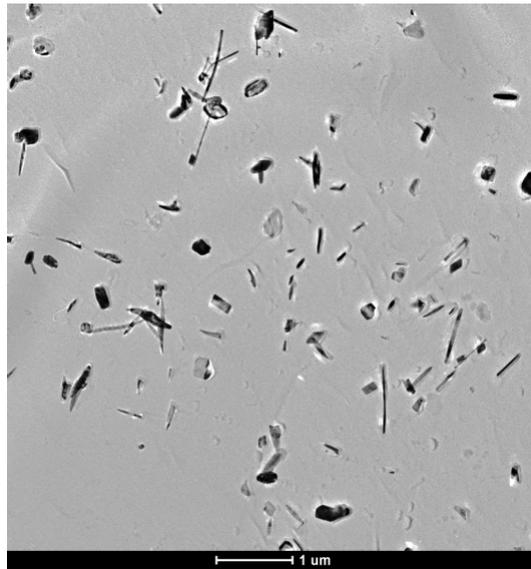


Figura 49 – Campo 5, ferrita, da Figura 47 – aço envelhecido por 1.000 horas a 600°C –, com aumento de 7.000 X. Todos os precipitados presentes na imagem são do tipo M_2C .

2.4 Ferrita-bainita – 2.000 horas

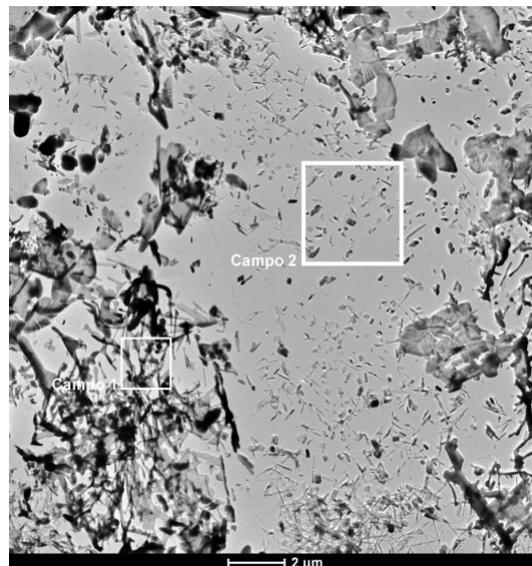
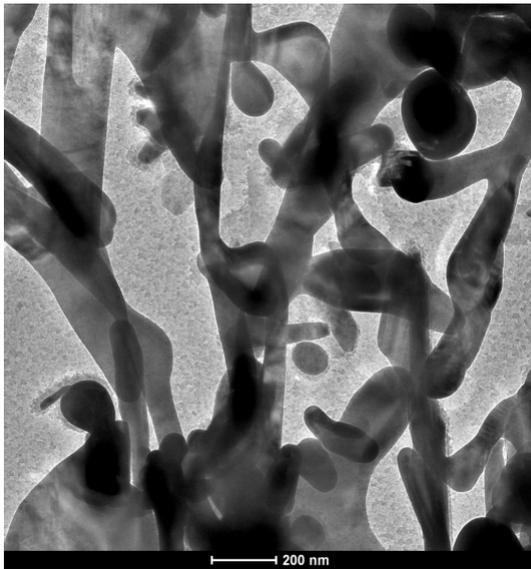
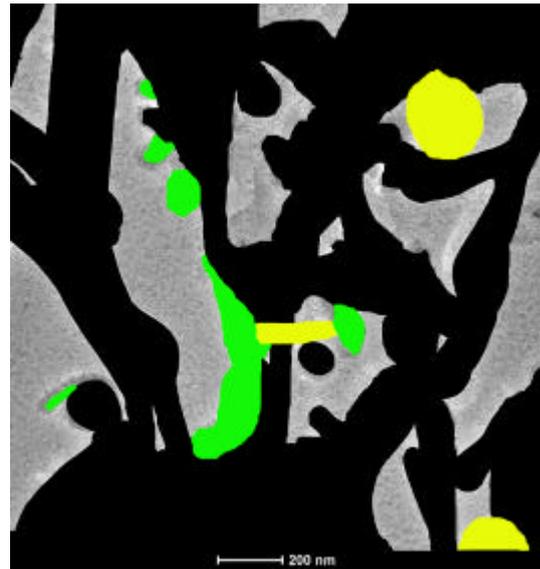


