

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

ANNA CAROLINA SPHAIR

**EFEITO DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NA  
NITRETAÇÃO A PLASMA DO AÇO AISI D2**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA**

**2011**

ANNA CAROLINA SPHAIR

**EFEITO DA TEMPERATURA DE AUSTENITIZAÇÃO NA  
NITRETAÇÃO A PLASMA DO AÇO AISI D2**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde

**CURITIBA**

**2011**

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Efeito da temperatura de austenitização na nitretação a plasma do aço AISI D2", realizado pela aluna Anna Carolina Sphair, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Márcio Mafra

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof.Dr. Rodrigo Villanova

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 15 de dezembro de 2011.

## DEDICATÓRIA

Agradeço a Deus, por tudo. Principalmente por me dar força para seguir em frente mesmo nos momentos mais difíceis.

À minha família, pelo apoio e amor.

À minha tia Gianna, por seu apoio durante este ano e pela ajuda com a revisão do texto.

Ao professor Giuseppe Pintaúde, por ter aceitado sem hesitar, orientar-me no desenvolvimento deste projeto. Por compartilhar seu grande conhecimento e contribuir para meu crescimento pessoal e profissional. E também pela paciência, compreensão e amizade.

Aos professores Márcio Mafra e Rodrigo Villanova, que contribuíram com comentários e observações que enriqueceram muito o projeto e ampliaram meus conhecimentos, além da atenção e disposição em ajudar.

Agradeço a Leandro Cesar Aymoto, por todo o apoio e ajuda nos mais diversos momentos durante toda a graduação e por sua enorme paciência comigo sempre.

Aos amigos da empresa CNH, pela ajuda com o corte das amostras, apoio e interesse pelo andamento do projeto e resultados obtidos.

A Viviane, Roberto e Nathália, por terem contribuído com o projeto e pelo incentivo e amizade.

"A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais volta ao seu tamanho original"

*Albert Einstein*

## RESUMO

SPHAIR, Anna. Efeitos de Tratamentos Térmicos na Nitretação a Plasma do aço AISI D2. 2011. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Industrial Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

Os aços ferramenta são amplamente utilizados na produção industrial de ferramentas de corte e de conformação, bem como moldes e matrizes. São adotados para essas aplicações porque podem ser submetidos a tratamentos térmicos e de superfície de modo a apresentar elevada dureza, boa resistência ao desgaste, e também boa resistência à deformação a frio. No entanto, variáveis como temperatura e tempos de tratamentos devem ser escolhidos com atenção, isto porque a combinação de tratamentos térmicos e também tratamentos de superfície pode anular ou tornar menos eficazes os efeitos de um tratamento térmico anterior. Neste projeto estudou-se a relação entre temperatura de austenitização e a nitretação do aço AISI D2, o que oportuniza a escolha mais eficiente dos tratamentos. Deste modo, é possível obterem-se resultados mais aprimorados, de acordo com requisitos técnicos e suas respectivas aplicações. Foram comparados os resultados obtidos pela análise de dois conjuntos de amostras. Um destes foi submetido à têmpera e posterior revenimento e o outro foi submetido à têmpera seguida de nitretação, sem revenimento entre as etapas. Conseguiram-se para o material nitretado propriedades mecânicas iguais ou melhores do que as do material temperado e revenido, considerando-se as características relevantes do aço AISI D2 para as aplicações citadas.

**Palavras-chave:** Aço AISI D2, austenitização, nitretação a plasma.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 – Imagens de microscopia óptica do aço AISI D2 recozido. Nota-se a presença de carbonetos primários e secundários na matriz ferrítica (WRITZL, 2011). 21
- Figura 2.2 - Dureza HRC x Temperatura de austenitização para aço DIN 100 Cr 6 austenitizado por 60 minutos (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996). 24
- Figura 2.3 – Dureza x Temperatura de austenitização x Quantidade de austenita retida. Informações referentes ao aço AISI D2 (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2005). 25
- Figura 2.4 - Microestruturas do aço AISI D2 resultantes do tratamento de têmpera seguida por revenimento para diferentes temperaturas de austenitização (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2005). 26
- Figura 2.5 - Relação entre dureza, temperatura de austenitização e temperatura de revenimento para o aço AISI D2 temperado a óleo e submetido a revenimento duplo por duas horas cada (MEDANHA et. al., 2008). 29
- Figura 2.6 - As imagens de (a) a (d) mostram as diferentes microestruturas obtidas para a nitretação a plasma do aço AISI D2, a 520°C, em atmosfera com 5% de N<sub>2</sub> (JÚNIOR, 2003). 31
- Figura 2.7 - Resultados obtidos pela difração de raios-X para a nitretação a plasma do aço AISI D2, a 520°C, 5% N<sub>2</sub> e diferentes tempos de tratamento. Adaptado de RIBEIRO, 2003. 34
- Figura 2.8 - As imagens de (a) a (d) mostram as diferentes microestruturas obtidas para a nitretação a plasma do aço AISI D2, à 520°C, em atmosfera com 5% de N<sub>2</sub> (JÚNIOR, 2003). 35
- Figura 2.9 - A imagem mostra a microestruturas obtida para a nitretação a plasma do aço AISI D2, a 520°C, em atmosfera com 20% de N<sub>2</sub>, com CB e NCG (JÚNIOR, 2003). 38
- Figura 2.10 - Curva da potencial formação de camada branca na nitretação do aço AISI D2, quando submetido à nitretação a 520°C, diferentes tempos e concentrações de N<sub>2</sub> (FRANCO Jr, 2003). 39

Figura 2.11 - Relação dureza x profundidade de nitretação, para amostras nitretadas a 520°C, 5% N <sub>2</sub> e diferentes tempos de tratamento.	40
Figura 3.1 - Desdobramento dos tratamentos das amostras	41
Figura 3.2 - Aferição da temperatura do forno	44
Figura 4.1 - Aço AISI D2 no estado recozido, como é fornecido. Ataque com Nital 10%. Notam-se carbonetos globulares pequenos e grandes em matriz de ferrítica.	53
Figura 4.2 - Microestrutura do aço AISI D2 submetido a têmpera com austenitização a 900°C (T1), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Nital 10% por 30s.	54
Figura 4.3 - Microestrutura do aço AISI D2 quando submetido à temperatura de austenitização de 900°C (T1), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Behara por 30s.	54
Figura 4.4 - Microestrutura do aço AISI D2 submetido a têmpera com austenitização a 1800°C (T2), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Nital 10%.	56
Figura 4.5 - Microestrutura do aço AISI D2 quando submetido à temperatura de austenitização de 1080°C (T1), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Behara.	56
Figura 4.6 – Detalhe da metalografia da amostra FT2, com contraste acentuado.	57
Figura 4.7 - Microestrutura do aço AISI D2 quando submetido à temperatura de austenitização de 1200°C (T3), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Villela.	58
Figura 4.8 - Detalhe dos contornos de grão da microestrutura do aço AISI D2 referente a T3, ataque com Villela.	59
Figura 4.9 - Detalhe de carboneto presente na microestrutura de T3, ataque com Villela.	59
Figura 4.10 - Microestrutura do aço AISI D2 quando submetido a revenimento à temperatura de 520°C por 2h, a partir do FT1. Ataque com Villela.	61



Figura 4.11 - Aço AISI D2 quando submetido a revenimento à temperatura de 520°C por 2h, a partir do estado FT2. Ataque com Villela.	62
Figura 4.12 - Detalhe da microestrutura do aço AISI D2 revenido a 520°C por 2h, a partir do estado FT2. Ataque com Villela.	63
Figura 4.13 - Aço AISI D2 revenido a 520°C por duas horas, a partir do estado FT2. Ataque com Nital 10%.	63
Figura 4.14 - Aço AISI D2 revenido a 520°C por duas horas, a partir do estado FT3. Ataque com Nital 10%.	64
Figura 4.15 – Aço AISI D2 nitretado a 520°C por duas horas a partir do estado FT1, observa-se a zona de difusão de cor mais escura próxima à baquelite, sem camada branca.	65
Figura 4.16 - Aço AISI D2 nitretado a 520°C por duas horas, a partir do estado FT2, sem camada branca.	66
Figura 4.17 - Microestrutura do aço AISI D2 temperado com austenitização de 1200°C (T3), por 30 min e posterior nitretação com 5% N2 por 2 horas. Ataque com Nital 5%.	67
Figura 4.18 – Dureza HRC x Temperatura de austenitização das amostras temperadas e amostras temperadas e revenidas	69
Figura 4.19 – Comparação entre valores de dureza obtidos pelos métodos Rockwell e Vickers	71
Figura 4.20 – Comparação entre perfis de dureza superficial das amostras RFT1 e NFT1	75
Figura 4.21 - Comparação entre perfis de dureza superficial das amostras RFT1 e NFT1	76
Figura 4.22 - Comparação entre perfis de dureza superficial das amostras RFT3 e NFT3	77
Figura 4.23 Gráfico adaptado de FRANCO Jr., com acréscimo dos valores de dureza de perfil da amostra NFT2 para efeito comparativo.	78
Figura 5.1 - Certificado de garantia do aço AISI D2 adquirido da Aço Trio Comércio de Aços Especiais LTDA.	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Composição química do aço AISI D2 .....	42
Tabela 3.1 – Composição da mistura gasosa utilizada na nitretação a plasma .....	46
Tabela 3.2 - Relação de amostras e ataques utilizados para metalografia.....	48
Tabela 3.3 - Profundidades adotadas para a medição de dureza das amostras revenidas e nitretadas, valores em mm.....	51
Tabela 4.1 – Valores de dureza medidos em Rockwell .....	68
Tabela 4.2 - Resultados da medição de dureza das amostras em HV .....	70
Tabela 4.3 - Comparação das profundidades das camadas nitretadas obtidas por análise metalográfica e medição de dureza para diferentes temperaturas de austenitização .....	73
Tabela 4.4 – Perfil de dureza HV das amostras .....	74

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**CB** - Camada branca

**CCC** - Estrutura cúbica de corpo centrado, com  $FEA=0,68$

**CFC** - Estrutura cúbica de face centrada, com  $FEA=0,74$

**F** - Amostra de aço AISI D2 no estado de fornecimento, recozido.

**FEA** - Fator de empacotamento atômico, razão entre o volume de átomos de uma célula unitária e o volume total da célula unitária

**FT1** - Amostra de aço AISI D2 austenitizado a  $900^{\circ}\text{C}$  e temperado a ar forçado a partir do estado recozido.

**FT2** - Amostra de aço AISI D2 austenitizado a  $1080^{\circ}\text{C}$  e temperado a ar forçado a partir do estado recozido.

**FT3** - Amostra de aço AISI D2 austenitizado a  $1200^{\circ}\text{C}$  e temperado a ar forçado a partir do estado recozido.

**Ms** - Temperatura a partir da qual se inicia a formação de martensita

**NCG** - Precipitados ao redor da austenita retida

**NFT1** - Amostra de aço AISI D2 nitretada a plasma a  $520^{\circ}\text{C}$  por duas horas, a partir do estado FT1, em mistura gasosa com 5% de  $\text{N}_2$ .

**NFT2** - Amostra de aço AISI D2 nitretada a plasma a  $520^{\circ}\text{C}$  por duas horas, a partir do estado FT2, em mistura gasosa com 5% de  $\text{N}_2$ .

**NFT3** - Amostra de aço AISI D2 nitretada a plasma a  $520^{\circ}\text{C}$  por duas horas, a partir do estado FT3, em mistura gasosa com 5% de  $\text{N}_2$ .

**RFT1** - Amostra de aço AISI D2 revenida a  $520^{\circ}\text{C}$  por duas horas, a partir do estado FT1.

**RFT2** - Amostra de aço AISI D2 revenida a  $520^{\circ}\text{C}$  por duas horas, a partir do estado FT2.

**RFT3** - Amostra de aço AISI D2 revenida a  $520^{\circ}\text{C}$  por duas horas, a partir do estado FT3

**TCC** - Estrutura tetragonal de corpo centrado

## LISTA DE SÍMBOLOS

**Fe $\alpha$** - Ferrita: forma alotrópica do ferro com reticulado CCC

**Fe $\gamma$** - Austenita: forma alotrópica do ferro com reticulado CFC

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Tema	15
1.2	Oportunidade	16
1.3	Objetivos	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
2.1	Medições de dureza	19
2.1.1	Classificação dos testes	19
2.2	Tratamentos e microestruturas do aço AISI D2	20
2.3	Recozimento	20
2.4	Têmpera	21
2.4.1	A martensita	22
2.4.2	Influência das temperaturas de austenitização	22
2.5	Presença de austenita retida	25
2.5.1	Influência do tamanho de grão da austenita	27
2.6	Revenimento	27
2.6.1	Endurecimento Secundário	27
2.6.2	Segregação de Carbono	29
2.7	Microestruturas do aço AISI D2 após nitretação	30
2.7.1	Nitretação do aço AISI D2 em atmosfera com 5% de N <sub>2</sub> , a 520°C	30
2.7.2	Nitretação do aço AISI D2 em atmosfera com 10% de N <sub>2</sub> , à temperatura de 520°C	34
2.7.3	Nitretação do aço AISI D2 em atmosfera com 20% de N <sub>2</sub> , à temperatura de 520°C	37
2.7.4	– Curva do início da formação de Camada Branca para o aço AISI D2	38
2.7.5	Dureza de perfil das amostras nitretadas a 520°C, com 5% N <sub>2</sub> na mistura gasosa	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>41</b>
3.1	Tratamentos térmicos e tratamento de superfície	41
3.2	Aço AISI D2	41
3.3	Têmpera	43
3.4	Revenimento	45
3.5	Nitretação a plasma	45
3.6	Preparação das amostras	46
3.6.1	Análise da microestrutura	47
3.6.2	Análise da microestrutura	48
3.6.3	Medições de dureza	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>52</b>
4.1	Análise das microestruturas	52
4.1.1	Aço AISI D2 no estado recozido	52
4.1.2	Microestruturas resultantes da têmpera	53
4.1.3	Microestruturas resultantes do revenimento	61
4.1.4	Aço AISI D2 amostras temperadas e nitretadas	65
4.2	Dureza das amostras	68
4.2.1	Dureza Rocwell – Amostras temperadas e amostras temperadas e revenidas	68
4.2.2	Dureza Vickers - Amostras temperadas e amostras temperadas e revenidas	70
4.2.3	Perfis de dureza	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>79</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Tema

Considerando-se a grande importância dos aços para as aplicações tecnológicas e de engenharia, o desenvolvimento de novas ligas e o aprimoramento dos tratamentos térmicos e de superfície são temas relevantes à fabricação e aplicação desses materiais (CHIAVERINI, 1987). No presente trabalho serão avaliados parâmetros adotados para tratamentos térmicos e de superfície do aço AISI D2, aço ferramenta de alta liga usada para trabalho a frio.

Aços ferramenta são muito utilizados para a produção de ferramentas de corte ou conformação. Estas, quando em trabalho, precisam apresentar elevada tenacidade e elevada resistência ao desgaste (ASM Handbook; Heat Treating, 1991). Os aços ferramenta devem apresentar ainda como características, elevada resiliência mecânica e suscetibilidade a tratamentos térmicos (CHIAVERINI, 1971).

A combinação de tais propriedades varia de acordo com a composição química dos aços ferramenta e os tratamentos térmicos e de superfície adotados (ASM Handbook; Heat Treating, 1991). Deve-se analisar qual composição é a mais adequada para cada aplicação e quais tratamentos proporcionam os melhores resultados.

O AISI D2 é um aço em cuja composição química o cromo é o elemento de liga presente em maior quantidade, cerca de 12% em peso, seguido pelo Carbono com cerca de 1,5% em peso (ASM Handbook; Heat Treating, 1991). Este teor de carbono proporciona alta dureza para este aço quando tratado termicamente, um dos fatores que contribui para a elevada resistência ao desgaste da liga (CHIAVERINI, 2008).

Estudos realizados por Bressan et al. (2007), evidenciam que a resistência ao desgaste do aço AISI D2 não depende exclusivamente da dureza do material, mas também dos tratamentos térmicos e de superfície que podem alterar

significativamente a microestrutura do aço (BRESSAN, J. D.; GILAPA, L. M.; DAROS, D. P; 2007).

## 1.2 Oportunidade

Dada a importância do aço AISI D2 para aplicações industriais de corte e conformação pretende-se com este estudo buscarem-se melhorias ou informações úteis ao seu processo de fabricação.

Os tratamentos térmicos são etapas importantes na fabricação dos aços liga, pois conferem as características finais à microestrutura do material e possibilitam seu uso de acordo com as aplicações desejadas. Após o tratamento térmico, o aço AISI D2 pode ainda ser submetido a tratamentos superficiais.

A escolha adequada dos tratamentos térmicos para um determinado aço ferramenta é que confere ao material a combinação ideal de propriedades fundamentais como resistência ao desgaste, tenacidade e dureza (ASM Handbook; Heat Treating, 1991).

Tem-se então como oportunidade de melhoria, a efetivação de um estudo que permita comparar os efeitos de diferentes parâmetros para a realização dos tratamentos térmicos para o aço AISI D2 submetido à nitretação a plasma.

É comum durante os tratamentos do aço AISI D2, a realização de têmpera seguida de revenimento. Faz-se a têmpera utilizando-se elevadas temperaturas para promover-se a austenitização do aço e após esta etapa faz-se revenimento para conseguir-se o alívio das tensões resultantes da têmpera (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2005). Utilizam-se temperaturas menores do que as usadas na têmpera, pois não é necessário atingir-se a temperatura de austenitização para revenir (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2005).

Quando o material é sujeito ainda a posterior tratamento superficial, e neste estudo é de especial interesse a nitretação, esta também é feita a temperaturas mais baixas do que o revenimento para que não haja queda de dureza no núcleo após o tratamento superficial (FRANCO JR, 2003).



O aço AISI D2, quando submetido à têmpera e posterior revenimento, pode apresentar endurecimento secundário, conforme evidenciam estudos realizados por MEDANHA et. al., 2005. Será estudada a possibilidade de se obter o mesmo efeito de endurecimento secundário durante o tratamento de nitretação a plasma, após a têmpera.

### **1.3 Objetivos**

Pretende-se verificar a hipótese de obtenção de propriedades mecânicas iguais ou superiores às conseguidas com o processo usual de tratamento do AISI D2, ao realizar-se a têmpera e posterior nitretação. Entenda-se como processo usual a têmpera seguida de revenimento, sendo este substituído diretamente pela nitretação.

Espera-se verificar se ocorre ou não endurecimento secundário no material submetido à têmpera e posterior nitretação. Os resultados obtidos destes tratamentos serão comparados a amostras sujeitas ao processo de têmpera e revenimento, para discutir-se a eficácia do método proposto.

Além disso, pretende-se evitar a formação da camada branca no material durante a nitretação a plasma, já que esta apresenta propriedades mecânicas inferiores às desejadas para o material.

A indústria utiliza os aços para diversas aplicações necessárias ao desenvolvimento econômico e tecnológico da sociedade. Dentre os aços liga, o AISI D2 é o mais popular, muito usado na produção de moldes, matrizes e ferramentas que requerem elevada resistência ao desgaste e tenacidade moderada para suas aplicações (ARIETA et. al., 2010).

Sabendo-se que este material tem grande aplicação industrial, o desenvolvimento de estudos capazes de indicar parâmetros mais adequados para os processos de tratamento de tal aço podem resultar em maior eficiência e economia com a realização dos mesmos.

Processos de tratamentos mais rápidos ou que apresentem maior custo/benefício podem ser muito importantes para empresas que utilizem esse material, uma vez que o mercado é cada vez mais competitivo e exigente.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Apresentam-se a seguir, alguns conceitos relevantes ao desenvolvimento do projeto. Mostram-se também microestruturas do aço AISI D2, obtidas a partir de diferentes condições de tratamento, devidas à influência exercida por parâmetros como tempo e temperatura.

### **2.1 Medições de dureza**

As medições de dureza indicam a capacidade dos materiais de resistirem a aplicações de cargas e deformações, quando submetidos a esforços provocados por indentadores. Constituem métodos simples e economicamente acessíveis além de revelarem informações importantes a respeito dos objetos de análise (ASM Handbook, vol.8, 2000).

#### **2.1.1 Classificação dos testes**

##### **2.1.1.1 Classificação segundo métodos de medição de dureza**

Existem métodos que medem a profundidade da deformação provocada pela aplicação de carga de indentadores, como é o caso da dureza Rockwell, e ainda os que utilizam para o cálculo de dureza as dimensões das marcas do indentador no material após aplicação da carga, dureza Vickers, Brinell e Knoop (ASM Handbook, vol.8, 2000).

##### **2.1.1.2 Classificação segundo magnitude da carga aplicada**

A carga utilizada para a realização das medições também permite classificar o tipo de teste em macro dureza, micro dureza e nano dureza (ASM Handbook,

vol.8, 2000). Cabe ressaltar que tal terminologia classifica apenas os tipos de medição de acordo com a magnitude das cargas aplicadas, mas não exerce influência sobre a terminologia da propriedade, que é determinada apenas como dureza.

Cargas maiores que 1kgf, são características de medições determinadas como macro dureza. Podem ser realizadas medições nas escalas Vickers (1-120kgf), Rocwell (15-150kgf) ou Brinell (grandes variações de carga). Já a micro dureza é caracterizada por medições que envolvem cargas de 1gf - 10kfg. E a nano dureza, por conseguinte, aplica-se a cargas menores que 0,01gf (ASM Handbook, vol.8, 2000).

## **2.2 Tratamentos e microestruturas do aço AISI D2**

Sabe-se que durante processos de tratamentos térmicos e de superfície, diversos parâmetros exercem influência sobre a formação da microestrutura final dos aços.

Estudar-se-ão a partir de agora, algumas características relevantes à microestrutura do aço AISI D2, após ser submetido a diferentes tratamentos, são eles: recozimento, austenitização e têmpera, revenimento e nitretação a plasma.

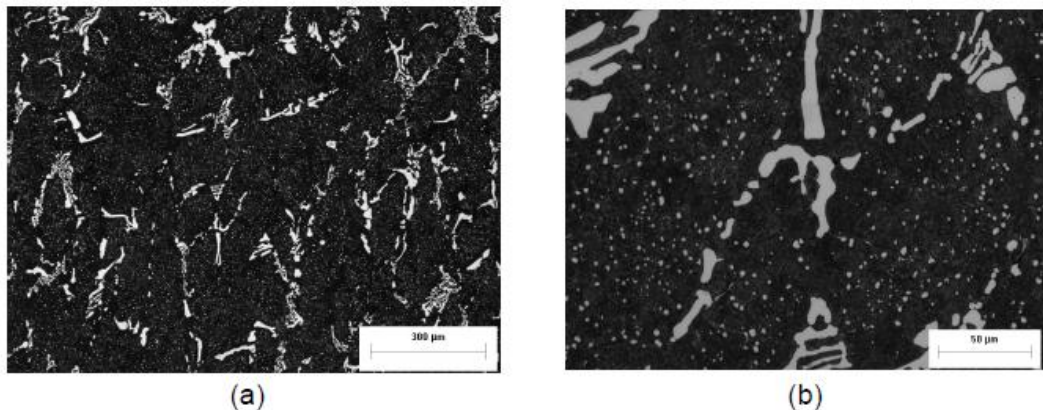
Algumas variáveis importantes relacionadas aos tratamentos térmicos são: temperatura e tempo de austenitização, condições de resfriamento da têmpera, temperatura e tempo de revenimento. Já em relação à nitretação a plasma, podemos citar, tempo de tratamento superficial, temperatura, composição da mistura gasosa, entre outros.

## **2.3 Recozimento**

Geralmente, os aços ferramenta são comercializados no estado recozido, pois a realização de tal tratamento melhora a usinabilidade do material (ASM Handbook; Heat Treating, 1991).

Durante o processo de fabricação, o aço AISI D2 se solidifica formando-se inicialmente uma microestrutura composta de austenita e carbonetos ( $\gamma + M_7C_3$ ). Após recozimento, condição na qual o aço é comercializado pelos fabricantes, apresenta matriz ferrítica e carbonetos  $M_7C_3$  (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2005).

A figura 2.2 (a e b) apresenta a microestrutura do AISI D2 recozido. Observam-se muitos carbonetos dispersos na matriz. Os maiores são carbonetos primários, com formatos irregulares, já os menores são carbonetos secundários, que apresentam formato globular (WRITZL, 2011).



**Figura 2.1 – Imagens de microscopia óptica do aço AISI D2 recozido. Nota-se a presença de carbonetos primários e secundários na matriz ferrítica (WRITZL, 2011).**

## 2.4 Têmpera

A têmpera consiste no aquecimento do aço a temperaturas de austenitização e posterior resfriamento rápido (CALLISTER, 2002). É uma etapa crítica à qual são submetidos os aços ferramenta. Isso porque variações na temperatura e tempo de tratamento podem promover resultados bastante diversos (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996).

Durante a austenitização, ocorre transformação de ferrita ( $Fe\alpha$ ) em austenita ( $Fe\gamma$ ) e também a dissolução de carbonetos (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996). Durante a têmpera, a matriz austenítica do aço se transforma em martensita e os produtos resultantes são: austenita retida, martensita e carbonetos (SILVA;

CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996). Austenita retida é a parcela de austenita que não se transformou em martensita durante a têmpera (CALLISTER, 2002).

#### **2.4.1 A martensita**

Forma-se martensita quando o aço, após austenitização, é resfriado rapidamente até temperaturas próximas à temperatura ambiente (CALLISTER, 2002). A martensita tem estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) e é resultado de uma transformação polimórfica, que tem como estrutura inicial a austenita (cúbica de face centrada - CFC). Nesse processo não ocorre difusão dos átomos de carbono, eles apenas se rearranjam na estrutura, após pequenos deslocamentos, por maclação (PORTER; EASTERLING; SHERIF, 2009).

Na estrutura final deste microconstituente, os átomos de carbono representam solução sólida intersticial. Formam então uma solução sólida supersaturada que, ao ser aquecida possibilita a difusão dos átomos de carbono (CALLISTER, 2002).

Pode-se citar como efeitos da formação de martensita o aumento da dureza, a diminuição da tenacidade do material e o surgimento de tensões residuais. Como a martensita é uma fase metaestável, é sujeita a ocorrência de transformações de fase no material quando este é submetido a solicitações mecânicas (GOLDENSTEIN et. al., 2003).

#### **2.4.2 Influência das temperaturas de austenitização**

Durante a austenitização, define-se a fração final de austenita e de carbonetos retidos da microestrutura. Neste processo, a composição química, a distribuição e a fração volumétrica dos carbonetos são determinadas. Portanto, pode-se afirmar que a distribuição dos carbonetos exerce influência sobre a resistência ao desgaste e também controla o tamanho de grão da austenita. Isso porque quanto mais refinada a estrutura e maior a fração volumétrica de carbonetos,

melhor é o controle do crescimento de grão da austenita (ASM Handbook; Heat Treating, 1991).

Temperaturas demasiadamente elevadas ou longos tempos de tratamento podem promover crescimento excessivo do grão de austenita, resultando em perda de resistência e baixa ductilidade, além de maior quantidade de austenita retida na microestrutura (ASM Handbook; Heat Treating, 1991). Quanto maiores os grãos da austenita, menor a tenacidade e maior a probabilidade de desenvolverem-se micro trincas no material (BROBST; KRAUSS, 1973).

Temperaturas de austenitização muito altas também fazem com que a temperatura de formação de martensita ( $M_s$ ) caia. Sendo assim, tem-se menos martensita na microestrutura e conseqüentemente mais austenita retida (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996). Ao mesmo tempo, aumenta a quantidade de carbono e de cromo em solução, pois ocorre maior dissolução dos carbonetos (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996).

Já temperaturas muito baixas não conseguem promover aumento de dureza e nem a desejada resistência ao desgaste (ASM Handbook; Heat Treating, 1991). A dissolução dos carbonetos não ocorre, ou acontece em menor proporção comparativamente à austenitização a temperaturas elevadas. Tais carbonetos, quando não dissolvidos podem ser fonte de nucleação de trincas no material e ocasionar falhas (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996).

#### **2.4.2.1 Temperatura de austenitização e dureza**

Com o aumento da temperatura de austenitização, espera-se elevação de dureza. Isso porque a dissolução dos carbonetos irá transferir mais carbono e cromo para a solução, como já mencionado. Assim a martensita da matriz sofre maior deformação do reticulado cristalino e a sua dureza aumenta (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996).

No entanto, esse aumento de dureza ocorre apenas até uma determinada temperatura. Após um determinado ponto, a dureza começa a cair. Isso acontece porque à medida que os carbonetos são dissolvidos, aumenta a quantidade de

austenita retida no material e este microconstituente tem dureza inferior à da martensita (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996).

A Figura 2.2 mostra a curva esperada de dureza em relação à temperatura de austenitização para o aço DIN 100Cr6 (equivalente ao AISI 52100). Observa-se que o aumento da temperatura promove aumento da dureza até um ponto ótimo, a partir do qual a dureza começa a cair.

A curva do aço AISI D2 correspondente a esse fenômeno está indicada em parte na Figura 2.3. Apesar de indicar o aumento de dureza com o aumento da temperatura de austenitização e também consequente aumento de austenita retida, a figura mostra apenas o começo do declínio da dureza do material.

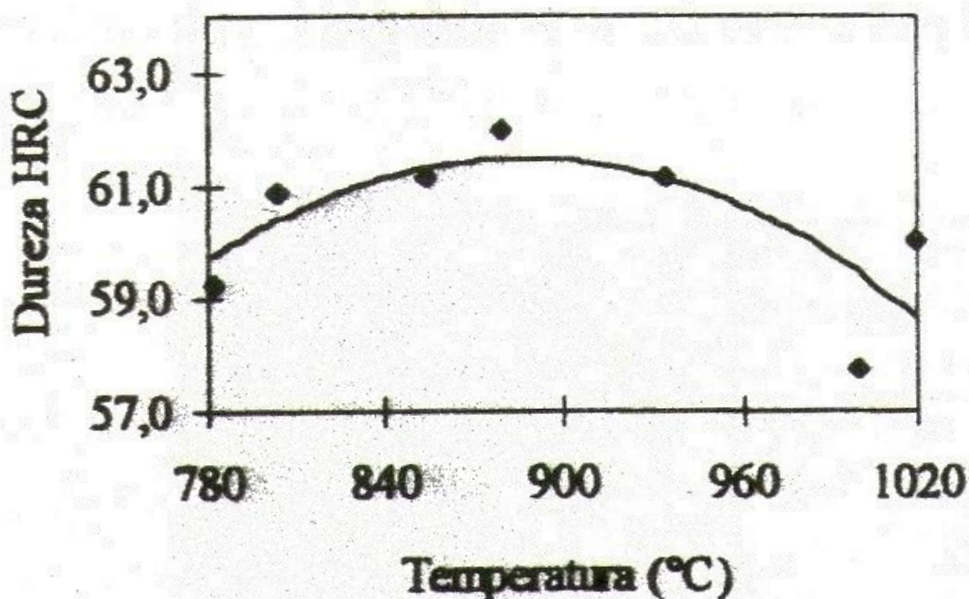


Figura 2.2 - Dureza HRC x Temperatura de austenitização para aço DIN 100 Cr 6 austenitizado por 60 minutos (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996).



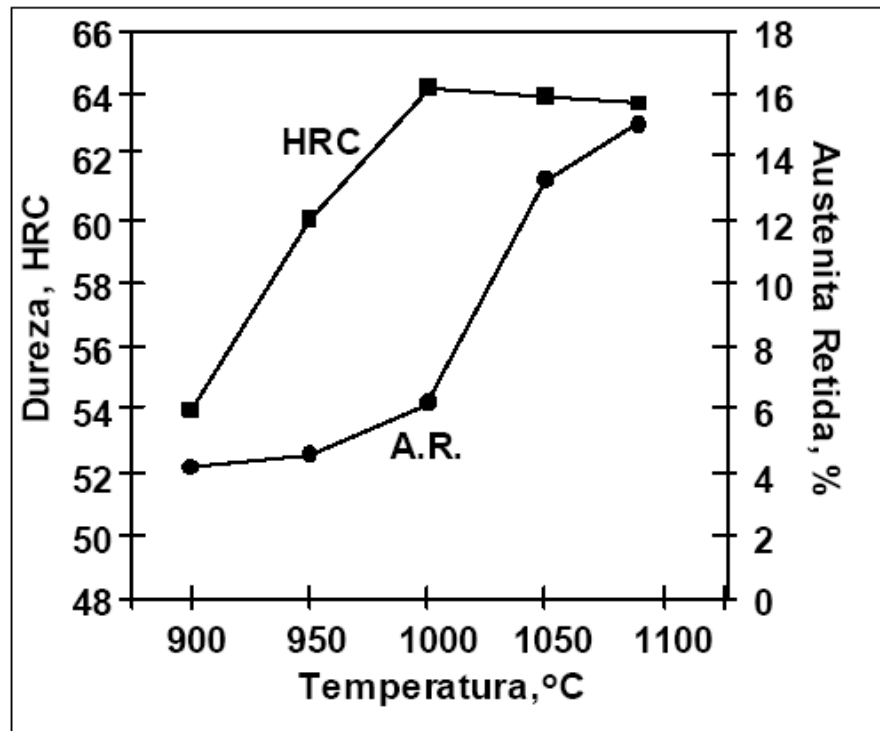


Figura 2.3 – Dureza x Temperatura de austenitização x Quantidade de austenita retida. Informações referentes ao aço AISI D2 (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2005).

## 2.5 Presença de austenita retida

Após ser temperado o aço AISI D2 poderá apresentar diferentes quantidades de austenita retida na sua microestrutura. Isso pode ser resultado de diferenças nas microestruturas iniciais do aço ou ainda de diferentes temperaturas de austenitização utilizadas.

A partir de microestruturas inicialmente iguais, porém submetidas a diferentes temperaturas de austenitização, é possível observar diferentes quantidades de austenita retida na microestrutura ao compará-las (BROBST; KRAUSS, 1974).

A austenita retida pode exercer influência sobre a ductilidade do aço. Isso porque quando o material é submetido a deformações plásticas, pode ocorrer transformação da austenita retida em martensita, à medida que a taxa de deformação seja suficiente para tanto. Durante tal processo, a precipitação de

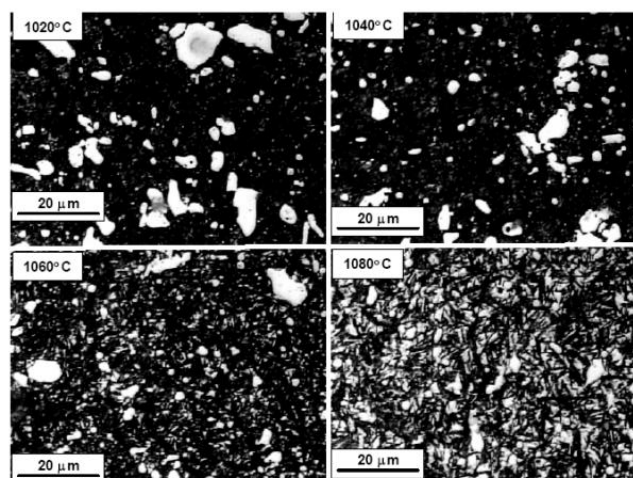
carbonetos e a formação de martensita promovem o aumento da dureza do material (MOREIRA et. al.,2009).

Além disso, a resistência ao desgaste e a dureza, características bastante importantes para a aplicação do AISI D2, sofrem também influência da quantidade de carbonetos presentes na composição do aço. Portanto, a dureza tem relação com a quantidade de austenita retida presente na microestrutura (MOREIRA et. al., 2009).

A Figura 2.4 ilustra a diferença entre as microestruturas do aço AISI D2 obtidas após têmpera e revenimento, resultantes de estudos realizados por MEDANHA et. al., 2005. Submeteram-se as amostras a ataque de mesma duração, com Nital 10%, para que a diferença observada ao compararem-se as microestruturas não sofresse influência do tempo de ataque.

Obtiveram-se diferentes aspectos de microestrutura para o material, após realização de tratamentos com diferentes temperaturas de austenitização por iguais períodos de tempo. Tais diferenças estão relacionadas à quantidade de austenita retida e de carbonetos obtida após os tratamentos.

Conclui-se, portanto, que ocorre aumento da austenita retida na microestrutura (cor mais clara em relação às demais), ao elevar-se a temperatura de austenitização. Fato este ilustrado pela imagem da micrografia resultante da amostra austenitizada a 1080°C.



**Figura 2.4 - Microestruturas do aço AISI D2 resultantes do tratamento de têmpera seguida por revenimento para diferentes temperaturas de austenitização (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO, 2005).**

### **2.5.1 Influência do tamanho de grão da austenita**

O crescimento do tamanho de grão da austenita aumenta a fragilidade do material, pois há maior probabilidade de ocorrência de fratura intergranular à medida que os grãos crescem (BROBST; KRAUSS, 1973).

Quanto maior a temperatura de austenitização, maior o tamanho de grão e também maior a quantidade de austenita retida na microestrutura, conseqüentemente, menor a dureza do aço, conforme ilustrado anteriormente na Figura 2.3.

## **2.6 Revenimento**

É muito comum que os aços sejam revenidos após a têmpera, pois o revenimento aumenta a ductilidade dos aços martensíticos. Tem-se ao final do tratamento térmico de têmpera e do revenido, uma microestrutura composta por austenita retida, martensita revenida e carbonetos eutéticos não dissolvidos (RIBEIRO, 2003).

### **2.6.1 Endurecimento Secundário**

Na composição do aço AISI D2 estão presentes elementos que favorecem a ocorrência do endurecimento secundário durante o revenimento. Estes promovem a precipitação de carbonetos durante o tratamento, aumentando a dureza do material. Em relação ao AISI D2, são eles: carbono, cromo, molibdênio e vanádio (MEDANHA, et. al.,2008).

A microestrutura do aço depende da temperatura em que é realizado o revenimento. O tratamento precisa ser realizado a uma temperatura suficientemente elevada ( $T > 500^{\circ}\text{C}$  no caso do aço AISI D2) para que ocorra a difusão do carbono presente na austenita retida e também o alívio das tensões presentes na martensita obtida após a têmpera (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO; 2005).

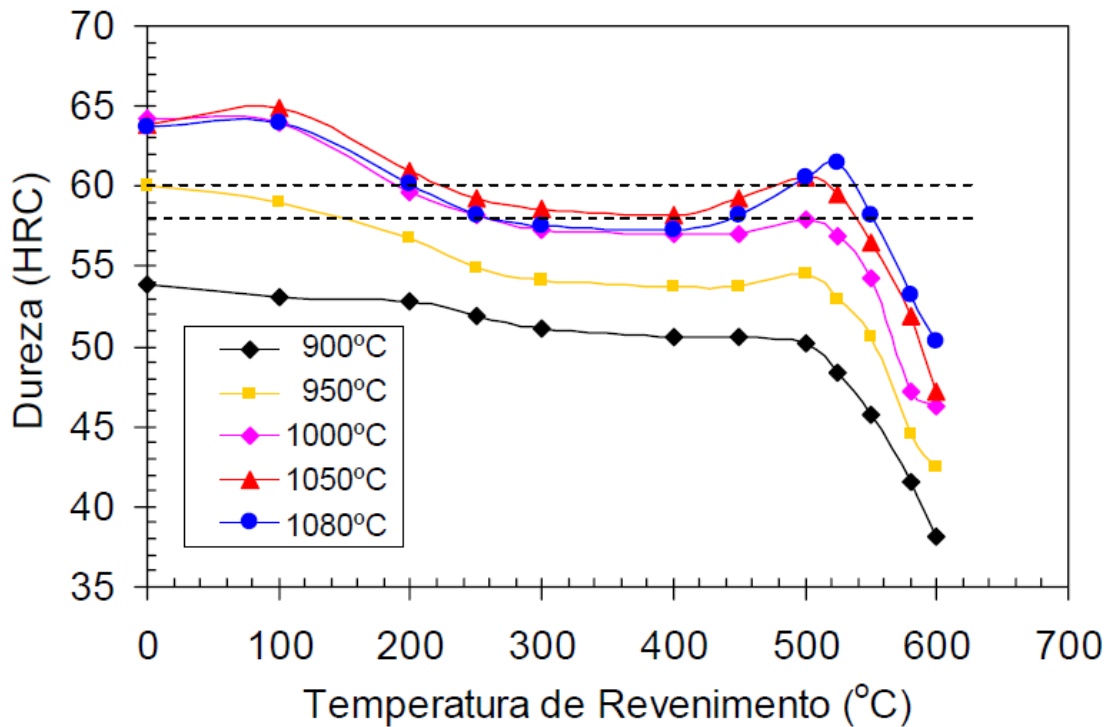
Temperaturas mais elevadas de revenimento também favorecem o aumento da tenacidade do aço, fator que se deve à formação da martensita revenida. Se forem utilizadas baixas temperaturas de revenimento ( $T \sim 200^{\circ}\text{C}$ ) a matriz do aço é que determinará a dureza do material (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO; 2003).

Como citado anteriormente, os aços ferramenta precisam apresentar elevada dureza e tenacidade para suas aplicações. O endurecimento secundário, que pode ser promovido pelo revenimento a temperaturas elevadas da liga C-Fe-Cr pode ser responsável por tal efeito (MEDANHA; GOLDENSTEIN; PINEDO; 2003).

Estudos realizados por MEDANHA et. al., 2008, mostram que o aço AISI D2 pode apresentar endurecimento secundário durante o revenimento, de acordo com escolhas adequadas das temperaturas de austenitização e de revenimento para os tratamentos do material.

A Figura 2.5, resultado de estudos feitos por MEDANHA et. al., 2008, mostra a relação entre dureza, temperaturas de austenitização e temperaturas de revenimento para o aço AISI D2. Nota-se que tal material pode apresentar endurecimento secundário após ser temperado e revenido. As informações são referentes a material temperado a óleo e sujeito a revenimento duplo de duas horas cada.

A maior dureza obtida nas pesquisas de MEDANHA et. al., 2008, é correspondente a aproximadamente 61,5 HRC e foi obtida para austenitização a  $1080^{\circ}\text{C}$ , com posterior revenimento duplo à  $540^{\circ}\text{C}$ . Para as temperaturas de austenitização de  $1000^{\circ}\text{C}$  e  $1050^{\circ}\text{C}$ , o pico de endurecimento secundário ocorre a  $500^{\circ}\text{C}$  e apresenta valores de aproximadamente 54,5 HCR e 60,5 HCR, respectivamente. Observa-se, portanto, que a maior temperatura de austenitização combinada a revenimento à temperatura de  $540^{\circ}\text{C}$ , resultou em maior dureza. Tal efeito tem relação com a dissolução de carbonetos de vanádio e molibdênio que acontece a elevadas temperaturas de austenitização.



**Figura 2.5 - Relação entre dureza, temperatura de austenitização e temperatura de revenimento para o aço AISI D2 temperado a óleo e submetido a revenimento duplo por duas horas cada (MEDANHA et. al., 2008).**

### 2.6.2 Segregação de Carbono

O revenimento envolve diferentes etapas, que ocorrerem simultaneamente. São elas: segregação de carbono para as regiões de defeitos de rede, precipitação de carbonetos e decomposição da austenita retida, além da recuperação e recristalização da estrutura martensítica, que promove o alívio de tensões (KRAUSS, G.; 1984).

Com a diminuição da concentração de carbono na martensita, ocorre a precipitação dos carbonetos. Esta redistribuição do carbono da matriz acarreta menor deformação da estrutura martensítica e tem-se, como resultado destes fenômenos, queda de dureza e aumento de tenacidade (SILVA; CUMINO; GOLDENSTEIN, 1996).

Na martensita em ripas, as regiões próximas a discordâncias possuem maiores concentrações de tensões, o que faz com que as regiões próximas a esses defeitos tenham zonas de baixa energia, para as quais o carbono se difunde (SPEICH, G. R.; LESLIE, W. C., 1972).

No entanto, em aços de alta liga, poucas regiões de baixa energia estão disponíveis e a segregação de carbono para as regiões de discordâncias não é a única forma de ocorrência da segregação (SPEICH, G. R.; LESLIE, W. C., 1972).

## **2.7 Microestruturas do aço AISI D2 após nitretação**

Dentre os tratamentos superficiais, a nitretação, por meio da adição de nitrogênio à camada superficial do aço, promove aumento de dureza superficial e da resistência ao desgaste, além de maior proteção contra a corrosão e contra a fadiga (ASM Handbook; Heat Treating, 1991).

A formação de vácuo no reator, combinada a uma elevada tensão elétrica faz com que íons de nitrogênio da mistura gasosa acelerem e colidam contra a superfície do material. Aliando-se a tais fatores uma gradiente de concentração favorável, o nitrogênio é então adicionado à microestrutura e pode se difundir para camadas de maior profundidade (ASM Handbook; Heat Treating, 1991).

A microestrutura de um aço nitretado a plasma é composta por uma zona de difusão com ou sem camada de compostos (camada branca). Os fatores que influenciam na formação da camada nitretada são: tempo de tratamento, temperatura, tipo e concentração dos elementos de liga do material, pressão e gradiente de concentração do elemento a ser adicionado ao material (ASM Handbook; Heat Treating, 1991).

### **2.7.1 Nitretação do aço AISI D2 em atmosfera com 5% de N<sub>2</sub>, a520°C**

Estudos realizados por Franco Jr (2003), revelam a microestrutura obtida para o aço AISI D2 submetido à nitretação a plasma, em atmosfera com 5% de N<sub>2</sub>,

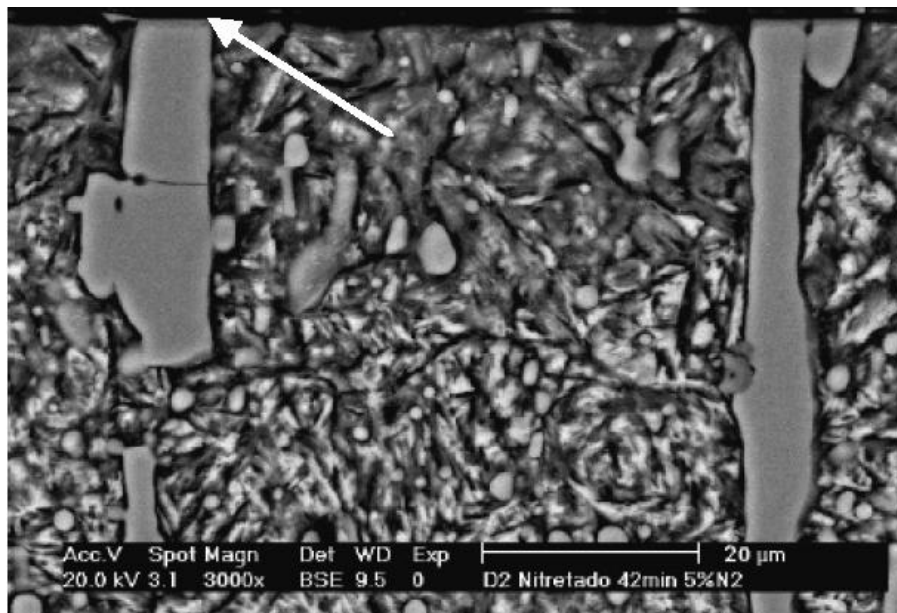
a 520°C e diferentes tempos de tratamento. O tratamento superficial foi realizado a partir de material austenitizado a 1080°C, por 30 minutos, com resfriamento a óleo e revenimento duplo a 540°C, por duas horas cada e resfriamento a ar.