Figura 50 – Imagem da amostra ferrítico-bainítica envelhecida a 600°C por 2.000 horas, com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 1 e 2.

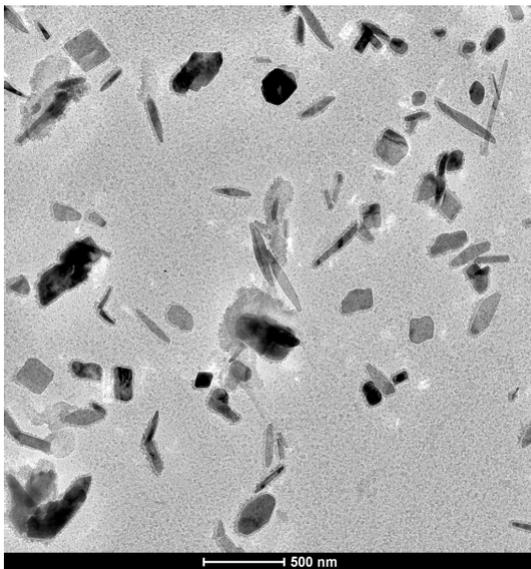


(a)

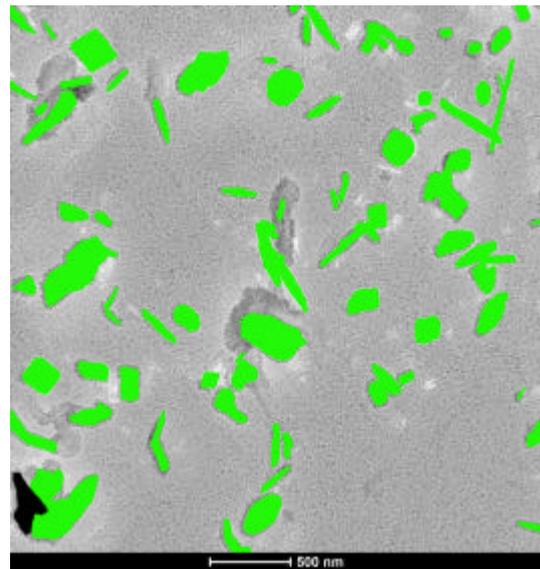


(b)

Figura 51 – (a) Campo 1, bainita, da Figura 50 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 29.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há maioria de $M_{23}C_6$ (preto), na forma de lamelas, além de pequenas quantidades de M_2C (verde) e de M_7C_3 (amarelo).



(a)



(b)

Figura 52 – (a) Campo 2, ferrita, da Figura 50 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há maioria de M_2C (verde) e apenas um $M_{23}C_6$ (preto).