As Figura 2.6 (a) a (d) mostram que após três horas do início da nitretação a plasma não se detecta a presença de carbonetos  $M_7C_3$  na composição química do referido material. Enquanto isso, entre 42 minutos e três horas de nitretação existe um aumento na quantidade de nitreto do tipo CrN na estrutura do aço (FRANCO JR, 2003).

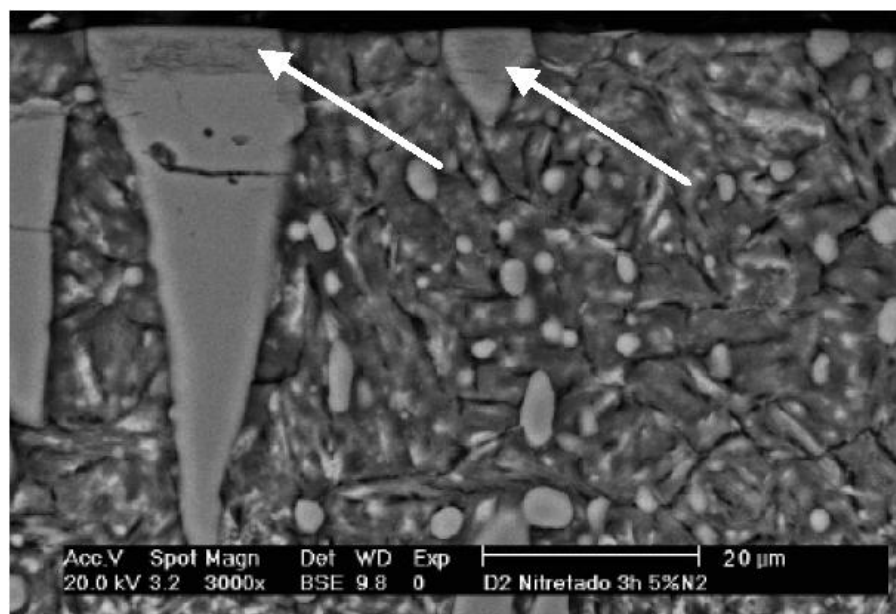
Pode-se observar também que após 11 horas de nitretação, tem-se a formação de camada branca, fato este evidenciado pela detecção de nitretos do tipo  $Fe_{2-3}N-\epsilon$  na microestrutura, conforme mostra a Figura 2.7.

Nota-se a partir da análise das Figura 2.6 (a) a 2.9 (c), através da indicação por setas, a formação de nitretos CrN. Além disso, na Figura 2.6(d) evidencia-se a presença da camada branca (CB) e também a presença de precipitados ao redor dos contornos de grão de austenita, indicados pela seta com sigla NCG (FRANCO JR, 2003).

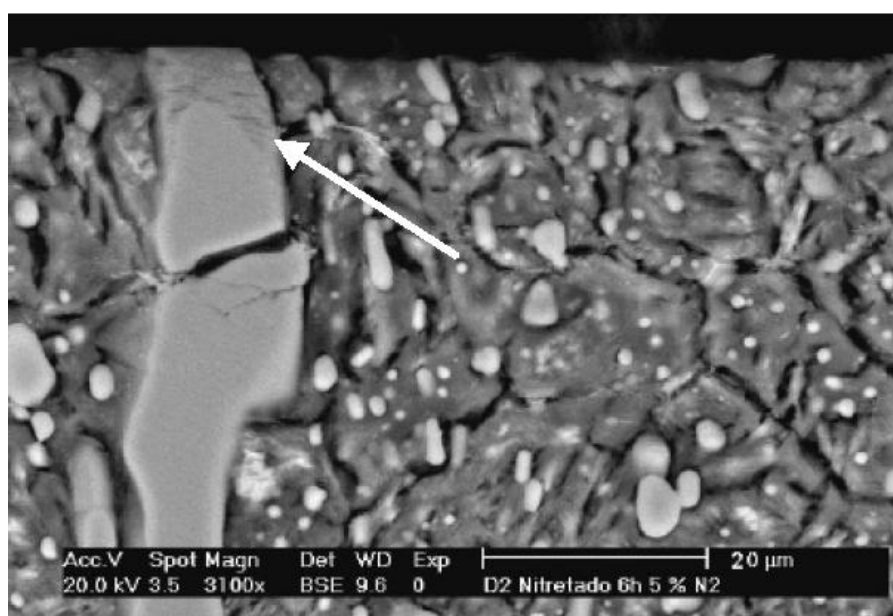
**Figura 2.6 - As imagens de (a) a (d) mostram as diferentes microestruturas obtidas para a nitretação a plasma do aço AISI D2, a 520°C, em atmosfera com 5% de N<sub>2</sub> (JÚNIOR, 2003).**



**(a) Nitretação com duração de 42 min**

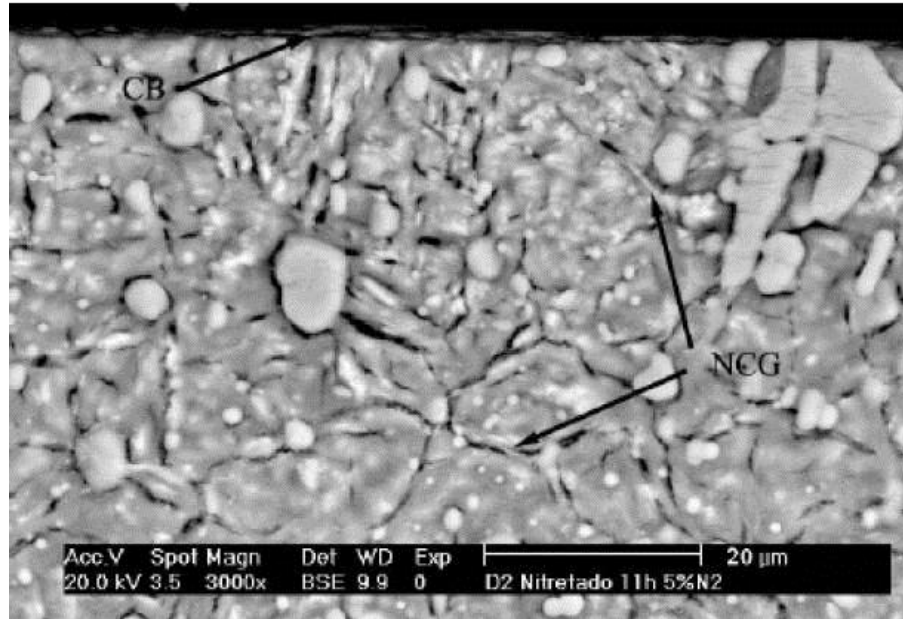


(b) Nitretação com duração de 3 h



(c) Nitretação com duração de 6 h





(d) Nitretação com duração de 11 h. Mostra-se a presença de camada branca (CB) e de precipitados ao redor dos contornos de grão de austenita (NCG).

As imagens das microestruturas obtidas para as condições de tratamento citadas anteriormente, ilustradas nas Figura 2.6(a) a (d), comprovam os dados obtidos através da análise do difratograma de raios-X da Figura 2.7.

A Figura 2.7 mostra os resultados descritos, obtidos pela difração de raios-X. Têm-se as curvas relativas aos diferentes tempos de tratamento e a indicação dos constituintes detectados após decorrerência de cada período (FRANCO JR, 2003).

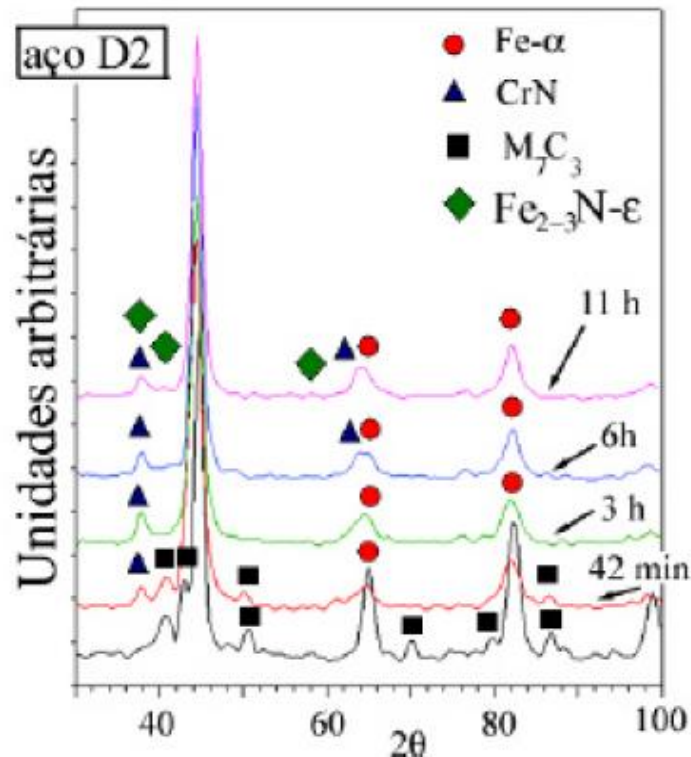


Figura 2.7 - Resultados obtidos pela difração de raios-X para a nitretação a plasma do aço AISI D2, a 520°C, 5% N<sub>2</sub> e diferentes tempos de tratamento. Adaptado de RIBEIRO, 2003.

### 2.7.2 Nitretação do aço AISI D2 em atmosfera com 10% de N<sub>2</sub>, à temperatura de 520°C

Analisando-se ainda os estudos desenvolvidos por Franco Jr (2003), é possível observar diferenças na microestrutura do aço AISI D2, quando submetido à nitretação em atmosfera com 10% de N<sub>2</sub>, a 520°C e diferentes tempos de tratamento. Estão apresentados nas figuras 2.10(a) a 2.10(d) os resultados por ele obtidos.

Percebe-se que com o aumento do teor de nitrogênio na atmosfera de tratamento a formação da camada branca é iniciada após decorrerência menor de tempo.

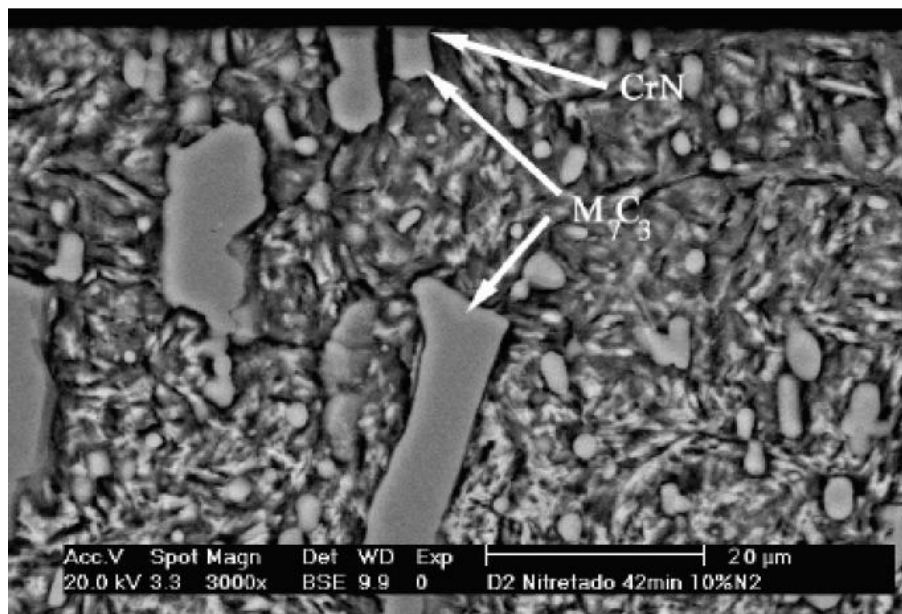
Comparando-se a nova condição de atmosfera, mais rica em N<sub>2</sub>, e efetuando-se a nitretação com os mesmos tempos de tratamento descritos no item anterior é possível verificar as implicações de uma maior concentração de N<sub>2</sub> na microestrutura, isoladamente.

Decorridos 42 minutos do início da nitretação, a presença do carboneto  $M_7C_3$  já é reduzida, dado que passa a se formar  $CrN$  (FRANCO JR, 2003). Para o tratamento realizado com 5% de  $N_2$  e mantidos os demais parâmetros constantes, isso ocorria apenas após três horas.

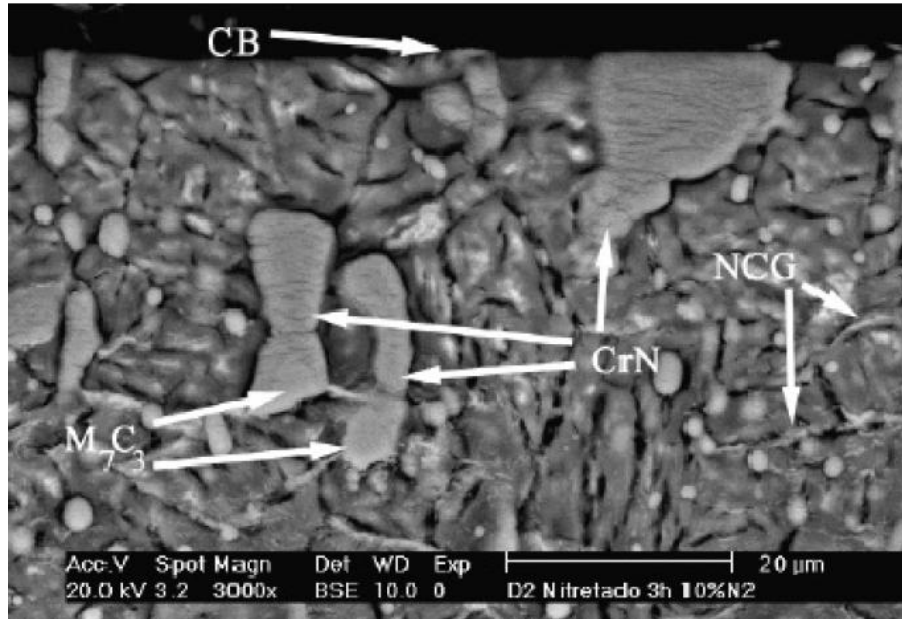
Vê-se que após três horas de tratamento já surgem precipitados ao redor dos contornos de grão da austenita retida (NCG) e também nota-se a existência de fina camada branca (CB), portanto iniciou-se após 42 minutos e antes de três horas (FRANCO JR, 2003).

Além disso, os carbonetos  $M_7C_3$  estão totalmente transformados em  $CrN$  (FRANCO JR, 2003). Para a concentração de 5%, tais mudanças aconteciam apenas após onze horas.

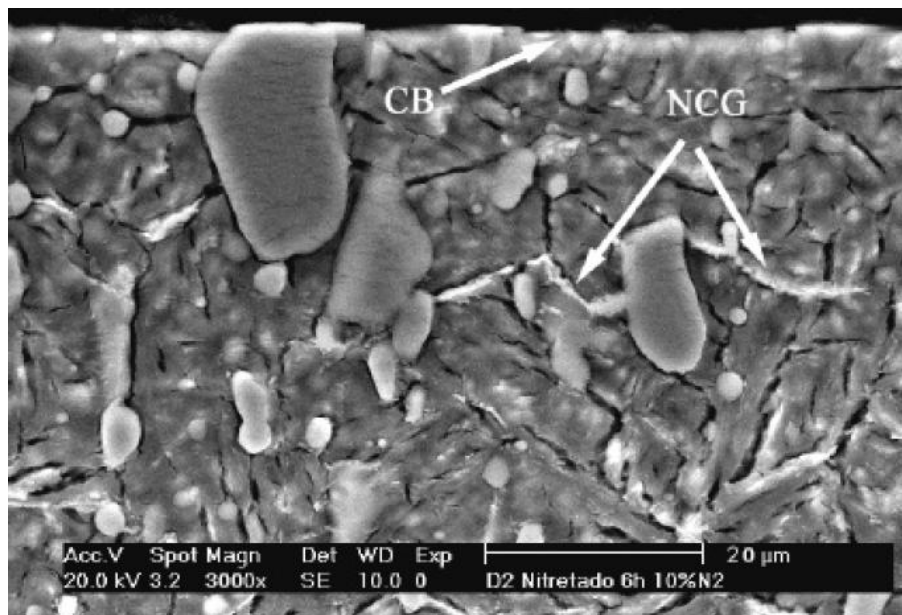
**Figura 2.8 - As imagens de (a) a (d) mostram as diferentes microestruturas obtidas para a nitretação a plasma do aço AISI D2, à 520°C, em atmosfera com 5% de  $N_2$  (JÚNIOR, 2003).**



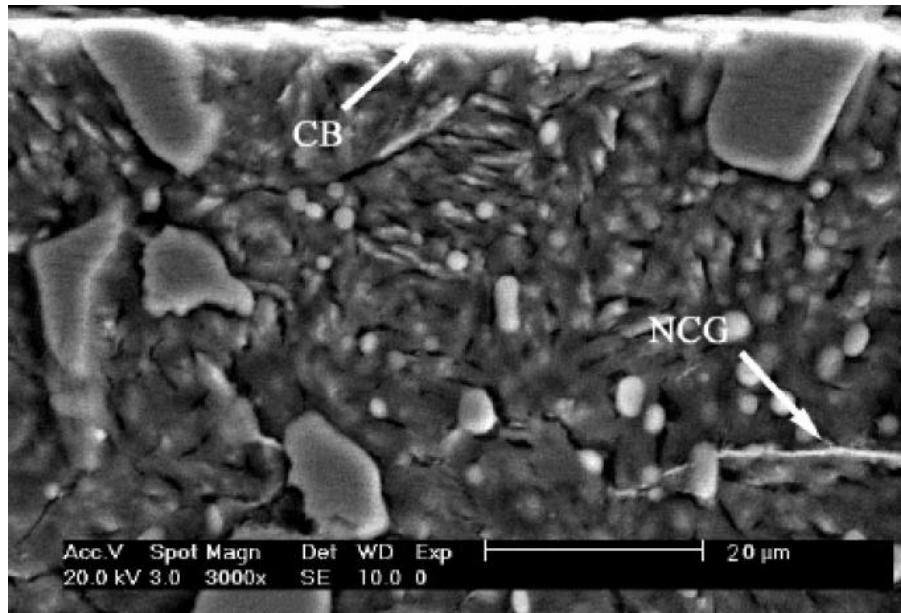
**(a) Nitretação com duração de 42 min. Evidenciam-se os carbonetos  $M_7C_3$  e o  $CrN$ .**



(b) Nitretação com duração de três horas. Presença de camada branca (CB), precipitados ao redor dos contornos de grão da austenita (NCG), carbonetos  $M_7C_3$  e CrN.



(c) Nitretação com duração de seis horas, com camada branca (CB) e precipitados ao redor dos contornos de grão da austenita (NCG).



(e) Nitretação com duração de onze horas com CB e NCG.

### 2.7.3 Nitretação do aço AISI D2 em atmosfera com 20% de N<sub>2</sub>, à temperatura de 520°C

No mesmo estudo citado anteriormente, FRANCO Jr (2003), mostra que para uma concentração de 20% de N<sub>2</sub> na atmosfera de nitretação, após uma hora de nitretação já se tem formação de camada branca (constituída de Fe<sub>2</sub>-3N-ε e Fe<sub>4</sub>-N-γ') (FRANCO JR, 2003). Tal resultado é exibido na figura 7, que marca também significativa presença de precipitados ao redor dos contornos de grão da austenita prévia.

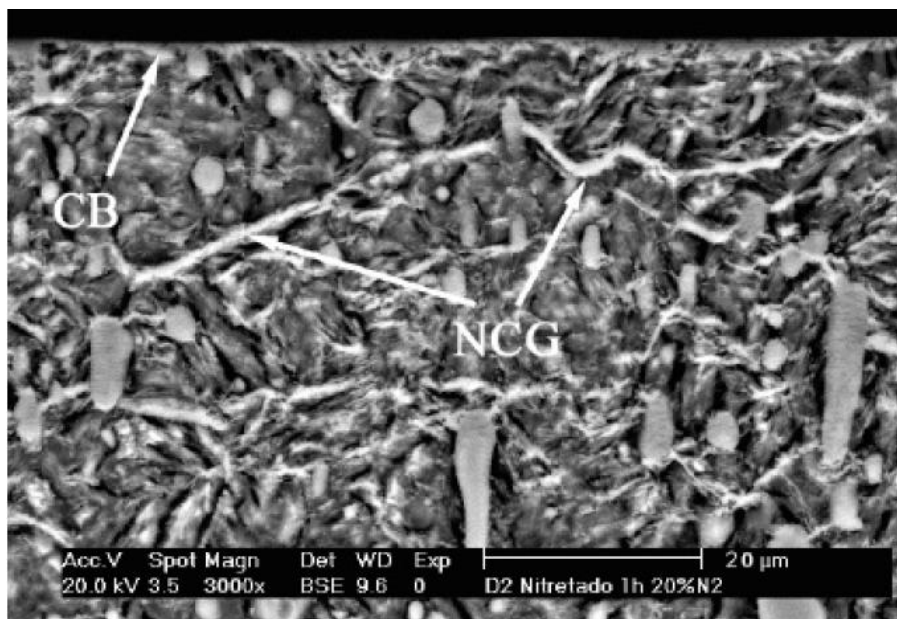


Figura 2.9 - A imagem mostra a microestruturas obtida para a nitretação a plasma do aço AISI D2, a 520°C, em atmosfera com 20% de N<sub>2</sub>, com CB e NCG (JÚNIOR, 2003).

#### 2.7.4 – Curva do início da formação de Camada Branca para o aço AISI D2

Com base nos resultados obtidos experimentalmente e descritos nas seções 2.7.1 a 2.7.3, FRANCO Jr (2003), elaborou uma curva que relaciona a porcentagem de N<sub>2</sub> na atmosfera com o tempo de nitretação e a formação de camada branca para o aço AISI D2.

A Figura 2.10 mostra a curva desenvolvida por FRANCO Jr (2003). Nota-se que, para uma mesma temperatura, quanto maiores os tempos de nitretação e concentração de N<sub>2</sub> na atmosfera, mais rápido inicia-se a formação da camada branca.

Conclui-se então, a partir da análise dos resultados, que para uma mesma pressão e mesma temperatura, pode-se evitar a formação de camada branca no material controlando-se adequadamente o tempo de tratamento e a concentração de N<sub>2</sub> na atmosfera (para demais parâmetros constantes).

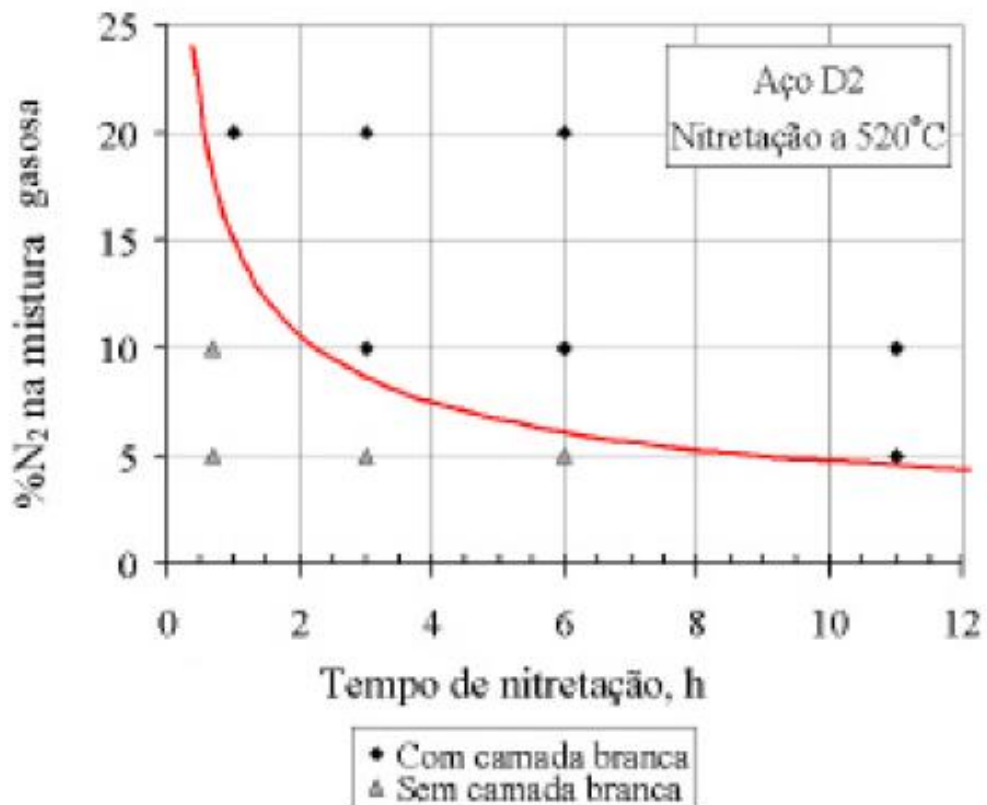


Figura 2.10 - Curva da potencial formação de camada branca na nitretação do aço AISI D2, quando submetido à nitretação a 520°C, diferentes tempos e concentrações de N<sub>2</sub> (FRANCO Jr, 2003).

### 2.7.5 Dureza de perfil das amostras nitretadas a 520°C, com 5% N<sub>2</sub> na mistura gasosa

Além das curvas levantadas, conforme citados nos itens anteriores, FRANCO Jr (2003) também apresentou em seu estudo a relação entre tempos de tratamento e dureza para amostras nitretadas a 520°C, com atmosfera de 5% de N<sub>2</sub>.

Os resultados apresentados são mostrados na Figura 2.11. Indicam que para menores profundidades de camada, até cerca de 0,100mm, quanto maior for o tempo de tratamento, maior será a dureza obtida. No entanto, após tal profundidade, os valores de dureza resultantes dos diferentes tempos de nitretação apresentam valores muito próximos. Portanto, quanto mais longos forem os tratamentos, maior será a dureza das amostras até pequenas profundidades.

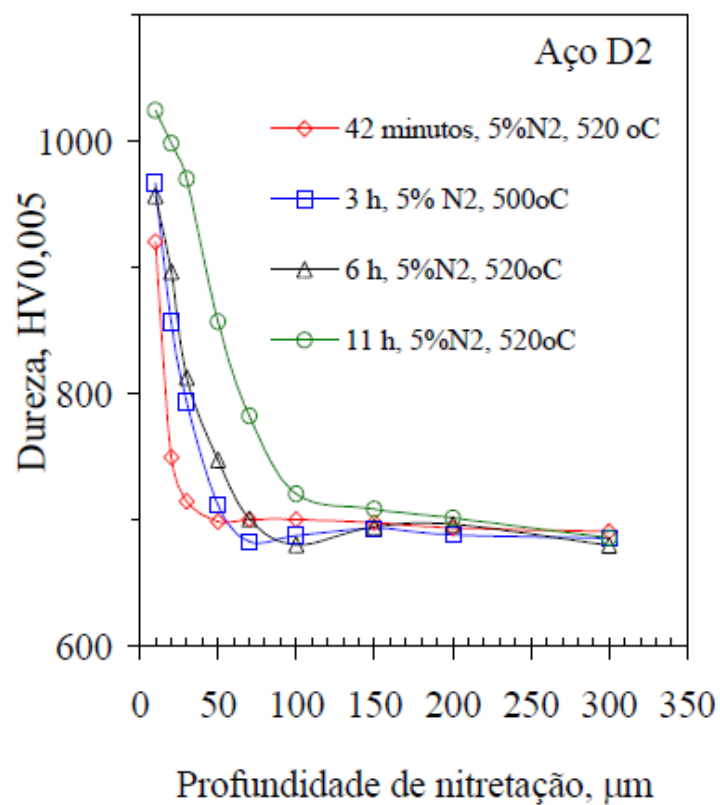


Figura 2.11 - Relação dureza x profundidade de nitretação, para amostras nitretadas a 520°C, 5% N2 e diferentes tempos de tratamento.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Tratamentos térmicos e tratamento de superfície

Para a realização dos experimentos utilizou-se inicialmente um grupo de amostras a partir do estado recozido do aço, como é fornecido pelo fabricante. Neste estado, tem-se como citado anteriormente, uma matriz ferrítica e carbonetos.

O desdobramento dos processos realizados está ilustrado no diagrama da Figura 3.1, que mostra os tratamentos aos quais as amostras de aço AISI D2 foram submetidas.

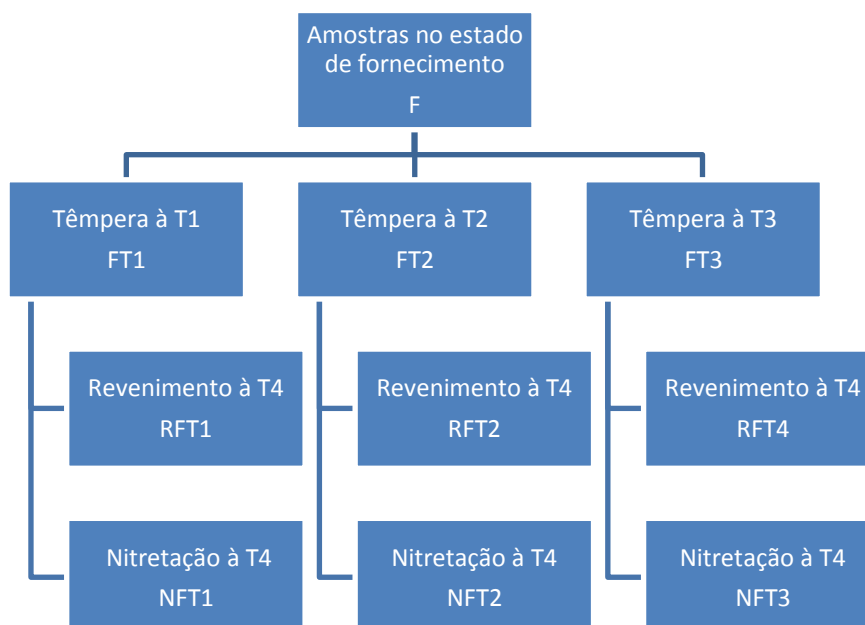


Figura 3.1 - Desdobramento dos tratamentos das amostras

#### 3.2 Aço AISI D2

O aço adquirido para o desenvolvimento do projeto foi produzido pela Villares Metals e comercializado pela “Aço Trio Comércio de Aços Especiais LTDA”. Durante a fase de produção, o aço é submetido à fusão em forno elétrico a arco e seu estado final para venda é o recozido.

A Tabela 3.1 apresenta a composição química do aço utilizado para a realização do projeto, com a porcentagem em peso de cada elemento constituinte da liga, conforme consta no Certificado de Qualidade do fornecedor, incluído no Apêndice A, Figura 5.1.

**Tabela 3.1- Composição química do aço AISI D2**

<b>Elemento</b>	<b>% em peso</b>	<b>Elemento</b>	<b>% em peso</b>
<b>C</b>	1,53	<b>Ni</b>	0,22
<b>Si</b>	0,40	<b>V</b>	0,74
<b>Mn</b>	0,36	<b>W</b>	0,09
<b>P</b>	0,024	<b>Cu</b>	0,05
<b>S</b>	< 0,001	<b>Ti</b>	0,006
<b>Co</b>	0,03	<b>Nb</b>	<0,01
<b>Cr</b>	11,54	<b>Al</b>	0,030
<b>Mo</b>	0,74	<b>B</b>	<0,005
<b>N</b>	0,0019	<b>Sn</b>	<0,005

A barra de aço adquirida para o presente estudo tinha dimensões de 200mm x 50mm x 60mm. O corte parcial do material foi realizado pela Aço Trio Comércio de Aços Especiais, que fez o corte em quatro chapas de 13mm x 200mm x 50mm. No entanto, o corte não garantiu a precisão dimensional da espessura ao longo das chapas, e o erro dimensional resultante foi de  $\pm 2$ mm.

O restante dos cortes foi realizado na empresa Case New Holland. Através do uso de serra-fita cortou-se o material em amostras com dimensões aproximadas de 13mm x 10mm x 50mm. No total, foram cortadas 28 amostras.

### 3.3 Têmpera

Para a realização da têmpera foram utilizadas três temperaturas de austenitização diferentes. Dividiram-se assim as amostras em três grupos de acordo com as temperaturas de austenitização: 900°C (T1), 1080°C (T2) e 1200°C (T3).

As austenitizações tiveram duração de 30 minutos cada e a têmpera foi feita com resfriamento a ar forçado usando-se ventilador. Para a realização dos tratamentos foi utilizado o forno da marca EDGCON EQUIPAMENTOS, modelo EDGECON 3P, propriedade da UTFPR. As amostras foram colocadas no centro do forno.

Para as amostras temperadas, a terminologia adotada para referenciá-las foi adotada de acordo com as temperaturas de austenitização. FT1 para 900°C, FT2 para 1080°C e FT3 para 1200°C.

Para aferição da temperatura durante o processo, utilizou-se termômetro da marca ICEL Manaus, modelo TD-911, e um termopar do tipo K, da Universidade. O termômetro mencionado tem capacidade para efetuar medições até 1300°C, adequado, portanto à realização dos experimentos, mostrado na Figura 3.2.

As diferenças de temperatura entre o termopar do forno e a medição por termômetro foram corrigidas, tomando-se como referência o valor indicado no termômetro.

No caso da têmpera à T1, o forno indicava uma temperatura média 10°C menor do que a temperatura real medida, conforme ilustra a figura 11. Portanto, foi ajustado para aquecer até 1070°C. Já para a têmpera à T2, o forno indicava uma temperatura 5°C maior do que a temperatura real medida, ajustado para aquecer até 895°C. Para a têmpera à T3, o forno indicava temperatura 10°C menor do que a real, portanto, indicava 1190°C, quando o termômetro media 1200°C.



**Figura 3.2 - Aferição da temperatura do forno**

Foram submetidas três amostras à austenitização a 1080°C e o mesmo ocorreu para o tratamento a 900°C e 1200°C. Uma amostra de cada grupo resultante das têmperas destinou-se à análise microestrutural e de dureza. As restantes, à realização de revenimento e nitretação, conforme indicado na Figura 3.1, que mostra a sequência dos tratamentos.

### 3.4 Revenimento

O revenimento das amostras foi realizado utilizando-se o forno marca EDGCON EQUIPAMENTOS, modelo EDGECON 3P, propriedade da UTFPR. O controle da temperatura foi realizado do mesmo modo descrito anteriormente para a têmpera.

Após o forno ter sido aquecido a 520°C, com variação de até  $\pm 10^\circ\text{C}$ , as amostras temperadas foram submetidas ao tratamento de revenimento durante o período de duas horas. Transcorrido este tempo, as amostras foram retiradas do forno e submetidas a resfriamento a ar calmo.

### 3.5 Nitretação a plasma

As nitretações a plasma foram realizadas no LabPlasma da UTFPR. Foi utilizado o reator do laboratório, com câmara de vácuo de diâmetro 300mm e comprimento 300mm, a capacidade máxima do equipamento é de 700V e 5A.

A primeira nitretação teve caráter de teste e foi executada com o intuito de se observarem o comportamento dos parâmetros temperatura, tempo e pressão ao longo do tratamento. Variações ocorrem em resposta à adição dos gases à mistura e também são necessárias para se alcançarem e manterem pressão e temperatura em valores desejados para o processo.

Depois da conclusão do primeiro tratamento, de teste, fez-se então uma análise dos dados obtidos e também da microestrutura das amostras e do perfil de dureza das mesmas para planejamento da nitretação definitiva.

A composição da mistura de gases adotada para a realização do tratamento (definitivo) está ilustrada na Tabela 3.2. As amostras foram colocadas em porta-amostra retangular, após terem sido devidamente preparadas com lixamento, polimento e limpeza.

**Tabela 3.2 – Composição da mistura gasosa utilizada na nitretação a plasma**

Gases	Composição da mistura
N <sub>2</sub>	5%
H <sub>2</sub>	75%
Ar	20%

Foram então colocadas no reator as amostras FT1, FT2, FT3 e iniciou-se o vácuo. Durante todo o período do tratamento superficial, foram controlados: pressão, temperatura, e tensão.

Após 11 minutos de tratamento, obteve-se o vácuo e foram então adicionados à atmosfera do reator os gases Ar e H<sub>2</sub>. Após 38 minutos, quando o reator atingiu a temperatura de 507°C, foi adicionado o N<sub>2</sub>. A temperatura desejada, de 520°C, foi então alcançada após dois minutos a partir da adição do N<sub>2</sub>.

A temperatura foi controlada de modo a se manter, durante todo o tratamento, a faixa 520±10°C que foi a mesma faixa de temperaturas mantida durante o revenimento.

Ambos os tratamentos, revenimento e nitretação, foram realizados por duas horas o que possibilitou a comparação dos resultados dos dois processos. Sendo que o tempo de nitretação começou a ser marcado após a adição do fluxo de N<sub>2</sub> ao reator e o de revenimento a partir do momento em que foi atingida a temperatura desejada.

### 3.6 Preparação das amostras

Todas as amostras, de dimensão inicial 13 mm x 10 mm x 50 mm, foram cortadas para posterior embutimento utilizando-se a Cortadeira de Amostras Metalográficas da marca Struers, modelo Discotom.

O embutimento a quente foi feito pela máquina Predopress, também da Struers. Para facilitar o processo posterior de lixamento, usou-se para o embutimento dos materiais granalha de aço. Os parâmetros usados para o

embutimento foram: tempo de pré-aquecimento de 5 minutos, aquecimento de 10 minutos, resfriamento de 5 minutos e força de 35 kN.

As amostras foram lixadas utilizando-se Lixadeiras Metalográficas Duplas, da Struers, modelo Knuth Rotor. As lixas utilizadas tinham as seguintes graduações, respectivamente à sequência do processo executado: n°220, 320, 400 e 600. Em alguns casos, fez-se necessário também, o uso de lixas n°120 para garantir a planicidade das amostras.

O polimento parcial foi feito usando-se a Politriz Metalográfica APL-4 AROTEC com solução de diamante de 3 $\mu$ m. Fez-se a finalização do polimento com a máquina para Polimento Metalográfico DP-10, da Struers, com pasta de diamante de 1 $\mu$ m.

### **3.6.1 Análise da microestrutura**

Para a análise das microestruturas resultantes da têmpera, em uma única baquelite foram colocados os dois materiais resultantes das austenitizações de 900°C e 1080°C. Para a distinção dos materiais na baquelite, os pedaços cortados das amostras foram identificados através de distinção geométrica, FT1 com um chanfro e FT2 com dois. Os chanfros foram feitos com o uso de lixa 80, em Lixadeira Metalográfica Dupla, da marca Struers, modelo Knuth Rotor.

A amostra do material austenitizado a 1200°C foi embutida em baquelite individual, já que a decisão de se adotar mais esta temperatura para a têmpera foi tomada após a análise dos resultados das duas outras amostras citadas acima.

O embutimento dos materiais na mesma baquelite proporciona a comparação das microestruturas quando submetidas a um mesmo ataque. Espera-se com isso observarem-se os diferentes efeitos da temperatura de austenitização sobre a quantidade de austenita retida nas microestruturas, que provoca visíveis diferenças na metalografia.

Para o ataque fez-se reativo NITAL 10%. A amostra do estado recozido permaneceu em contato com a solução durante 30s. Já a baquelite com as amostras temperadas ficou sujeita a ataque por 30s.

Após ataque, as amostras foram examinadas em Microscópio Óptico, modelo BX51, da Olympus. As imagens das microestruturas foram tiradas com o auxílio do software Image Pro Plus.

As amostras foram então submetidas a polimento com pasta de diamante de 1µm novamente, para remover a camada atacada do material e fez-se novo ataque com solução Behara por 30s. A composição desta solução é: 85ml de água, 15ml de HCl e 1g de Bissulfito de Potássio.

### 3.6.2 Análise da microestrutura

Para a análise microestrutural das amostras, foram usadas diferentes soluções de ataque, com o objetivo de se observar quais se mostravam mais adequadas para cada produto dos tratamentos.

Na Tabela 3.2 são mostradas as soluções usadas nas metalografias que estão apresentadas neste trabalho por terem evidenciado bom resultado. Os tempos de ataque utilizados estão indicados nas legendas das figuras mostradas na seção Análise das microestruturas.

**Tabela 3.3 - Relação de amostras e ataques utilizados para metalografia**

Amostras Soluções	FT1	FT2	FT3	RFT1	RFT2	RFT3	NFT1	NFT2	NFT3
<b>Nital 5%</b>				X	X	X	X	X	X
<b>Nital 10%</b>									
<b>Behara</b>	X	X	X						
<b>Villela</b>	X	X	X	X	X				



### **3.6.3 Medições de dureza**

#### **3.6.3.1 Dureza Rocwell**

A medição de dureza Rockwell C foi feita com o durômetro Wilson - CIGM, utilizando-se penetrador cônico diamantado. Amostras foram cortadas utilizando-se a Cortadeira de Amostras Metalográficas da Struers, Discotom para a realização das medições, para evitar que a deformação da baquelite tivesse influência sobre os resultados. Foram realizadas sete medições de dureza em cada material: FT1, FT2, FT3, RFT1, RFT2 e RFT3.

O posicionamento das identações foi realizado respeitando-se os valores estabelecidos por norma, que determina que a distância entre as identações deva ser de no mínimo 2,5 vezes a medida do diâmetro (ASM Handbook; Mechanical Testing and Evaluation, 2000).

### 3.6.3.2 Dureza Vickers

A dureza Vickers foi medida com o uso do durômetro M4C-025-G3M, Emco-Test da UTFPR, com carga de 29,43 N e tempo de aplicação de carga de 3 segundos. As medições realizadas no teste de macro dureza foram realizadas em pontos aleatórios das amostras, com distâncias maiores do que três vezes a medida da diagonal das indentações.

Também foram feitas medições de dureza com o equipamento de propriedade da UTFPR, Shimadzu HVM-2, com o objetivo de se obter perfis de dureza das amostras temperadas e revenidas e também das amostras temperadas e nitretadas para comparação.

Para as medições de dureza das amostras temperadas usou-se HV 0,1 – 980,7 mN, e aplicação de carga durante 10 segundos. Já para as amostras nitretadas, usou-se carga menor, HV 0,05 – 490,3 mN, por 15s.

Tanto para as amostras revenidas quanto para as nitretadas, foram medidos três perfis de dureza. Dois perfis com distância de pelo menos 2,5mm a partir da superfície lateral das amostras, para se desprezar efeitos de borda ocasionados pela nitretação (devido ao formato retangular e pequena seção das amostras). E o terceiro perfil foi medido no centro da amostra.

Os espaçamentos adotados entre as indentações são mostrados na Tabela 3.4. Adotaram-se tais profundidades para as medições com o objetivo de se verificar diferenças entre a dureza obtida na superfície e no núcleo das amostras. Também se respeitou o espaçamento mínimo entre medidas, de 2,5 vezes o tamanho da diagonal da impressão do penetrador, de acordo com valores estabelecidos por norma (ASM Handbook; Mechanical Testing and Evaluation, 2000).

**Tabela 3.4 - Profundidades adotadas para a medição de dureza das amostras revenidas e nitretadas, valores em mm.**

	<b>Profundidades de medição em mm</b>				
<b>Dureza superficial</b>	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050
	0,060	0,070	0,080	0,090	0,100
	0,200	0,250	0,300	-	-
<b>Dureza do núcleo</b>	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000

## **4 RESULTADOS**

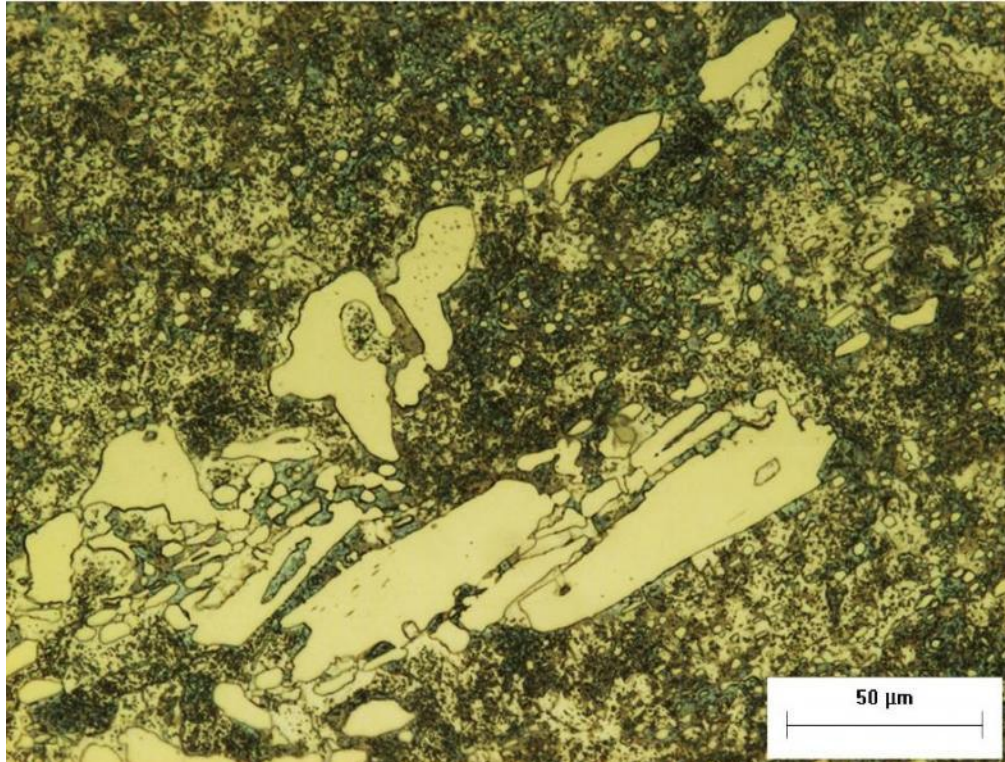
Apresentam-se neste capítulo os principais resultados obtidos na realização do projeto.

### **4.1 Análise das microestruturas**

Mostram-se a seguir as fotografias obtidas a partir da análise metalográfica das amostras provenientes das diferentes etapas do projeto, conforme descrito na seção Materiais e Métodos e ilustrado na Figura 1.1.

#### **4.1.1 Aço AISI D2 no estado recozido**

A Figura 4.1 mostra imagem do aço AISI D2 no estado recozido, como é comercializado. Percebem-se na microestrutura a existência de carbonetos secundários, de tamanho pequeno, com formato globular e também carbonetos primários, maiores além da matriz ferrítica de cor clara, ao fundo.



**Figura 4.1 - Aço AISI D2 no estado recozido, como é fornecido. Ataque com Nital 10%. Notam-se carbonetos globulares pequenos e grandes em matriz de ferrítica.**

#### **4.1.2 Microestruturas resultantes da têmpera**

As imagens a seguir mostram as microestruturas do aço AISI D2 submetido à têmpera, nas condições descritas na Seção Materiais e Métodos.

##### **4.1.2.1 Aço AISI D2 temperado a partir do estado recozido, à temperatura de austenitização de 900°C por 30 minutos e resfriamento a ar forçado.**

A Figura 4.2 mostra a metalografia do AISI D2 após austenitização a 900°C e têmpera com resfriamento a ar forçado, atacado com Nital 10%. A Figura 4.3 apresenta a mesma amostra, porém após um segundo ataque, realizado com Behara. Este último permitiu melhor visualização dos carbonetos secundários da microestrutura, conforme se pode perceber ao comparar a Figura 4.3 com, a Figura 4.2.