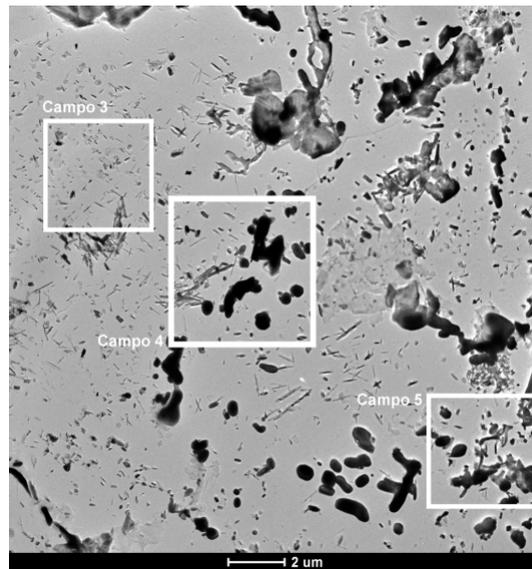
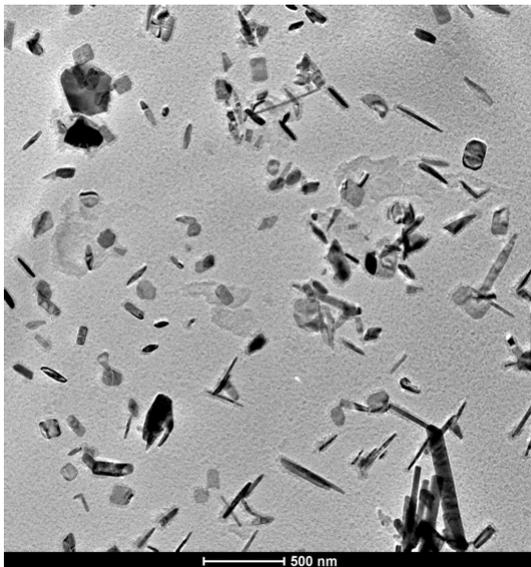
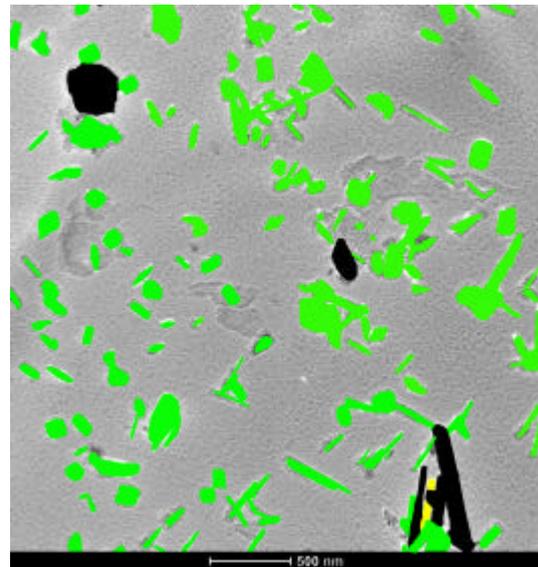


Figura 53 – Imagem da amostra ferrítico-bainítica envelhecida a 600°C por 2.000 horas, com aumento de 2.250 X, mostrando os campos 3, 4 e 5.

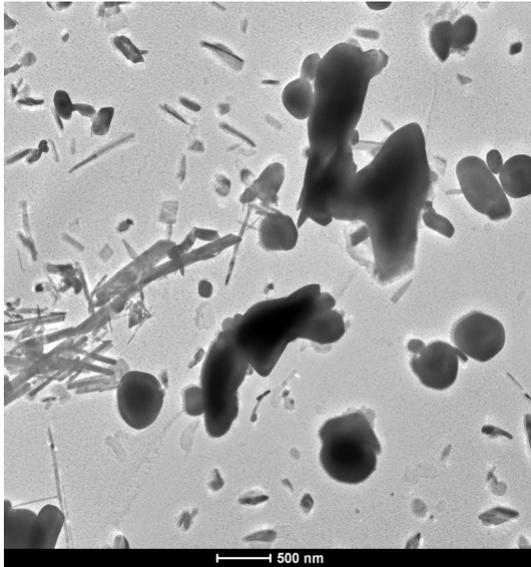


(a)