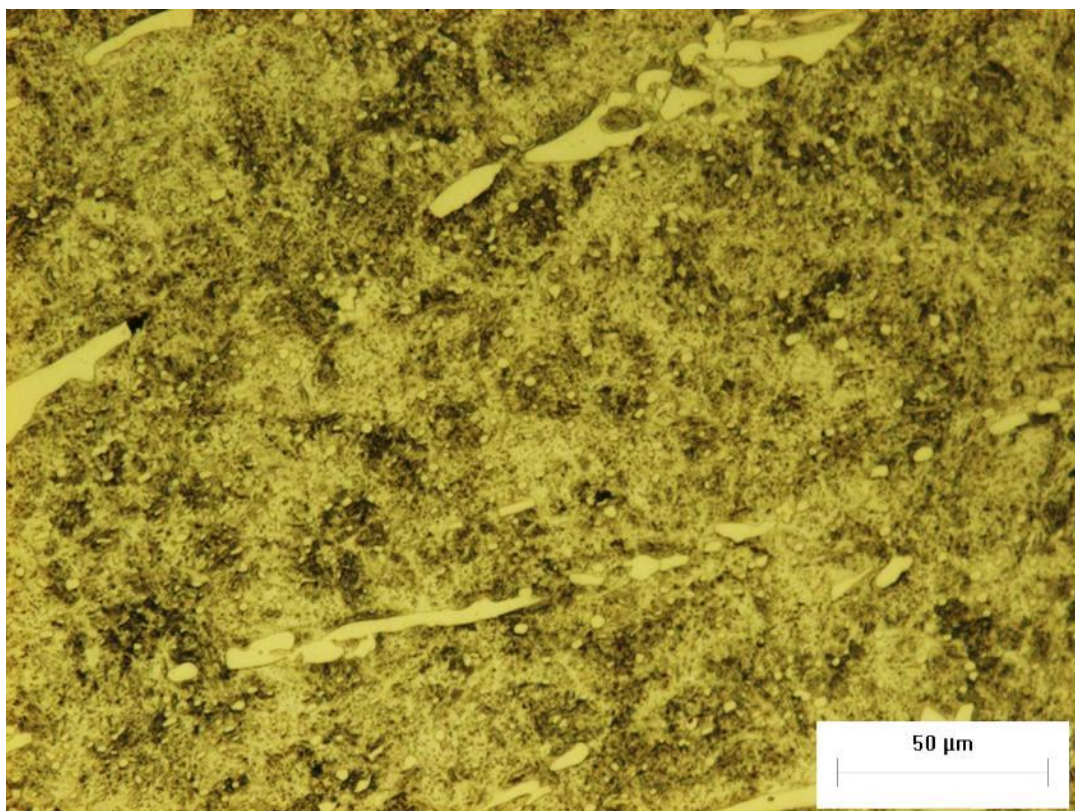


Figura 4.2 - Microestrutura do aço AISI D2 submetido a têmpera com austenitização a 900°C (T1), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Nital 10% por 30s.

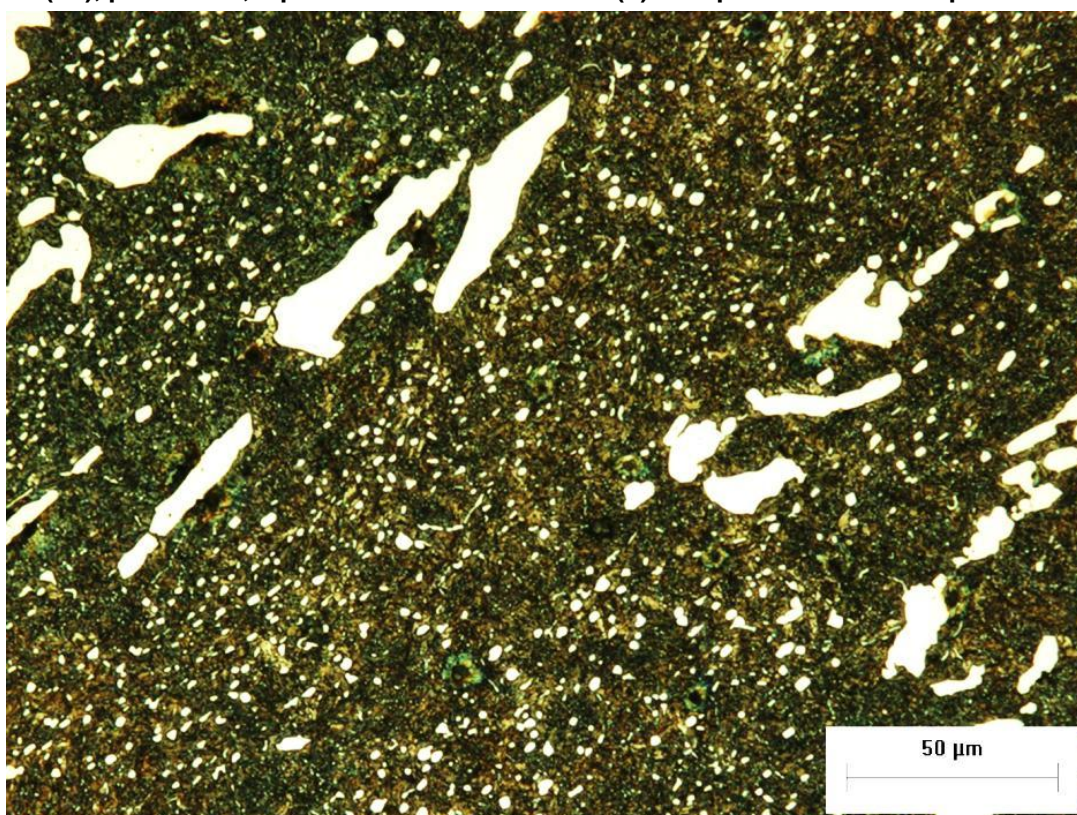


Figura 4.3 - Microestrutura do aço AISI D2 quando submetido à temperatura de austenitização de 900°C (T1), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Behara por 30s.

#### **4.1.2.2 Aço AISI D2 temperado a partir do estado recozido, à temperatura de austenitização de 1080°C por 30 minutos e resfriamento a ar forçado.**

Na Figura 4.4, tem-se a metalografia resultante da austenitização do aço a 1080°C com o mesmo processo de têmpera aplicado às demais amostras. Ou seja, austenitização por 30 minutos com têmpera por resfriamento a ar forçado.

Percebe-se que as amostras austenitizadas a 900°C, cuja metalografia está ilustrada na Figura 4.3, apresentaram melhor resposta ao ataque do que as amostras austenitizadas a 1080°C, Figura 4.4. Os materiais foram embutidos na mesma baquelite, portanto sujeitos às mesmas condições de ataque, o que permite tal comparação.

Também para o ataque realizado com Behara obteve-se melhor visualização da microestrutura, conforme se pode perceber ao comparar as Figura 4.4 e Figura 4.5. Nota-se na Figura 4.5 e Figura 4.6a presença de martensita em ripas na microestrutura.

O contraste obtido após ataque com Behara para a amostra FT2, da Figura 4.6, é um indício de que existe austenita retida na microestrutura. No entanto, apenas com a análise metalográfica não é possível quantificá-la. As áreas azuis, próximas a regiões mais escuras, apontam para a existência de dois microconstituintes na região.

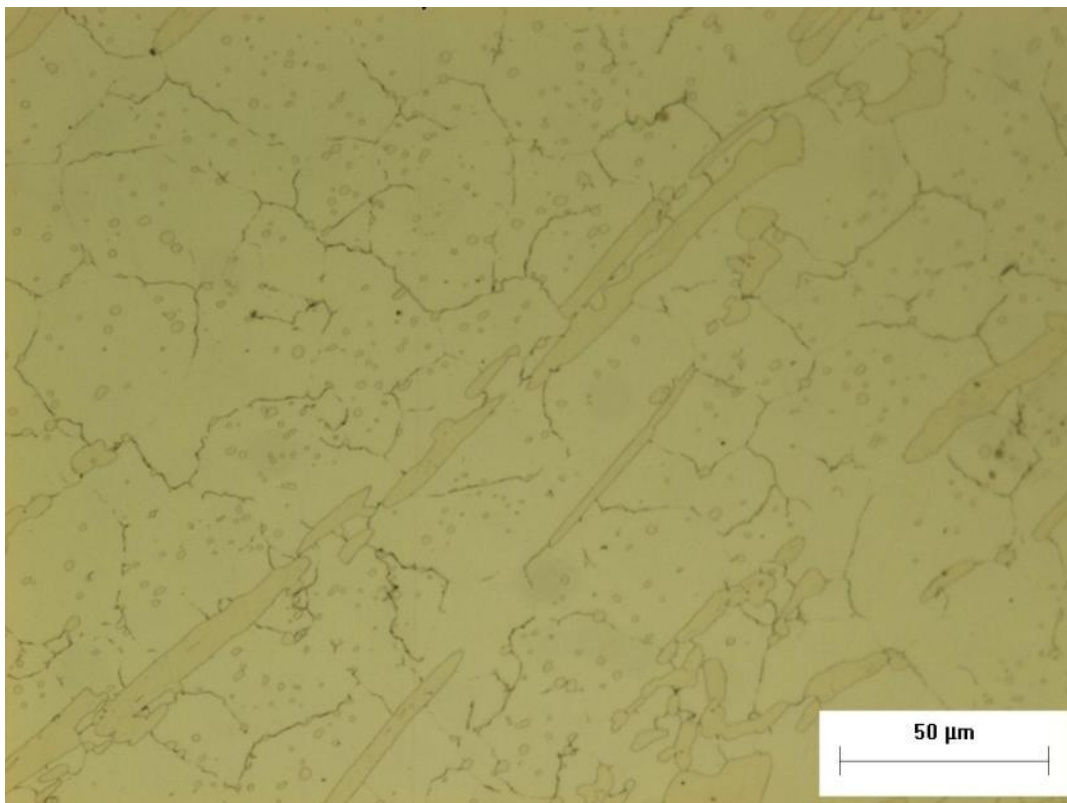


Figura 4.4 - Microestrutura do aço AISI D2 submetido a têmpera com austenitização a 1800°C (T2), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Nital 10%.

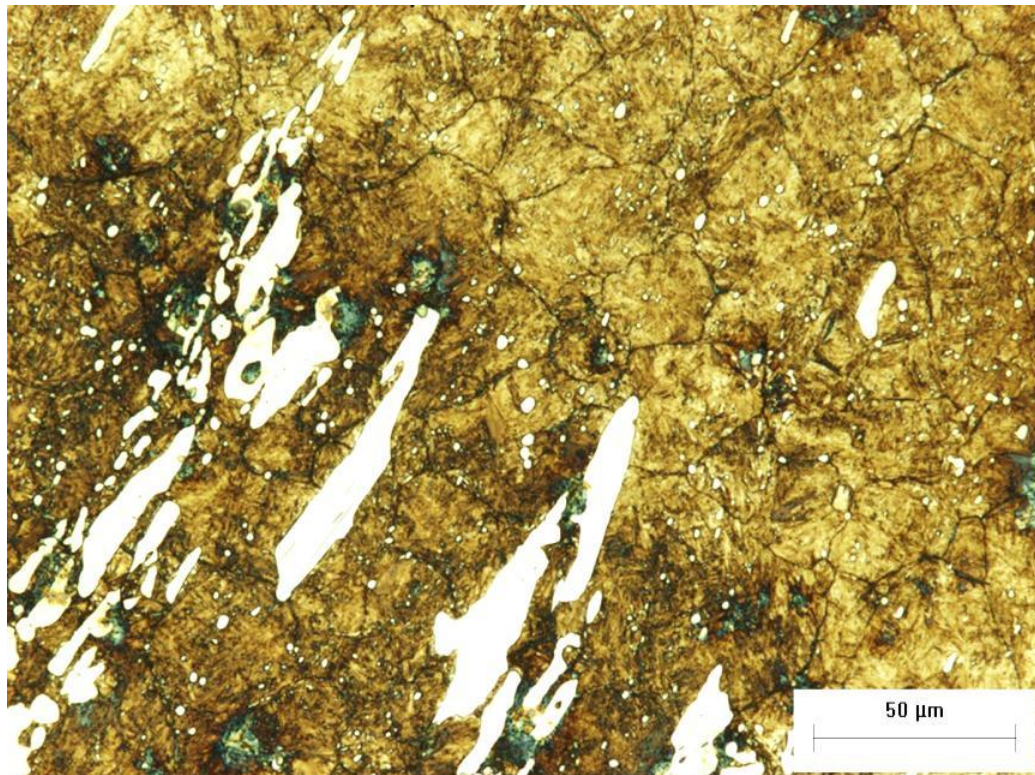
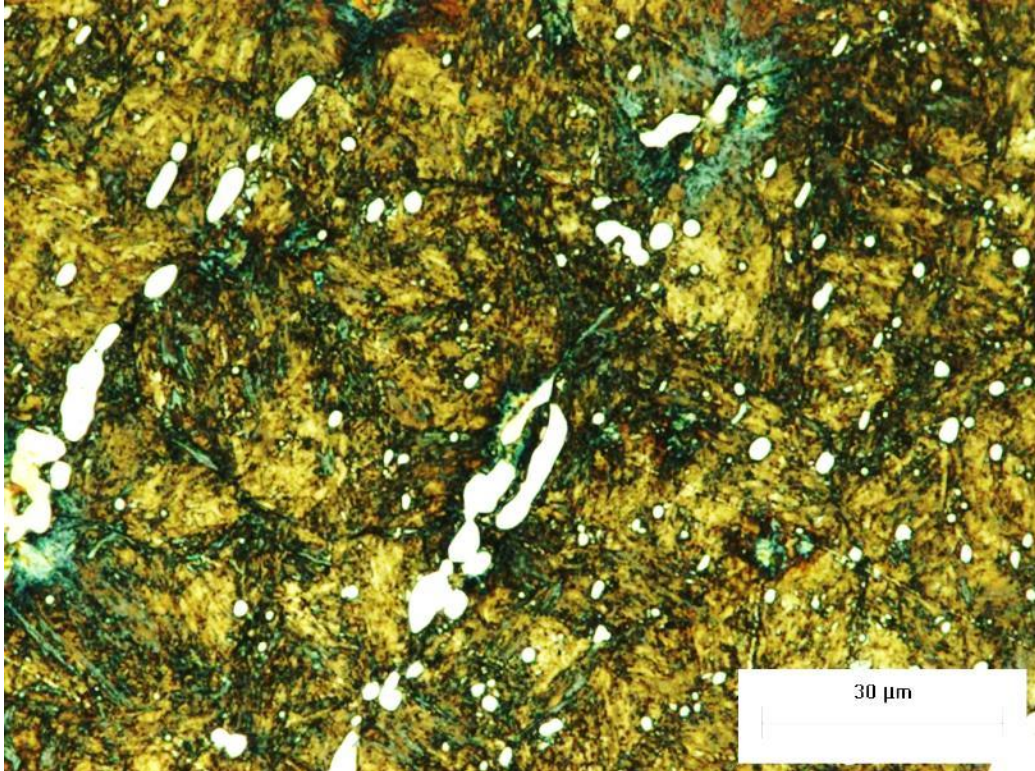


Figura 4.5 - Microestrutura do aço AISI D2 quando submetido à temperatura de austenitização de 1080°C (T1), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Behara.





**Figura 4.6 – Detalhe da metalografia da amostra FT2, com contraste acentuado.**

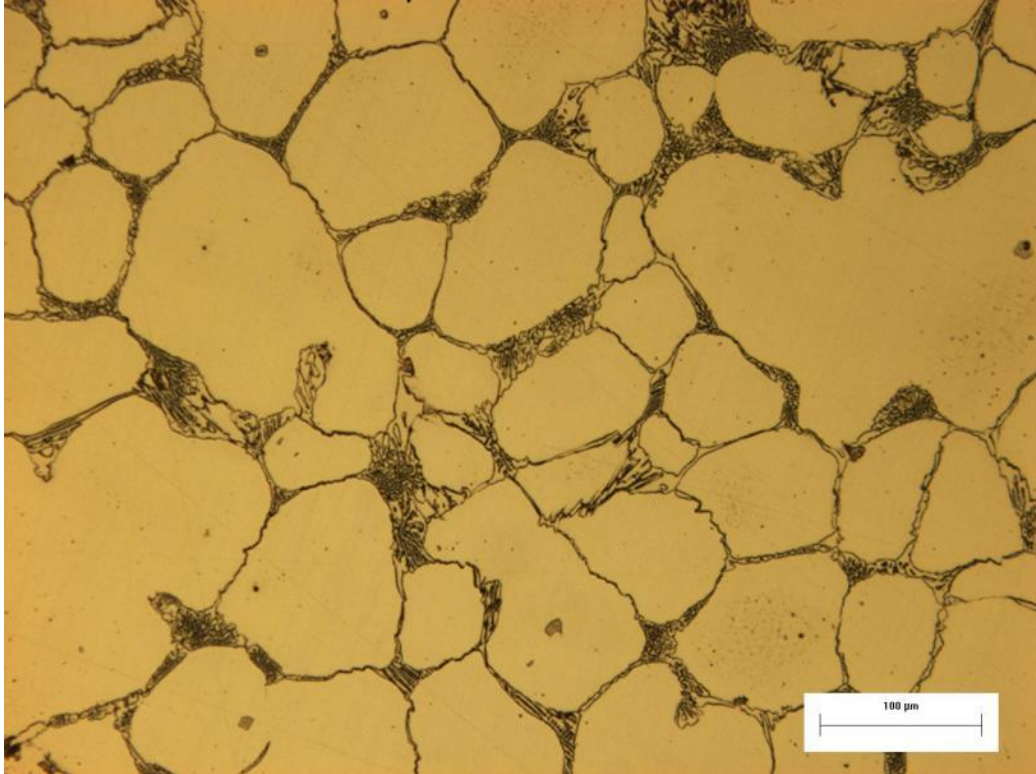
#### **4.1.2.3 Aço AISI D2 temperado a partir do estado recozido, à temperatura de austenitização de 1200°C por 30 minutos e resfriamento a ar forçado.**

Tem-se a seguir a microestrutura do aço AISI D2 obtida após austenitização a 1200°C por 30 minutos, seguida de têmpera a ar forçado. As Figuras 4.7 a 4.9 mostram a metalografia das amostras FT3, em diferentes níveis de detalhe.

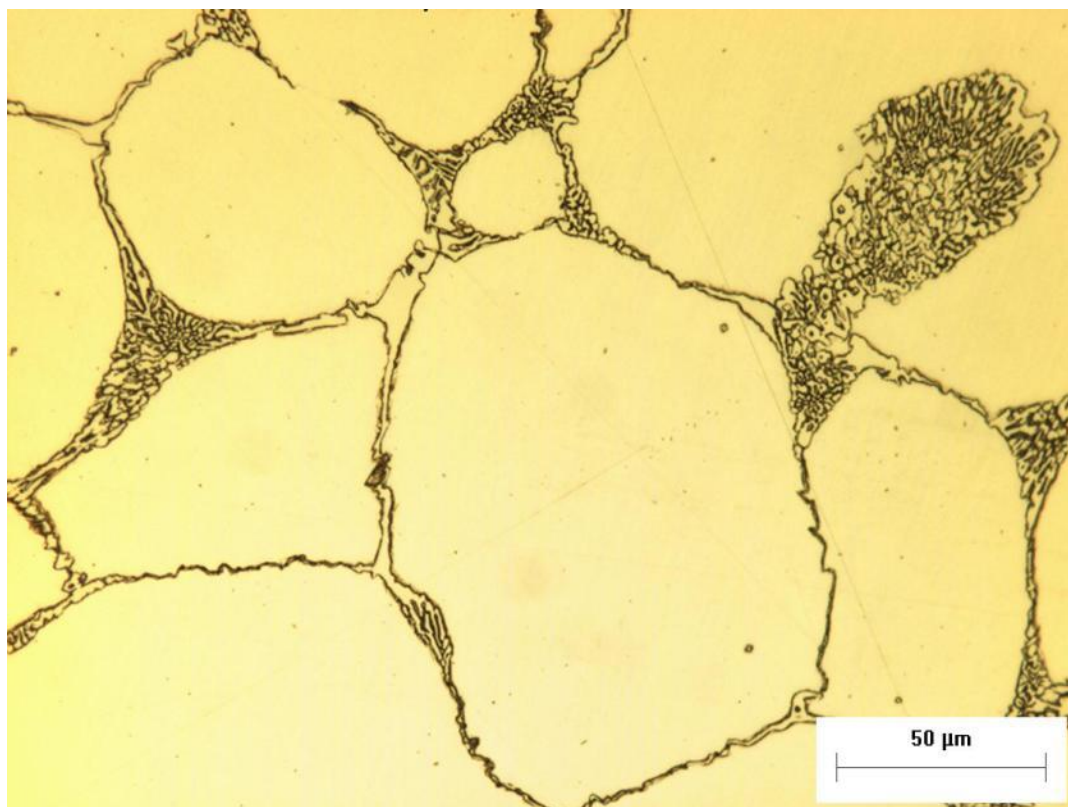
Pode-se perceber, ao analisar a Figura 4.7, que a elevada temperatura de austenitização promoveu a dissolução de grande parte dos carbonetos. Nota-se que a presença dos carbonetos ficou restrita a pequenas áreas circundadas por uma matriz clara, que se acredita ser rica em austenita retida.

A Figura 4.8 evidencia que os “contornos de grão” do material são formados por carbonetos que em boa parte da microestrutura estão bastante dissolvidos. No topo da imagem observa-se um contorno defeito, o que sugere que o processo de dissolução foi fortemente influenciado pela alta temperatura de austenitização e mais carbono seria transferido para a matriz caso o processo durasse mais tempo.

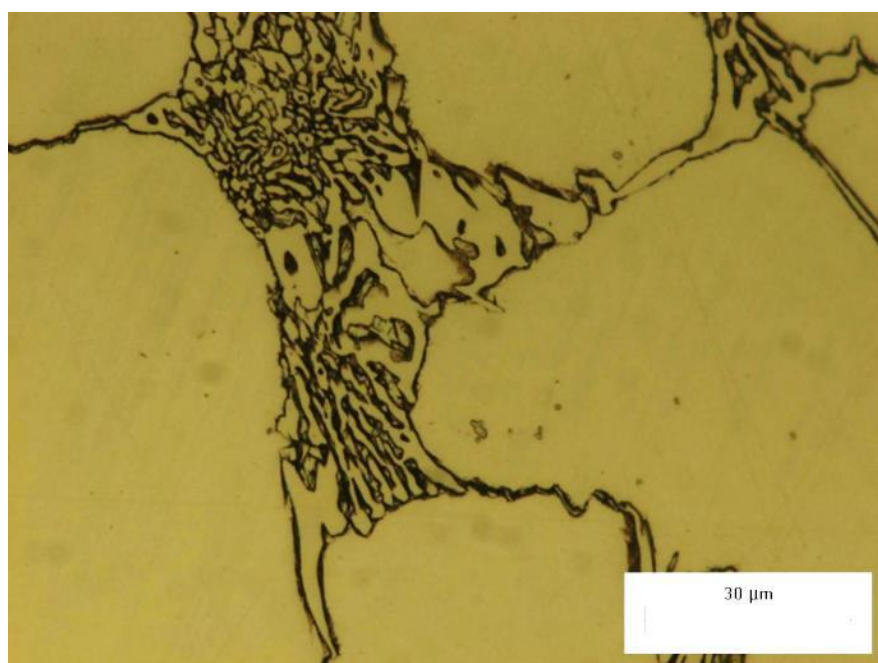
O aspecto da microestrutura indica a ocorrência de liquação, sugerindo que as elevadas temperaturas locais provocaram reações eutéticas cujos produtos se localizaram nos contornos de grão do material.



**Figura 4.7 - Microestrutura do aço AISI D2 quando submetido à temperatura de austenitização de 1200°C (T3), por 30 min, a partir do estado Recozido (F). Ataque com Villela.**



**Figura 4.8 - Detalhe dos contornos de grão da microestrutura do aço AISI D2 referente a T3, ataque com Villela.**



**Figura 4.9 - Detalhe de carboneto presente na microestrutura de T3, ataque com Villela.**

#### 4.1.2.4 Comparação das microestruturas resultantes das têmperas

Ao analisarem-se as microestruturas das têmperas correspondentes às amostras FT1, FT2 e FT3, nota-se que o aumento da temperatura de austenitização é proporcional a maior solubilização de carbonetos. Comparando-se as imagens 4.3, 4.5 e 4.7, nota-se que, à medida que as temperaturas aumentam, o aço passa a apresentar carbonetos menores e em menor quantidade.

Se forem confrontadas ainda essas imagens com a microestrutura do estado recozido do material, tal efeito fica ainda mais evidente. No estado recozido, ilustrado na Figura 4.1, os carbonetos são muito maiores do que os observados em FT1, por exemplo.

Pode-se perceber nas microestruturas correspondentes a FT1 e FT2, a presença de martensita em ripas. No entanto, não se observa martensita nas metalografias de FT3.

Tal resultado é coerente, uma vez que ao elevarem-se as temperaturas de austenitização, a temperatura  $M_s$  cai. Então o que se espera é que diminua a quantidade de martensita e aumente a quantidade de austenita retida no aço.

Para FT1, austenitizada a  $900^\circ\text{C}$  (Figura 4.3), o tamanho de grão é menor do que o da amostra austenitizada a  $1800^\circ\text{C}$ , FT2 (Figura 4.5). Constata-se então que os resultados obtidos estão condizentes com o esperado, ou seja, maiores temperaturas de austenitização correspondem a maiores tamanhos de grão de austenita.

### 4.1.3 Microestruturas resultantes do revenimento

#### 4.1.3.1 Aço AISI D2 revenido durante duas horas a 520°C, a partir do estado temperado FT1

Apresenta-se a seguir a microestrutura do aço AISI D2, após os seguintes tratamentos: austenitização a 900°C por 30 minutos, com resfriamento a ar forçado e revenimento a 520°C, por duas horas. Observam-se carbonetos  $M_7C_3$  em uma matriz de martensita revenida.

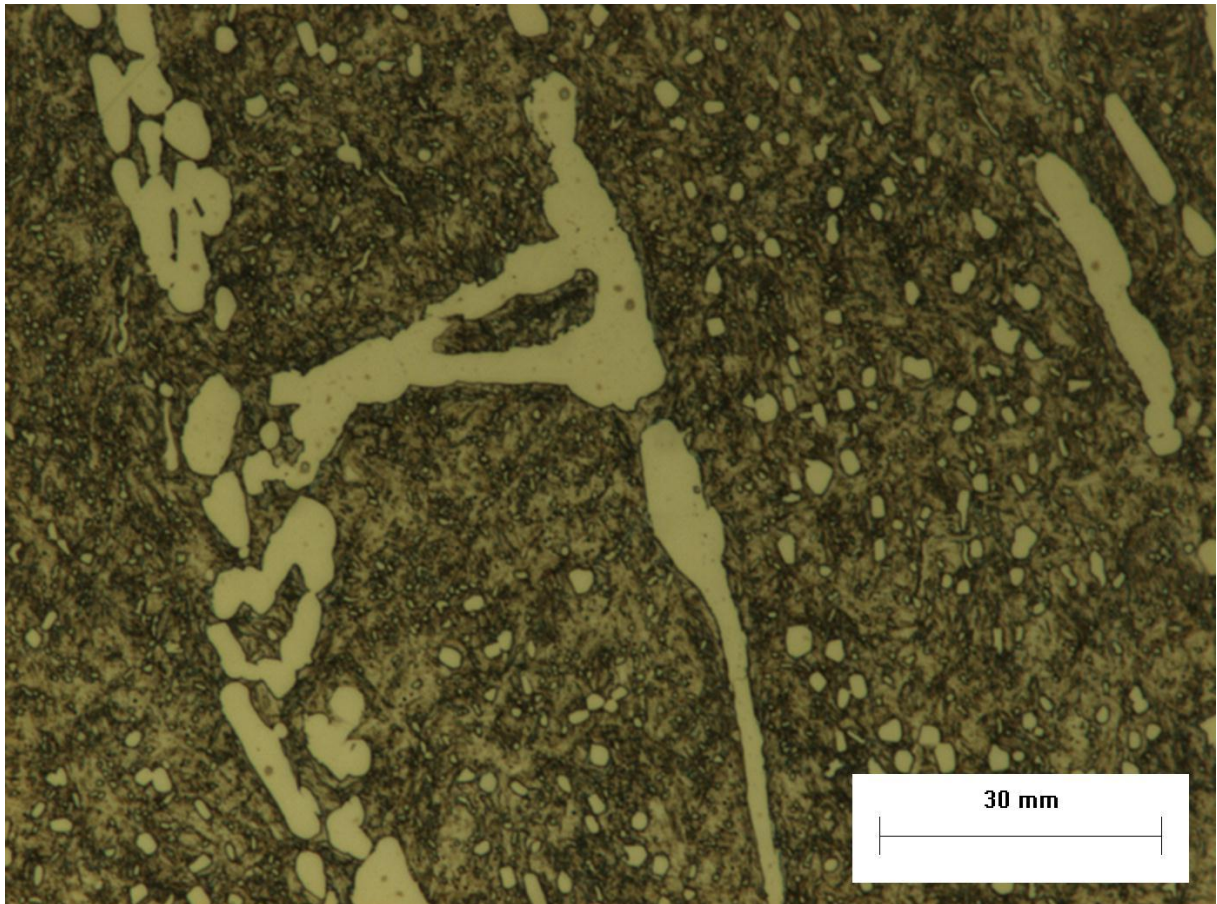


Figura 4.10 - Microestrutura do aço AISI D2 quando submetido a revenimento à temperatura de 520°C por 2h, a partir do FT1. Ataque com Villela.

#### 4.1.3.2 Aço AISI D2 revenido durante duas horas a 520°C, a partir do estado temperado FT2

Tem-se a seguir a microestrutura do aço AISI D2, após os seguintes tratamentos: austenitização a 1080°C por 30 minutos, com resfriamento a ar forçado e revenimento a 520°C, por duas horas.

As Figuras 4.11 e 4.12 ilustram a metalografia das amostras RFT2 atacadas com Vilela, durante 40s. É possível notar os tamanhos de grão do material, bem como a presença de ripas de martensita revenida na cor marrom escura e carbonetos secundários (maiores) e primários (globulares). Fez-se também ataque com Nital 10% para se averiguar possíveis diferenças nos microconstituintes atacados, ilustradas na Figura 4.13.

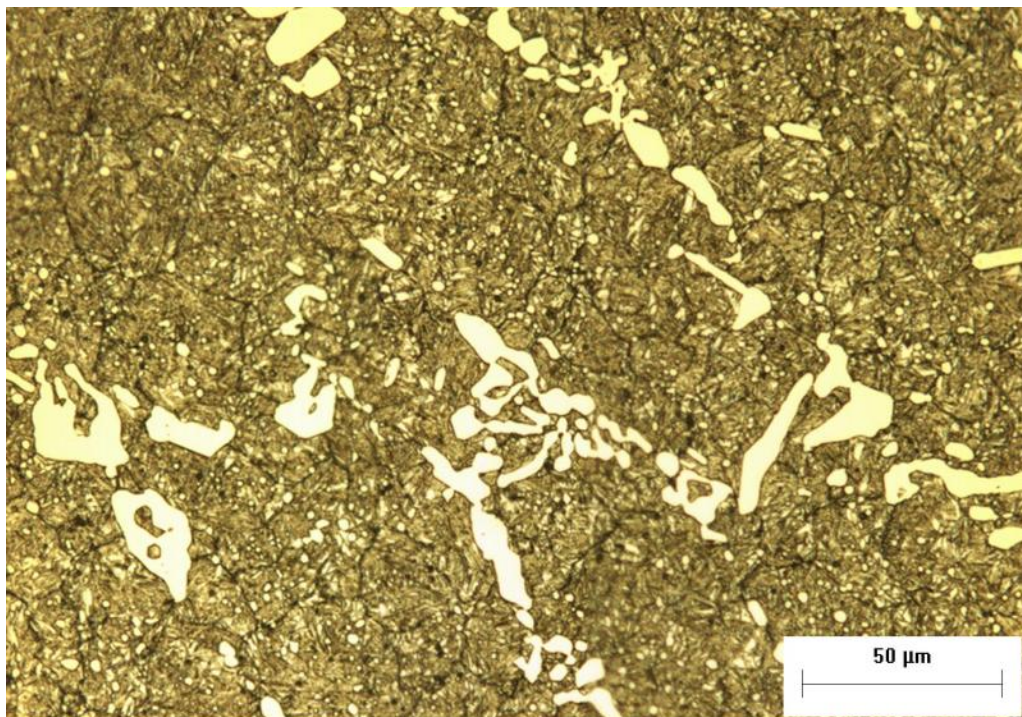


Figura 4.11 - Aço AISI D2 quando submetido a revenimento à temperatura de 520°C por 2h, a partir do estado FT2. Ataque com Vilela.

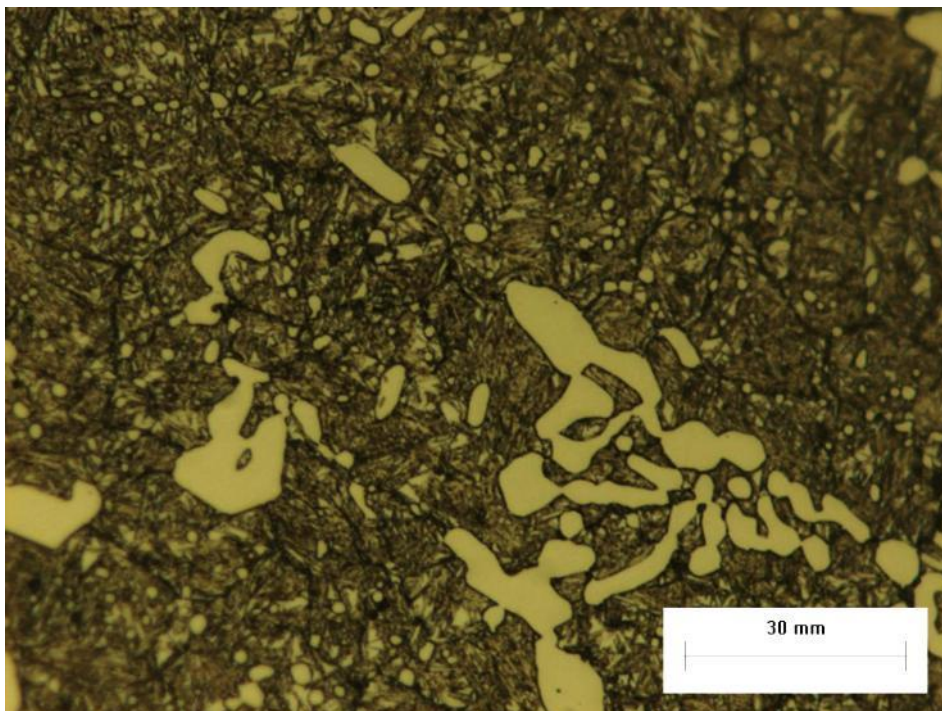


Figura 4.12 - Detalhe da microestrutura do aço AISI D2 revenido a 520°C por 2h, a partir do estado FT2. Ataque com Villela.

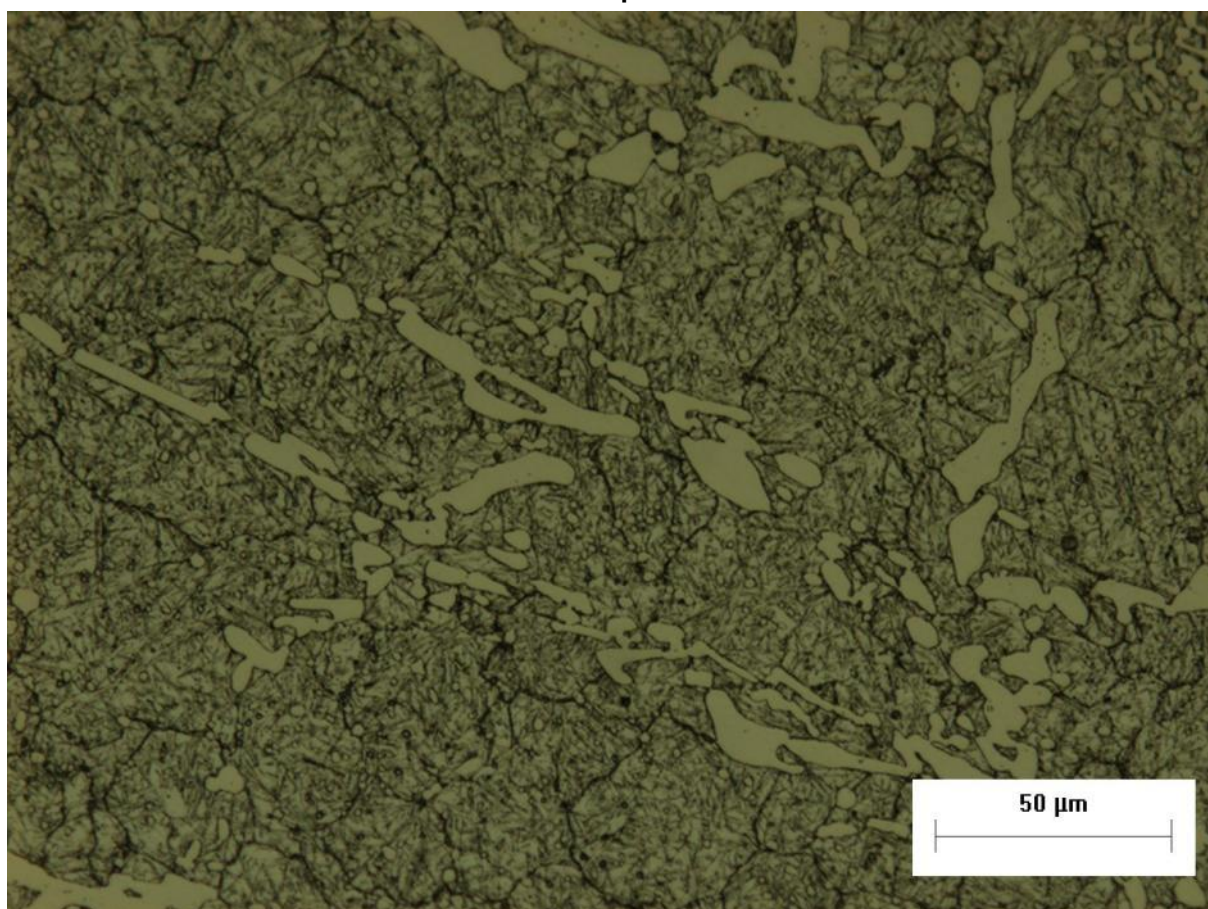


Figura 4.13 - Aço AISI D2 revenido a 520°C por duas horas, a partir do estado FT2. Ataque com Nital 10%.

#### 4.1.3.3 Aço AISI D2 revenido durante 2 horas a 520°C, a partir do estado temperado FT3

Apresenta-se agora a microestrutura do aço AISI D2, após os seguintes tratamentos: austenitização a 1200°C por 30 minutos, com resfriamento a ar forçado e revenimento a 520°C, por duas horas.

Praticamente não se nota diferença entre a metalografia da amostra RFT3, indicada na Figura 4.14e a da amostra FT3, mostrada na figura Figura 4.7.

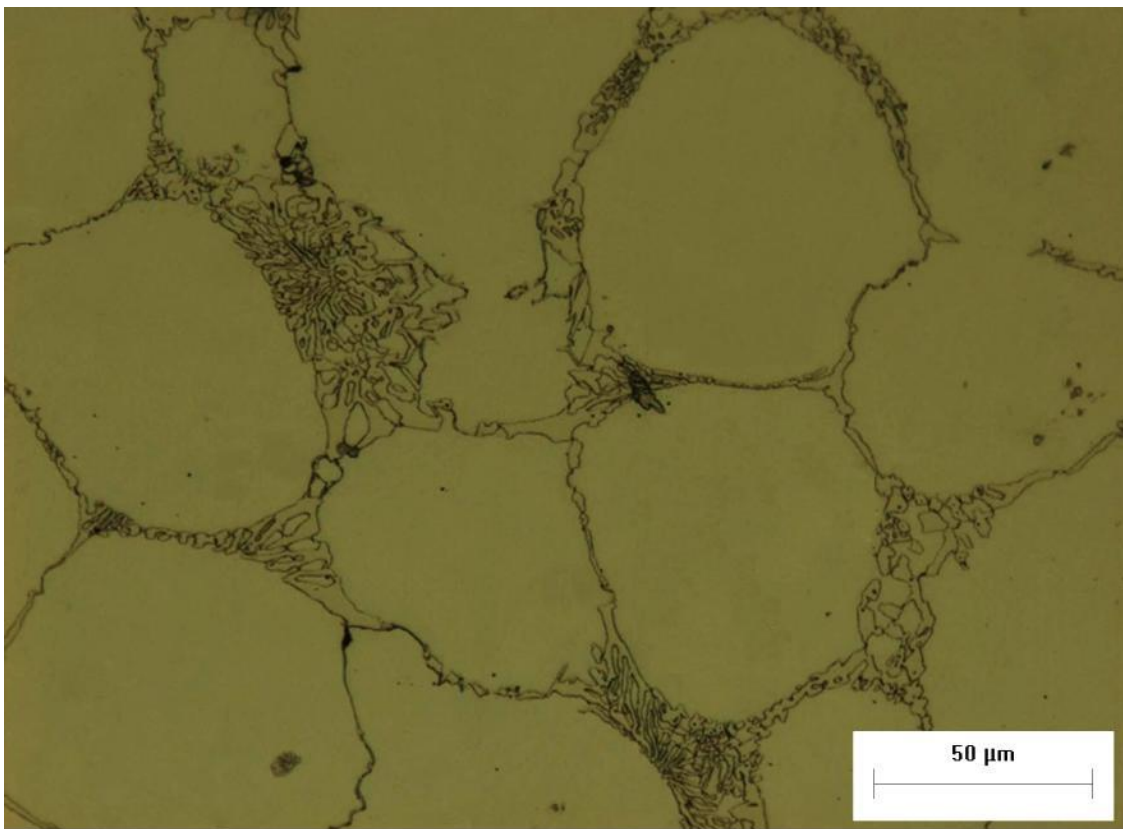


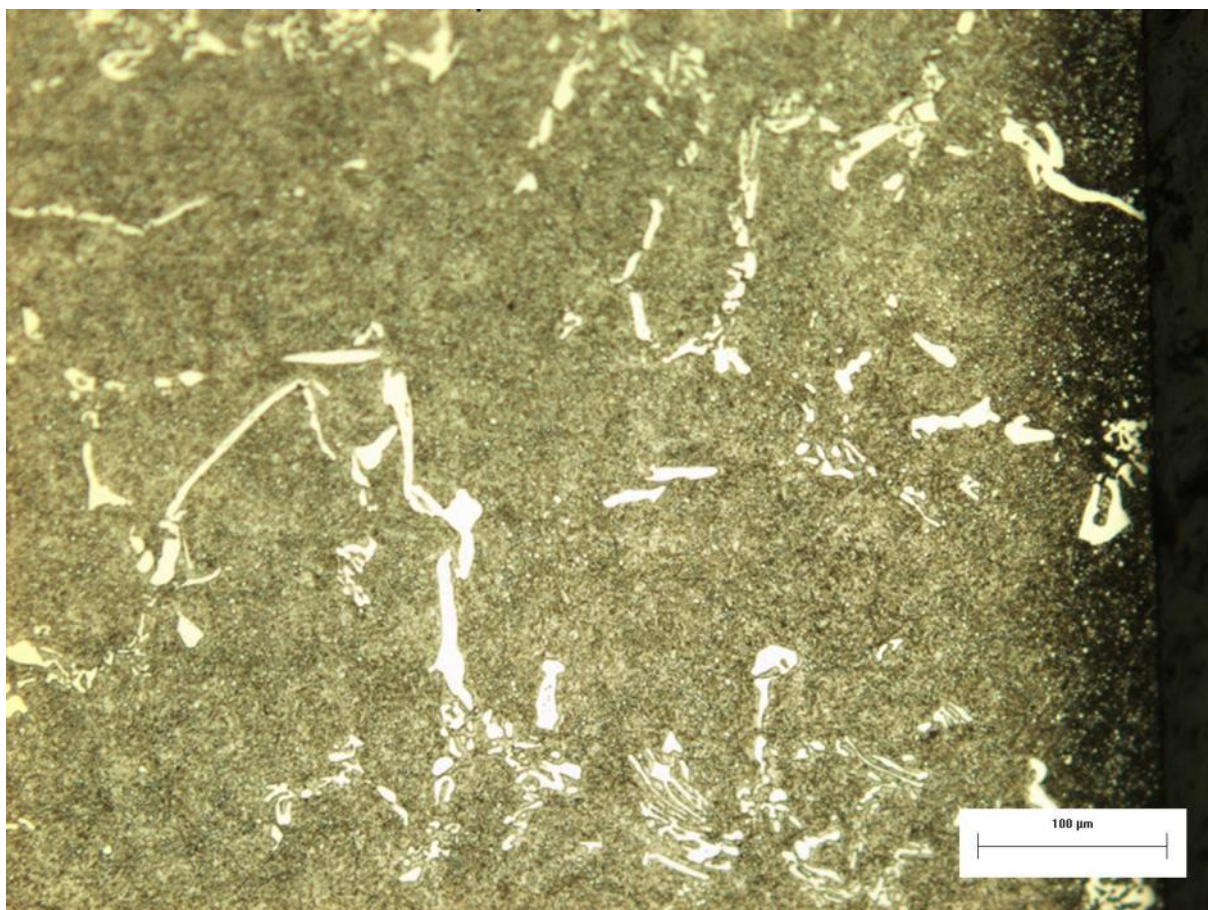
Figura 4.14 - Aço AISI D2 revenido a 520°C por duas horas, a partir do estado FT3. Ataque com Nital 10%.



#### 4.1.4 Aço AISI D2 amostras temperadas e nitretadas

##### 4.1.4.1 Aço AISI D2 nitretado com 5% N<sub>2</sub> a 520°C por 2 horas a partir do estado FT1

Após a nitretação do material no estado FT1, por 2 horas, com mistura gasosa descrita na tabela 3, obteve-se a microestrutura indicada na Figura 4.15. Nota-se a presença de camada nitretada sem a formação de camada branca, conforme o objetivo inicial do tratamento. Uma região da camada de difusão, mais susceptível ao ataque químico, pode ser medida com o uso de software para microscópio óptico (Image ProPlus), indicando comprimento de 49µm.



**Figura 4.15 – Aço AISI D2 nitretado a 520°C por duas horas a partir do estado FT1, observa-se a zona de difusão de cor mais escura próxima à baquelite, sem camada branca.**

#### 4.1.4.2 Aço AISI D2 austenitizado a 1080 °C por 30 min e nitretado com 5% N<sub>2</sub> a 520 °C por 2 horas

Após a nitretação do material no estado FT2, por 2 horas, com mistura gasosa descrita na tabela 3, a 520°C, obteve-se a microestrutura indicada na figura Figura 4.16. Também para esta amostra não se observa a presença de camada branca. A zona de difusão foi medida no microscópio óptico, indicando comprimento de 33 µm.