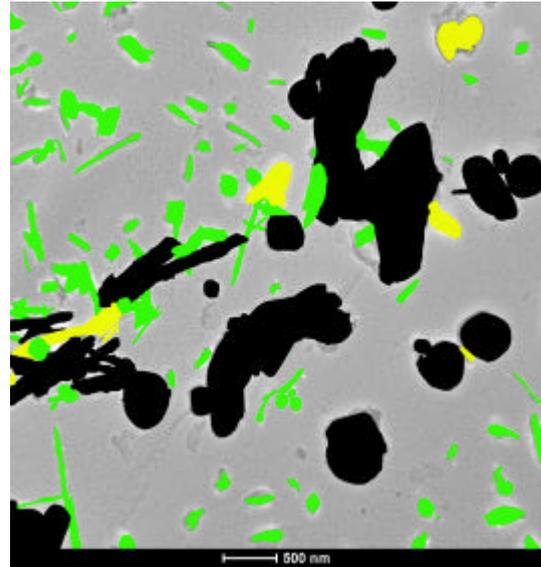


(b)

Figura 54 – (a) Campo 3, ferrita, da Figura 53 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há pequenas quantidades de M₂₃C₆ (preto) e de M₇C₃ (amarelo). A maioria dos carbonetos é do tipo M₂C (verde).

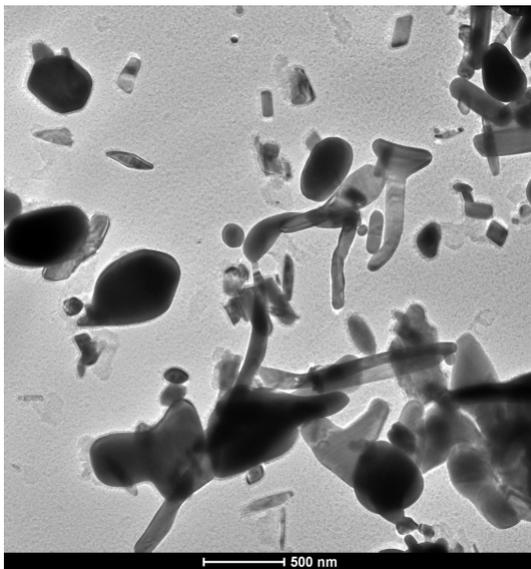


(a)

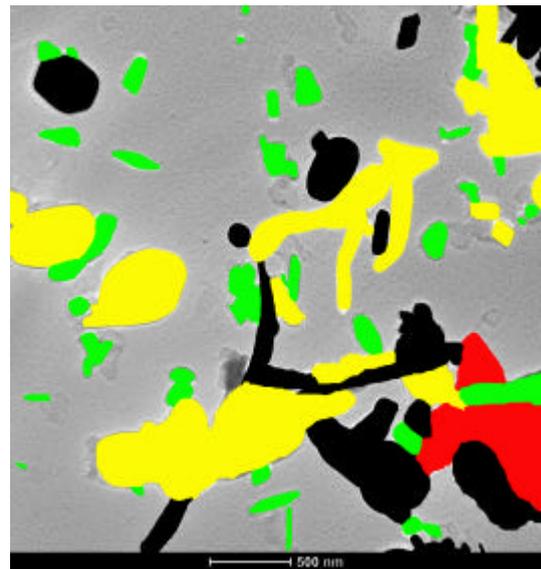


(b)

Figura 55 – (a) Campo 4, contorno de grão, da Figura 53 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 9.900 X, e (b) identificação dos precipitados. Há pequenas quantidades de M_7C_3 (amarelo), além de M_2C (verde) disperso na matriz. O $M_{23}C_6$ (preto) aparece coalescido, em forma de blocos.



(a)



(b)

Figura 56 – (a) Campo 5, bainita, da Figura 53 – aço envelhecido por 2.000 horas a 600°C –, com aumento de 15.000 X, e (b) identificação dos precipitados. Há grandes quantidades de M_7C_3 (amarelo), além de M_2C (verde), em forma de blocos e associado ao M_7C_3 ; o $M_{23}C_6$ (preto) aparece em forma de blocos. O M_6C (vermelho) surge coalescido.