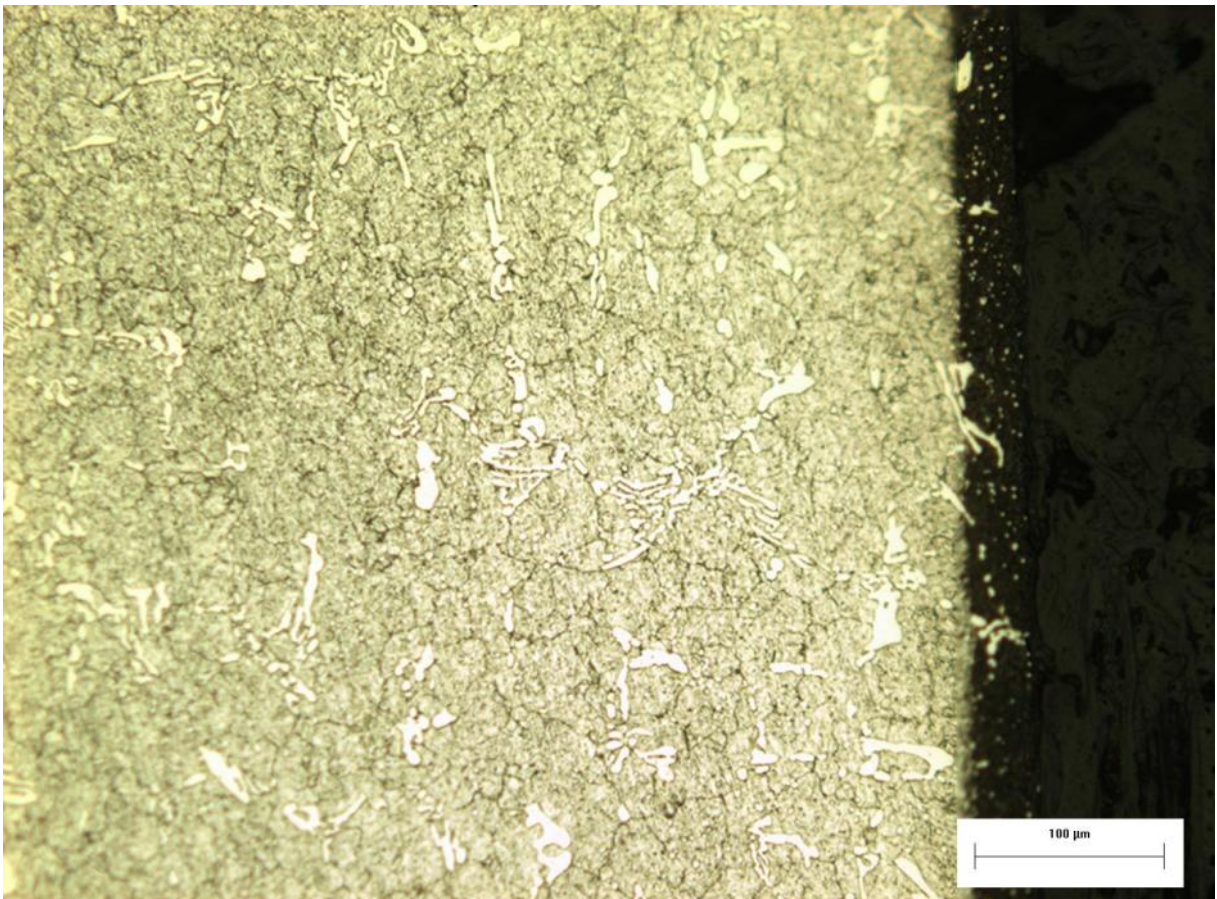


Figura 4.16 - Aço AISI D2 nitretado a 520°C por duas horas, a partir do estado FT2, sem camada branca.

#### 4.1.4.3 Aço AISI D2 austenitizado a 1200 °C por 30 min e nitretado com 5% N<sub>2</sub> a 520 °C por 2 horas

Após a nitretação do material no estado FT3, por 2 horas, com mistura gasosa descrita na tabela 3, obteve-se a microestrutura indicada na Figura 4.17. Nota-se a presença de camada nitretada sem a formação de camada branca, conforme o objetivo inicial do tratamento. A zona de difusão foi medida no microscópio óptico, indicando comprimento de 33 µm.

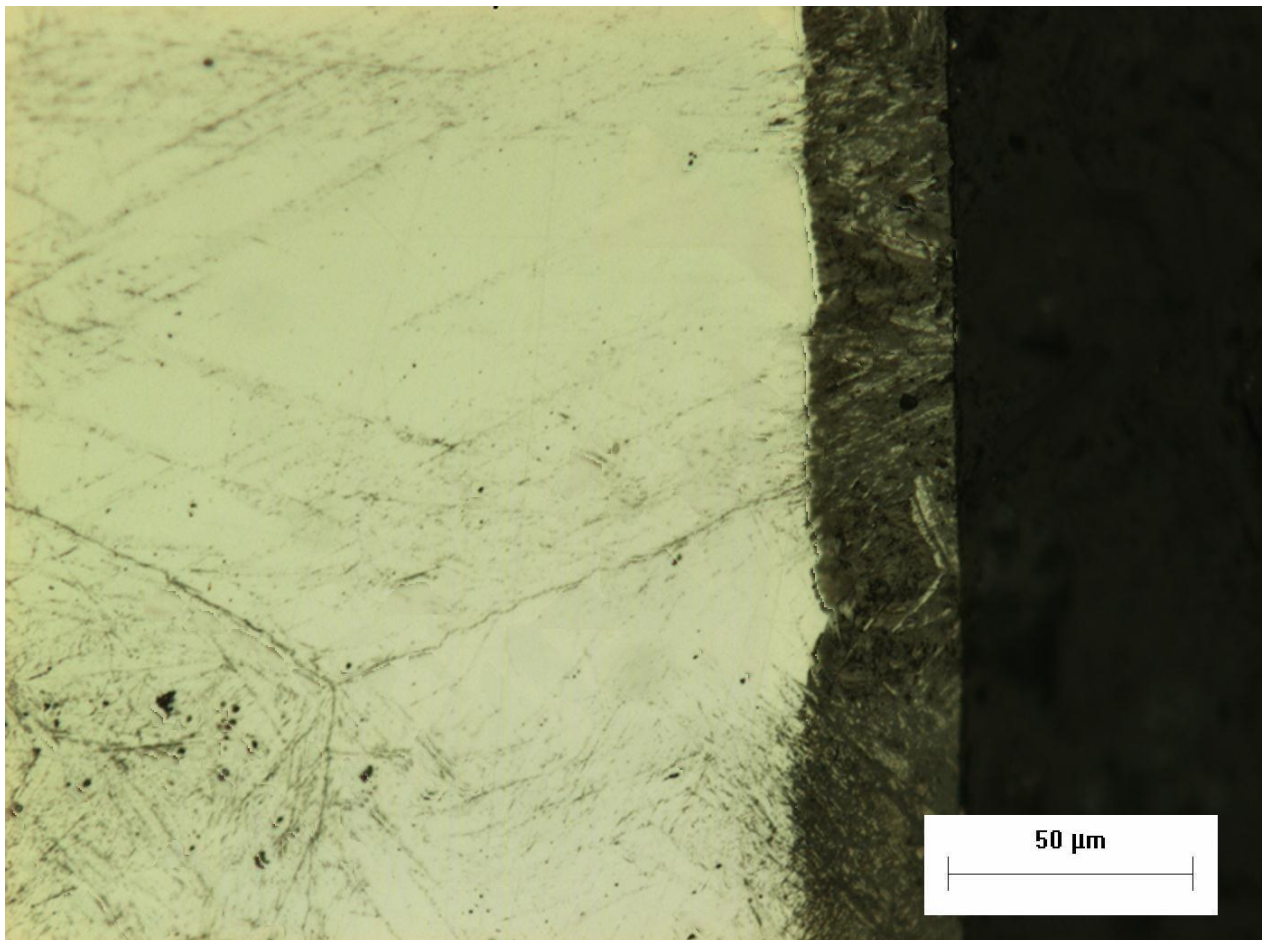


Figura 4.17 - Microestrutura do aço AISI D2 temperado com austenitização de 1200°C (T3), por 30 min e posterior nitretação com 5% N<sub>2</sub> por 2 horas. Ataque com Nital 5%.

## 4.2 Dureza das amostras

Como o aço AISI D2 tem muitos carbonetos em sua microestrutura, durante as medições de dureza é possível encontrar alguns pontos com dureza muito elevada em relação às suas vizinhanças.

Portanto, fez-se medição de dureza Rockwell nas amostras, para se obter um valor médio de dureza e também foi medida dureza Vickers, com teste de microdureza, para medição dos perfis de dureza das amostras.

### 4.2.1 Dureza Rockwell – Amostras temperadas e amostras temperadas e revenidas

A Tabela 4.1 mostra os valores obtidos por medição de dureza Rockwell das amostras. A dureza foi medida em sete pontos aleatórios das seções transversais das amostras iniciais.

**Tabela 4.1 – Valores de dureza medidos em Rockwell**

	FT1	FT2	FT3	RFT1	RFT2	RFT3
<b>Dureza (HRC)</b>	54	59	34	54	62	41
	57	60	37	56	61	43
	56	62	44	56	62	39
	58	61	39	56	62	47
	56	61	44	55	61	42
	57	61	40	55	62	42
	57	61	38	55	62	38
<b>Valor médio</b>	<b>56,4</b>	<b>60,7</b>	<b>39,4</b>	<b>55,3</b>	<b>61,7</b>	<b>41,7</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,3</b>	<b>1,0</b>	<b>3,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>2,9</b>

Considerando-se os valores de desvio padrão resultantes dos valores de dureza medidos, pode-se concluir que após revenimento, a dureza das amostras praticamente não sofreu alterações em relação à dureza obtida após a têmpera.

Os valores médios de dureza foram plotados em um gráfico ilustrado na Figura 4.18 – Dureza HRC x Temperatura de austenitização das amostras temperadas e amostras temperadas e revenidas, que mostra a relação entre a temperatura de austenitização e a dureza, para as amostras FT1, FT2, FT3 (amostras temperadas) e RFT1, RFT2, RFT3 (amostras revenidas).

Pode-se notar que com o aumento da temperatura de austenitização, ocorre aumento de dureza até um valor máximo e depois queda, conforme comportamento esperado.

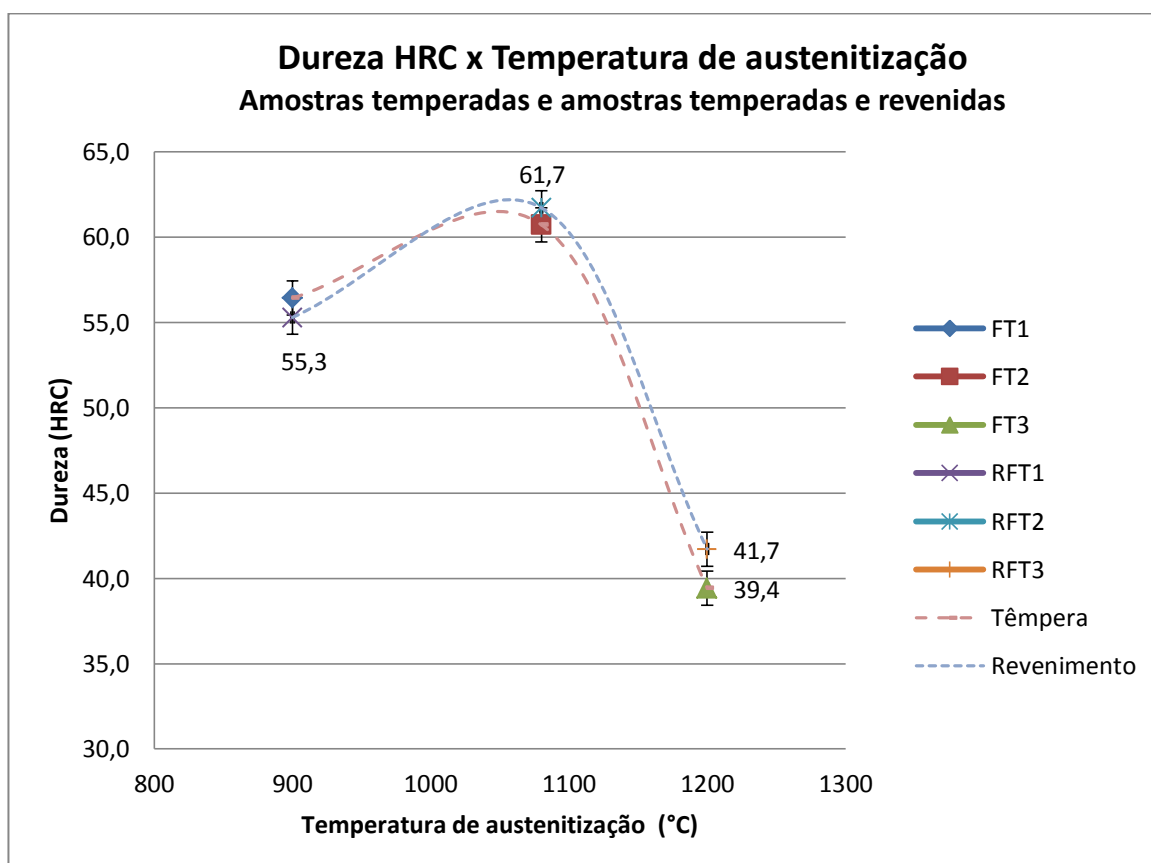


Figura 4.18 – Dureza HRC x Temperatura de austenitização das amostras temperadas e amostras temperadas e revenidas

#### 4.2.2 Dureza Vickers - Amostras temperadas e amostras temperadas e revenidas

Também foi medida a dureza das amostras pelo método de medição Vickers. Os valores resultantes estão mostrados na Tabela 4.2, que apresenta também o valor convertido para a escala HRC da dureza média de cada amostra.

**Tabela 4.2 - Resultados da medição de dureza das amostras em HV**

	<b>FT1</b>	<b>FT2</b>	<b>FT3</b>	<b>RFT1</b>	<b>RFT2</b>	<b>RFT3</b>
<b>Dureza (HV)</b>	567	631	322	549	754	363
	589	673	393	570	767	370
	588	669	379	592	763	385
	595	655	316	613	768	410
	597	656	373	567	754	411
	586	647	405	569	744	446
	606	651	335	583	684	465
<b>Valor médio (HV)</b>	<b>590</b>	<b>655</b>	<b>360</b>	<b>578</b>	<b>748</b>	<b>407</b>
<b>Desvio Padrão</b>	12,1	14	35,7	20,6	29,4	38,1
<b>Conversão - HRC</b>	<b>55 HRC</b>	<b>58 HRC</b>	<b>37 HRC</b>	<b>54 HRC</b>	<b>62 HRC</b>	<b>41 HRC</b>

A Figura 4.19 mostra a comparação dos valores obtidos com os dois métodos de medição. Os valores dos dois métodos de medição são mais próximos para as amostras revenidas. No entanto, mesmo para as amostras FT2 e FT3, que apresentam maiores diferenças entre os valores, percebemos coerência nos resultados.

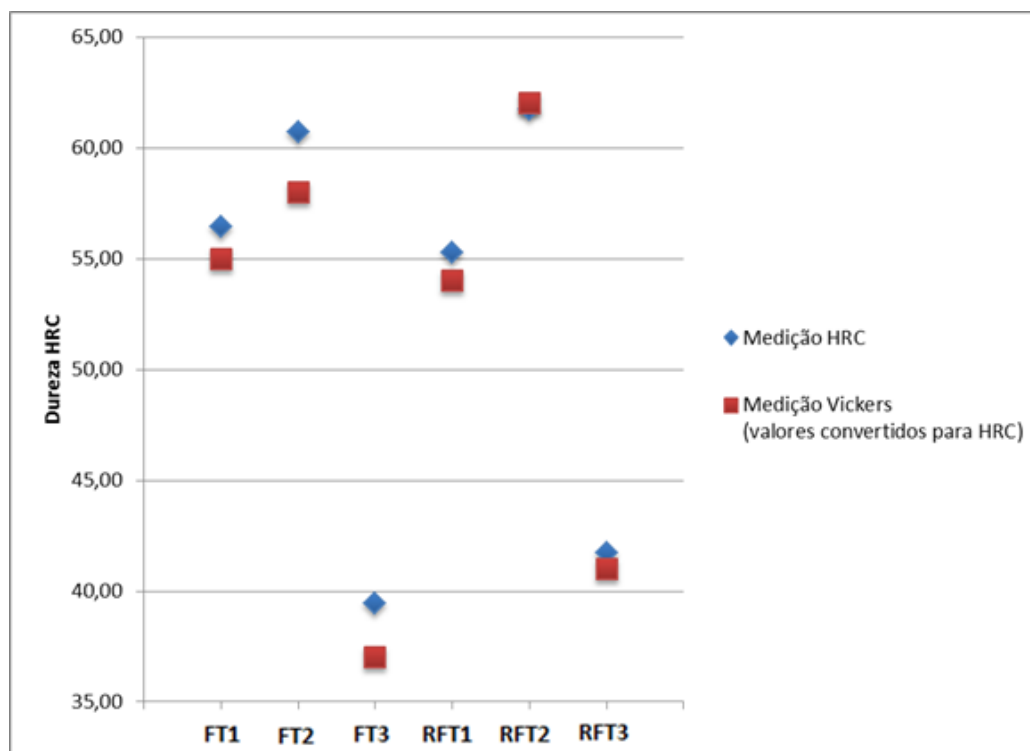


Figura 4.19 – Comparação entre valores de dureza obtidos pelos métodos Rockwell e Vickers

#### 4.2.3 Perfis de dureza

Para analisar-se a diferença de dureza das amostras entre superfície e núcleo, causada por diferentes velocidades de resfriamento, optou-se por fazer o levantamento de perfis de dureza.

Além disso, pode-se assim comparar as propriedades do aço AISI D2 quando temperado e revenido com o estado desse aço após ser temperado e nitretado. Perfis de dureza foram medidos nas seguintes amostras: RFT1, RFT2, RFT3, NFT1, NFT2 e NFT3.

#### 4.2.3.1 Análise comparativa dos perfis de dureza das amostras revenidas e nitretadas

A Tabela 4.4 a seguir apresenta os valores de dureza médios obtidos para as amostras revenidas e nitretadas, com base na medição de três perfis em cada amostra. Considera-se como profundidade zero a superfície.

Após alcançar-se a profundidade de 1,00mm (medição com micrômetro), considera-se então que as medidas tendem a se estabilizar. Para as amostras revenidas poderão ser descartadas variações devidas à descarbonetação superficial. E para as nitretadas, espera-se que o tratamento superficial já não exerça mais influência sobre a dureza do material. Assim, tem-se uma superfície com dureza bastante elevada e um núcleo de maior tenacidade.

Os valores indicados em **negrito e itálico** para as amostras nitretadas correspondem às profundidades de camada que foram verificadas e medidas com auxílio do software Image Pro Plus, durante a análise metalográfica.

Na amostra NFT1 fica nítida a elevação de dureza provocada pela nitretação até a profundidade de 50 $\mu$ m, o valor que havia sido obtido na análise microscópica foi de 49  $\mu$ m. Portanto, existe coerência entre as informações. Em relação à FT1, também se percebe dureza superficial bastante superior.

Para NFT2, observa-se uma queda de dureza na profundidade 30 $\mu$ m que corresponde aproximadamente à profundidade da camada medida pelo software. No entanto, em 40 $\mu$ m nota-se que a dureza é bastante elevada ainda. Como o material é anisotrópico e não homogêneo tal queda pode ser compreensível. Em relação à amostra revenida que foi austenizada à mesma temperatura (RFT2), a dureza superficial da amostra nitretada é mais elevada.

A amostra NFT3 apresentou os maiores valores de dureza comparativamente a NFT1 e NFT2 para profundidades de até 30 $\mu$ m. O mesmo acontece para a amostra revenida, RFT3.

A tabela mostra as temperaturas de austenitização adotadas para as amostras nitretadas, bem como a medida da camada nitretadas avaliada pela análise metalográfica e pela medição de dureza.



**Tabela 4.3 - Comparação das profundidades das camadas nitretadas obtidas por análise metalográfica e medição de dureza para diferentes temperaturas de austenitização**

<b>Temperatura de austenitização das amostras nitretadas</b>	<b>Profundidade da camada nitretada (metalografia)</b>	<b>Profundidade da camada nitretada (medição de dureza)</b>
900°C	49 µm	50 µm
1080°C	33 µm	40 µm
1200°C	33 µm	40 µm

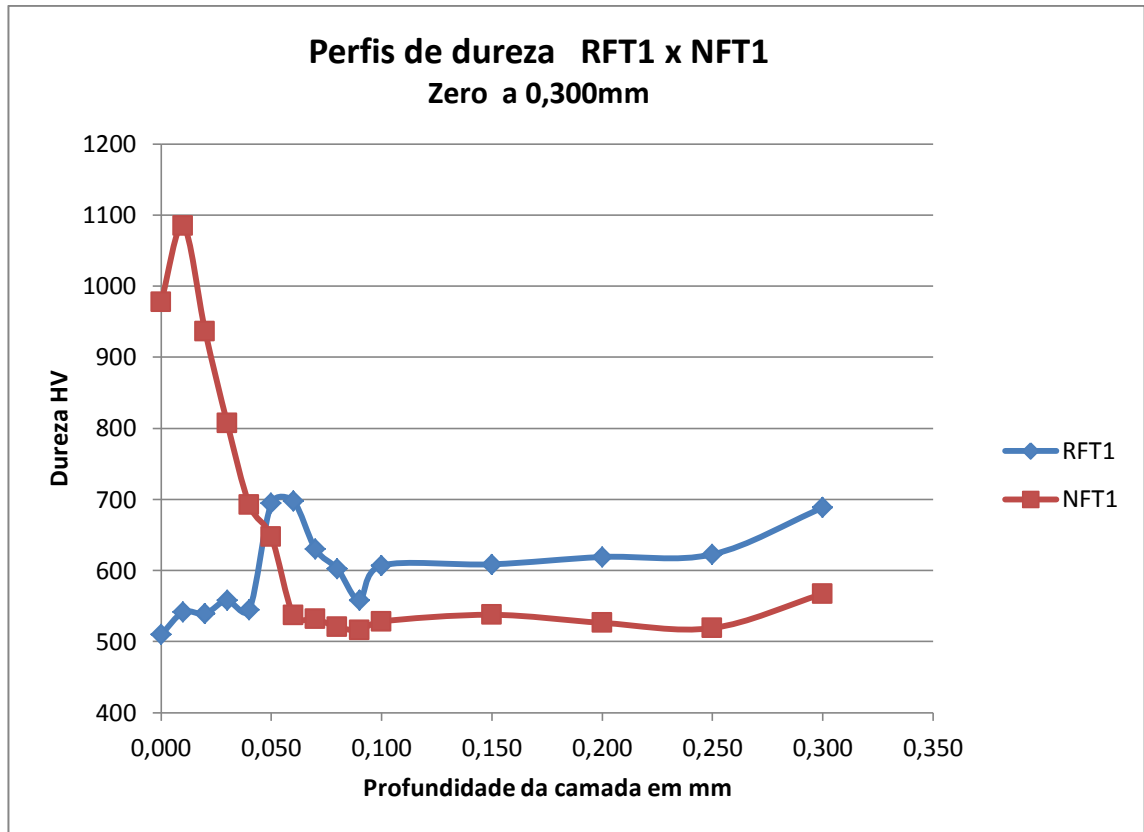
Tabela 4.4 – Perfil de dureza HV das amostras

Profundidade da camada nitretada (mm)	Amostra			Amostra		
	RFT1	RFT2	RFT3	NFT1	NFT2	NFT3
	Dureza HV			Dureza HV		
0,000	510	692	775	<b>978</b>	<b>1109</b>	<b>1392</b>
0,010	541	749	771	<b>1085</b>	<b>1130</b>	<b>1396</b>
0,020	539	662	743	<b>936</b>	<b>831</b>	<b>1082</b>
0,030	558	745	752	<b>807</b>	<b>685</b>	<b>888</b>
0,040	545	709	716	<b>693</b>	825	<b>647</b>
0,050	695	712	609	<b>647</b>	697	758
0,060	698	801	687	537	689	777
0,070	630	728	675	532	716	816
0,300	688	921	515	567	662	585
1,000	561	829	413	514	712	547
2,000	485	760	543	515	704	393
3,000	624	764	413	693	734	625
4,000	553	781	543	560	735	402
5,000	653	716	405	532	703	415
<b>Valor médio do núcleo HV</b>	<b>575</b>	<b>770</b>	<b>463</b>	<b>563</b>	<b>718</b>	<b>476</b>
<b>Desvio padrão (HV)</b>	<b>66</b>	<b>41</b>	<b>73</b>	<b>75</b>	<b>16</b>	<b>104</b>
<b>Valor médio do núcleo HRC</b>	<b>54</b>	<b>63</b>	<b>46</b>	<b>53</b>	<b>61</b>	<b>47</b>
<b>Desvio padrão (HRC)</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>8</b>

Os gráficos a seguir, apresentam as comparações de dureza de camada até 0,300mm para o AISI D2 revenido e nitretado após as mesmas condições de austenitização para têmpera ao ar forçado.

O gráfico ilustrado a seguir é referente às amostras RFT1 e NFT1 (Figura 4.20) e mostra os valores de dureza para as profundidades de zero a 0,300mm. Para as menores profundidades a dureza resultante da nitretação é muito superior à da revenida. Após ultrapassar os 0,050mm, a dureza cai e se mantém abaixo da dureza do revenimento.

Da análise das informações apresentadas na Tabela 4.4, percebe-se que para o núcleo das amostras, ou seja, profundidades superiores a 1,00 mm, os valores médios de dureza são próximos. A amostra RFT1 apresentou dureza média de 54 HRC no núcleo, contra 53 HRC da amostra nitretada.

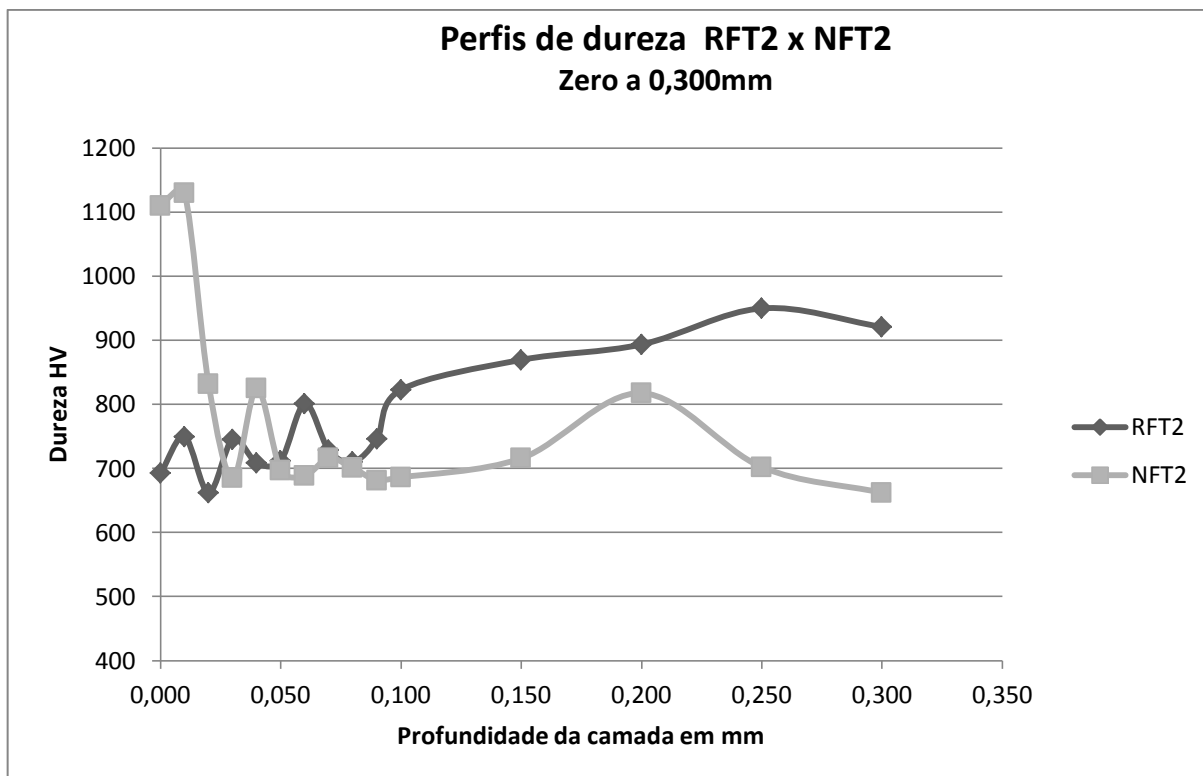


**Figura 4.20 – Comparação entre perfis de dureza superficial das amostras RFT1 e NFT1**

A Figura 4.21 é análoga à 4.20, mas para comparação das amostras RFT2 e NFT2. A amostra RFT2 apresenta a maior dureza em relação às demais revenidas, pelos efeitos da relação dureza x temperatura de austenitização já mencionados e ilustrados na Figura 2.3.

Também se tem maior dureza para a superfície da amostra nitretada em relação à revenida e tal comportamento se mantém até 0,030mm. Ocorre uma oscilação do valor e após 0,050mm o valor se mantém abaixo da dureza da amostra revenida.

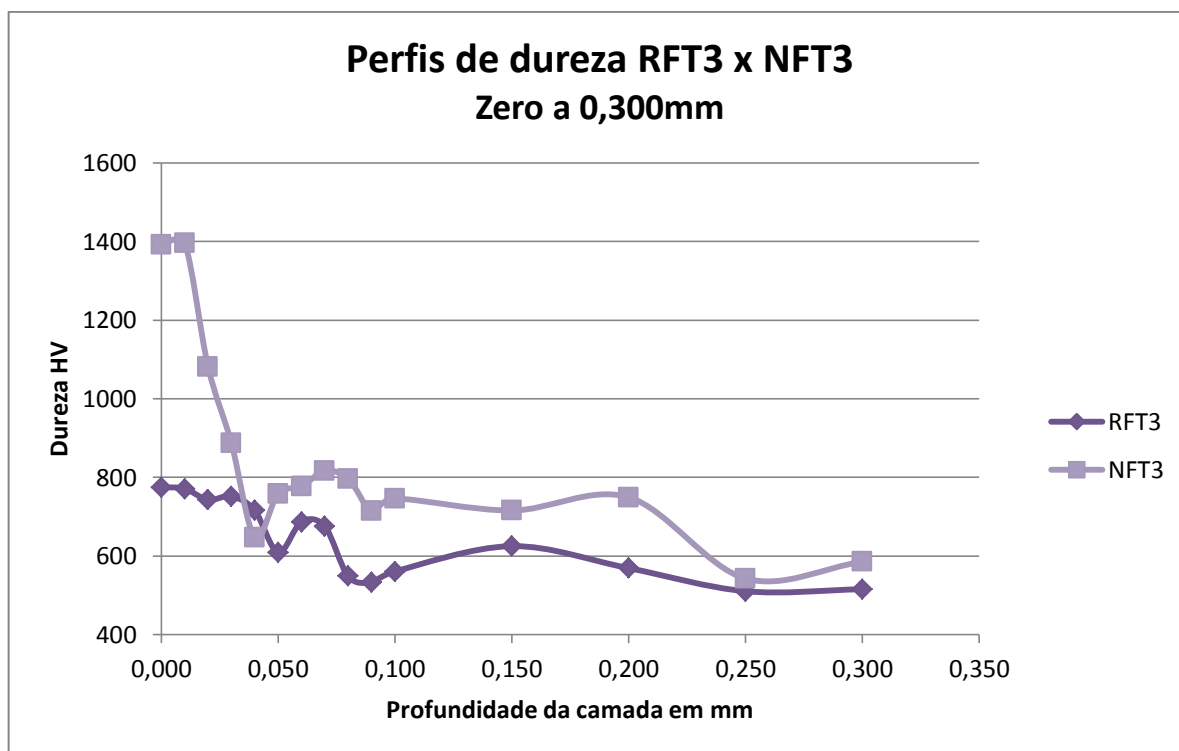
Da análise dos dados Tabela 4.4 nota-se que as amostras RFT2 e NFT2 apresentaram a maior diferença de dureza média em relação às demais, comparando-se amostras austenitizadas à mesma temperatura. Enquanto a dureza do núcleo da amostra RFT2 apresentou dureza de 63 HRC, para a amostra NFT2 obteve-se 61HRC.



**Figura 4.21 - Comparação entre perfis de dureza superficial das amostras RFT1 e NFT1**

Seguindo-se à comparação, o gráfico ilustrado na Figura 4.22 se refere às amostras RFT3 e NFT3. Para a superfície das amostras, a NFT3 apresenta maior dureza, até 0,040mm, para maiores profundidades a dureza cai.

Para comparação de dureza das amostras no núcleo, têm-se os resultados da Tabela 4.4, que mostra que a dureza de RFT3, de 46 HRC é menor do que a de NFT3, de 47 HRC.



**Figura 4.22 - Comparação entre perfis de dureza superficial das amostras RFT3 e NFT3**

#### 4.2.3.2 Análise comparativa de perfil de dureza da amostra NFT2 com dados experimentais anteriores

A Figura 4.23 a seguir é uma adaptação da Figura 4.12, de Franco Jr (2003). Foram plotados no gráfico os pontos obtidos pelos estudos por ele publicados, e também a curva referente à amostra FT2 deste projeto. A intenção é de se comparar a dureza obtida com a nitretação à plasma.

Vê-se que a dureza do início da camada é superior à das amostras tratadas por 3h, o que é inesperado, já que maiores tempos de nitretação promovem maiores durezas de camada.

No entanto, os outros valores mostram-se coerentes e bastante próximos aos obtidos pelos demais.

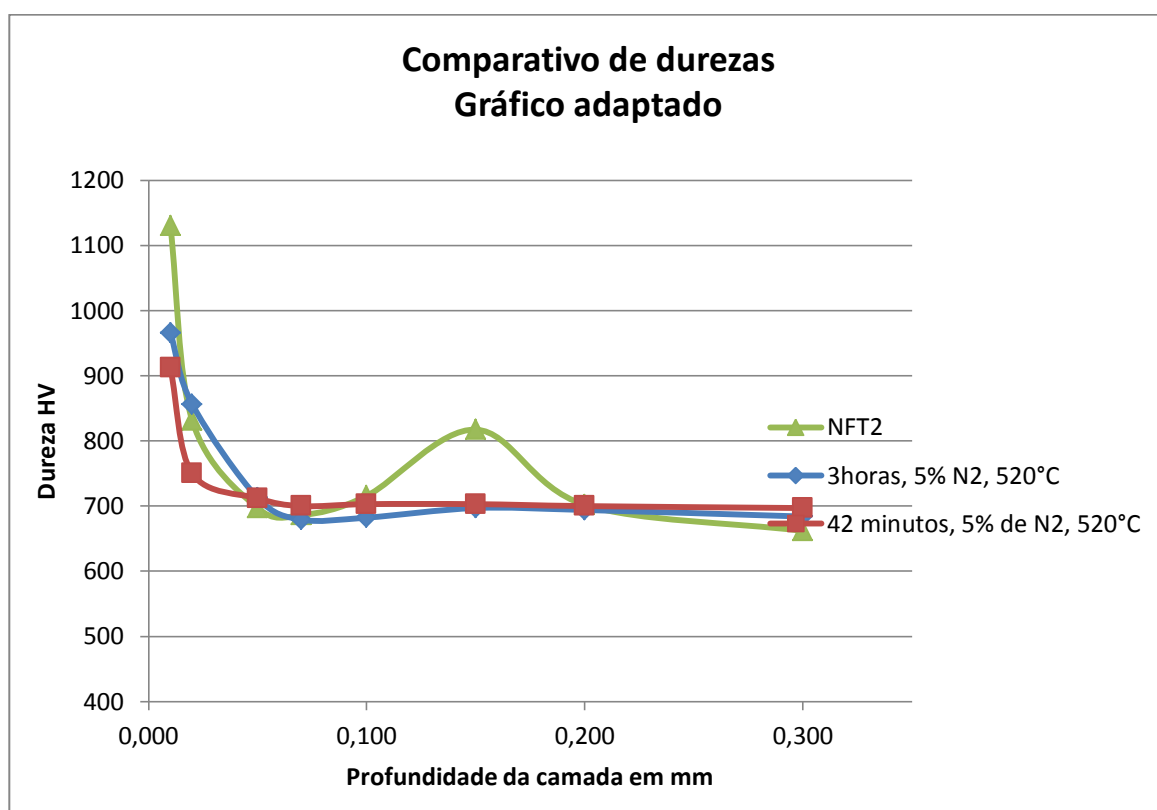


Figura 4.23 Gráfico adaptado de FRANCO Jr., com acréscimo dos valores de dureza de perfil da amostra NFT2 para efeito comparativo.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados de dureza das amostras austenitizadas a diferentes temperaturas, constata-se que o aumento de dureza para maiores temperaturas acontece até determinado ponto, a partir do qual começa a declinar. A máxima dureza foi obtida para a amostra austenitizada a 1080°C e a menor para a de 1200°C. Tal efeito está relacionado à quantidade de austenita retida que permanece na microestrutura do material após a têmpera. O conjunto de informações levantadas com a análise metalográfica e medições de dureza leva à conclusão de que os resultados são coerentes.

Notam-se nas microestruturas menores quantidades de carbonetos com o aumento das temperaturas de austenitização, sendo FT3 a amostra com menor quantidade de carbonetos. A dissolução dos carbonetos transfere C e Cr para a matriz martensítica, que sofre deformação de sua estrutura cristalina e apresenta então maior dureza. Contudo, a maior quantidade destes elementos na matriz faz com que se torne mais difícil a formação de martensita a partir de uma dada temperatura de austenitização, porque a temperatura  $M_s$  cai. Menores quantidades de martensita na matriz indicam que existe mais austenita retida na microestrutura, já que a austenita não consegue se transformar em martensita durante o resfriamento.

Ao observarem-se as imagens de metalografia das amostras, é possível verificar que a quantidade de martensita é maior nas amostras FT2 e RFT2 em relação às outras. Já FT3 e RFT3 não apresentam martensita visível nas microestruturas e supõe-se que a matriz seja composta por austenita retida.

O crescimento dos tamanhos de grão com o aumento das temperaturas de austenitização também pôde ser verificado. Os maiores grãos são das amostras FT3 e RFT3 e chegam a ser até em média duas vezes maiores do que os grãos das amostras FT2 e RFT2.

A temperatura elevada de austenitização, de 1200°C, adotada para a amostra FT3 ocasionou liquação, fazendo com que pontos de líquido surgissem

durante o processo de aquecimento e se precipitassem como carbonetos eutéticos nos contornos de grão durante o resfriamento.

Observa-se a ocorrência de endurecimento secundário, que se percebe pelo fato de as durezas obtidas para as amostras temperadas e revenidas e temperadas e nitretadas não terem apresentado diferenças acentuadas.

A nitretação a plasma, precedida de têmpera, em comparação ao tratamento de têmpera seguido de revenimento, mostra que a dureza superficial das amostras nitretadas é muito superior às demais. Contudo, depois de atingida determinada profundidade, os valores de dureza ficam abaixo dos obtidos com revenimento. Tal comportamento não se observa apenas para a amostra FT3, que a profundidades superiores a 1,000mm, quando os resultados de dureza passam a oscilar muito.

O tratamento superficial permite a obtenção de camadas superficiais de alta dureza, combinadas à de um núcleo mais tenaz. Tal efeito é superior ao obtido para as amostras temperadas e revenidas e é bastante desejável às aplicações do aço AISI D2.



## RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise da tenacidade do aço AISI D2, em conjunto com a dureza, já que estes dois fatores combinados devem ser avaliados para a escolha adequada dos processos de acordo com a aplicação desejada.

Além disso, a escolha de outras temperaturas de austenitização adicionais permitirá a melhor compreensão da curva temperatura x dureza. Uma análise conjunta, com o uso de técnicas de raio-X pode mostrar com maior precisão a presença de austenita retida na microestrutura e a composição dos demais microconstituintes.

## REFERÊNCIAS

**ARIETA, Francisco; NETTO, Eliana B. M.; REGULY, Afonso; PANNES, W. K.; BEUTLER, Uwe; SOEST, Frank von; ERNST, Claudia.** Impact Properties of Vacuum Heat Treated AISI D2 and 8% Cr Cold Work Tool Steels. *Journal of ASTM International*, vol.8, 2010.

**ASM INTERNATIONAL HANDBOOK:** Heat Treating, vol. 4, 1991.

**ASM INTERNATIONAL HANDBOOK:** **Mechanical Testing and Evaluation, vol. 8, 2000.**

**BRESSAN, José D.; GILAPA, Leonidas M.; DAROS, Deivid P.** Influência do revenimento na resistência ao desgaste do aço Villares D2. São Paulo: Tecnologia em Metalurgia e Materiais, 2007.

**BROBST, R. P.; KRAUSS, G.** The effect of Austenite Grain Size on Microcracking in Martensite of an Fe-1.22C Alloy. New York: Metallurgical Transactions, 1973.

**CALLISTER, Willian D. Jr.** Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

**CHIAVERINI, Vicente.** Tratamentos Térmicos das Ligas Ferrosas. São Paulo: Editora ABM - Associação Brasileira de Metais, 1987.

\_\_\_\_\_. Aços Carbono e Aços Liga. São Paulo: Editora ABM - Associação Brasileira de Metais, 1971.

\_\_\_\_\_. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: Editora ABM Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

**JÚNIOR, Adonias Ribeiro Franco.** Obtenção de revestimentos dúplex por nitretação a plasma e PVD-TiN em aços ferramenta AISI D2 e AISI H13. São Paulo: Tese Apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a Obtenção do Título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2003.

**KRAUSS, G.** Tempering and Structural Change in Ferrous Martensitic Structures. Phase Transformations in Ferrous Alloys. Philadelphia, Pennsylvania; U.S.A. pp. 101-123; 1984.

**MEDANHA, Adriano; GOLDENSTEIN, Hélio; PINEDO, C. Eduardo.** Tratamentos Térmicos do Aço Ferramenta AISI D2 para Conformação e Corte. São Paulo: Congresso de Conformação e Corte, 2005.

\_\_\_\_\_. Influência da Microestrutura da Matéria Prima e do Tratamento Térmico na Resistência à Fratura do Aço AISI D2. São Paulo: 4º Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 2006.

\_\_\_\_\_. Tenacidade do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2 - Parte II - Influência do Tratamento Térmico. São Paulo: 1º Encontro de Integrantes da Cadeia Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 2003.

**MEDANHA, Adriano; FRANCO Jr., Adonias R.; GOLDENSTEIN, Hélio; TSCHIPTSCHIN, André P.; PINEDO, C. Eduardo.** Principais parâmetros metalúrgicos e suas influências na qualidade e desempenho do aço para trabalho a frio AISI D2. São Paulo: 6º Seminário da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, ABM, 2008.

**MOREIRA, J.C.; ÁVILA, R.F.; GODOY, G.C.D.; ABRÃO, A.M.** Influência do tratamento criogênico na usinabilidade do aço rolamento ABNT 52100 temperado. Rio de Janeiro: Revista Matéria, v.14, 2009.

**PORTER, David A.; EASTERLING, Kenneth A.; SHERIF, Mohamed.** Phase Transformation in Metals and Alloys. 3 ed. CRC Press, 2009.

**SILVA, Wander G.; CUMINO, Ricardo S.; GOLDENSTEIN, Hélio; SILVA, Gilvan J. da; FERREIRA, Jairo J.** Estudo Comparativo entre um tratamento isotérmico próximo de Ms e a têmpera e revenimento do aço DIN 100Cr6. São Paulo: I Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico, 2003.

\_\_\_\_\_. Obtenção de teores controlados de austenita retida em aço DIN 100 Cr 6 e seu efeito num ensaio de desgaste. Rio Grande do Sul: 51º Congresso Anual da ABM, 1996.

**SPEICH, G. R.; LESLIE, W. C.** Tempering of Steel. Metallurgical Transactions. Vol.3, 1972

**WRITZL, Viviane.** Influência dos parâmetros da têmpera superficial a laser por diodo na microestrutura dos aços ferramenta para trabalho a frio. Paraná: Programa de pós-graduação em engenharia mecânica e de materiais – PPGEM, 2011.

## APÊNDICE A

O certificado de qualidade do material, utilizado para a realização do presente projeto e comercializado pela Aço Trio Comércio de Aços Especiais LTDA, é mostrado na Figura 5.1.

**VILLARES METALS**

USINA DE SUMARÉ / ESCRITÓRIO CENTRAL  
R. Alfredo Dumont Villares, 155  
13177-900 - Sumaré - SP - BR/4ZIL  
Phone: 55 19 3303-8000 - Fax: 55 19 3303-8696  
e-mail: metais@villaresmetals.com.br

Pag. 1/ 1

**CERTIFICADO DE QUALIDADE**

CERT. Nr. 000000565499

CONFORME EN 10204 3.1

CLIENTE **AÇO TRIO COMERCIO AÇOS ESPECIAIS LT**

NOTA FISCAL Nº. 000035749

PEDIDO DO CLIENTE / SEQUÊNCIA Nr. / ITEM. VERBAL 06/10/10 - / 14.10.2010

REFERÊNCIAS DA VILLARES METALS			
OS Nr. 1481452		LOTE Nr. 1481452	
		VOLUME Nr. 1481452/02	
LIGA VILLARES		LIGA CLIENTE / SIMILAR	
VD2		ASTM A681 (D2)	
NORMAS ATENDIDAS			
PROCESSO DE FUSÃO		LINHA DE PRODUTO	
FORNO ELÉTRICO A ARCO		Forjados	
TRATAMENTO TÉRMICO		ACABAMENTO	
Recozido		Fresado (Esquadrejado)	
3370 KG	QUANTIDADE	PRODUTO	DIMENSÕES / Nº DO DESENHO (mm)
1		Barra Chato Canto Vivo	300,00 Tol (-10,000 (+)12,000 500,00 Tol (-10,000 (+)12,000
COMPRIMENTO (mm)		CORRIDA N. 4838051	
1.500 / 4.200			
COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em peso)			
C 1.53	Si 0.40	Mn 0.36	P 0.024
S <0.0010	Co 0.03	Cr 11.54	Mo 0.74
W 0.09	Cu 0.05	Ti 0.006	Nb <0.01
Al 0.030	B <0.0005	Sr <0.0050	Ni 0.22
			V 0.74
Dureza Conforme Norma ASTM A370			
Resultado: 197 HB			
Inspeção visual e dimensional			
Situação: Aprovado			
Ultra-som Conforme Norma ASTM A388			
Situação: Aprovado			
Teste anti-mistura			
Situação: Aprovado			
NOSSO SISTEMA DE QUALIDADE É CERTIFICADO DE ACORDO COM ISO 9001, TS 16949, NBR 15100 (AS 9100), ISO 14001 E NÁDCAP(1).			02.03.2011
*TRATAMENTO TÉRMICO E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.			Leonardo Taborda Sandor SUPERVISOR DA ENG°PRODUTO

**Figura 5.1 - Certificado de garantia do aço AISI D2 adquirido da Aço Trio Comércio de Aços Especiais LTDA.**