

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

# **Estudo de aços ferramenta pré-endurecidos**

Ana Paula Fernandes Miranda

**Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais**

Orientador na F. Ramada, Aços e Indústrias S.A.: António  
Paulo Cerqueira Duarte

Orientador na FEUP: Professora Doutora Laura MM Ribeiro

Porto, Julho de 2014

<i>CANDIDATO</i>	Ana Paula Fernandes Miranda	Código	200907551
<i>TÍTULO</i>	Estudo de aços ferramenta pré-endurecidos		
<i>DATA</i>	22 de Julho de 2014		
<i>LOCAL</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F103 - 11h00		
<i>JÚRI</i>	Presidente	Professor Doutor Luís Filipe Malheiros de Freitas Ferreira	DEMM/FEUP
	Arguente	Professor Doutor Fernando Jorge Lino Alves	DEM/FEUP
	Orientador	Professora Doutora Laura Maria Melo Ribeiro	DEM/FEUP

## Agradecimentos

Quero expressar a minha gratidão para com:

A pessoa que mais me ajudou na realização deste trabalho de dissertação, a minha orientadora, Professora Doutora Laura Ribeiro, pelos seus ensinamentos, disponibilidade e paciência.

A F. Ramada e, em particular, o Engenheiro Paulo Duarte pela disponibilidade em ajudar.

A Professora Doutora Sónia Simões por todos os ensinamentos e esclarecimentos.

Todos os Professores e funcionários do DEMM pelo seu profissionalismo.

Os meus colegas de faculdade, em particular a Diana, Rita, Tânia e Inês pela amizade destes cinco anos.

A minha família, pelo amor incondicional e energia positiva.

O Yasser, por sonhar e voar comigo.

Os meus Anjos da Guarda.

Muito obrigada por tudo.

Ana Paula

## Resumo

Este trabalho de dissertação procurou responder a dois desafios: estudar um aço ferramenta pré endurecido por arrefecimento contínuo (NIMAX) e compará-lo com um aço ferramenta pré-endurecido por têmpera e revenido (DIN EN 1.2711).

Ambos os aços podem ser nitrurados e são utilizados no fabrico de moldes para injeção de plásticos. Por esta razão, foram termicamente tratados em condições de temperatura e tempo idênticas às dos ciclos de nitruração industriais e analisaram-se as suas microestruturas e outras características cruciais na aplicação a que se destinam, tais como a variação dimensional, dureza e resistência ao impacto.

Verificou-se um abaixamento da dureza e tenacidade nos dois aços após tratamento térmico e que o aço DIN EN 1.2711 possui maior estabilidade dimensional.

Para o estudo mais pormenorizado do aço Nimax recorreu-se ainda a microscopia eletrónica de transmissão (TEM) e microscopia eletrónica de varrimento (SEM) com microanálise de raios-x (EDS) e difração por elétrons retrodifundidos (EBSD).

## Abstract

This dissertation aimed to answer two challenges: to study a prehardened steel continuously cooled (NIMAX) and to compare it to another tool steel, hardened by quenching and tempering (DIN EN 1.2711).

Both steels can be nitrided and are used to produce moulds for plastic injection. Therefore, they were heat treated with temperatures and hold times similar to the ones of industrial nitriding, with the purpose of exploring their microstructures and other crucial properties for the application they are meant to, such as dimensional variation, hardness and shock resistance.

It was found that there is a declining of the hardness and toughness in both steels when heat treated and DIN EN 1.2711 has higher dimensional stability.

More detailed investigations of Nimax steel were made using transmission electron microscopy (TEM) and scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive spectroscopy (EDS) and electron backscatter diffraction (EBSD).

## Índice

1. Descrição e Objetivos.....	1
2. Introdução.....	1
2.1. F. Ramada, Aços e Indústrias S.A. ....	1
2.2. Aços ferramenta - Generalidades.....	2
2.2.1. Principais elementos de liga .....	3
Carbono .....	3
Crómio .....	4
Tungsténio e Molibdénio.....	4
Vanádio .....	4
Manganês .....	4
Cobalto.....	5
Nióbio .....	5
Silício.....	5
Alumínio .....	5
Níquel .....	5
2.2.2. Classificação AISI .....	6
Aços para fins especiais para moldes, P.....	6
2.3. Aços ferramenta pré-endurecidos utilizados na indústria de moldes para injeção de polímeros.....	7
2.4. Aço Nimax.....	10
3. Materiais e Procedimento Experimental .....	14
3.1. Materiais e Provetes.....	14
3.2. Preparação metalográfica e análise em MO, SEM, EBSD e TEM .....	14
3.3. Tratamentos térmicos.....	15
3.4. Ensaio de dureza.....	15
3.5. Ensaio de Choque .....	16
4. Resultados e Discussão .....	17
4.1. Microestruturas Microscópio Ótico .....	17
4.1.1. Aço Nimax .....	17
4.1.2. Aço DIN EN 1.2711.....	20
4.2. Durezas.....	22

4.3.	Variação dimensional linear .....	25
4.4.	Ensaio de choque .....	25
4.5.	Microscopia eletrónica de varrimento (SEM) com microanálise de Raios-X (EDS) e Análise de Padrões de Difração de Elétrons Retrodifundidos (EBSD) .....	27
4.6.	Microscopia Eletrónica de Transmissão .....	36
5.	Conclusões e sugestões de trabalho futuro .....	42
6.	Bibliografia .....	43

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Etapas da produção de aços temperados e revenidos (QP) e arrefecidos após forjamento e laminagem (NQP) (adaptado [23]).	9
<b>Figura 2</b> - Ilustração esquemática do processo de fabrico do Nimax (adaptado [27]).	10
<b>Figura 3</b> - Comparação entre o Nimax e outros aços ferramenta para moldes de injeção de plástico, relativamente à sua maquinabilidade [42].	11
<b>Figura 4</b> - Comparação entre o Nimax e outros aços ferramenta para moldes de injeção de plástico, relativamente à sua maquinabilidade [42].	12
<b>Figura 5</b> -Efeito do aumento das temperaturas de revenido na dureza do aço Nimax (adaptado [37-41]).	12
<b>Figura 6</b> - Microestrutura do Aço Nimax no estado de fornecimento, constituída por bainite e eventualmente martensite (atacado com Böhler Picral).	17
<b>Figura 7</b> - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 480 °C durante 2 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).	18
<b>Figura 8</b> - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 480 °C durante 5 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).	18
<b>Figura 9</b> - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 480 °C durante 12 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).	18
<b>Figura 10</b> - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 500 °C durante 2 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).	19
<b>Figura 11</b> - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 520 °C durante 2 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).	19
<b>Figura 12</b> - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 540 °C durante 2 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).	19
<b>Figura 13</b> - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 540 °C durante 5 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral).	20
<b>Figura 14</b> - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 540 °C durante 12 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral).	20

<b>Figura 15</b> - Microestrutura do Aço DIN EN 1.2711 no estado de fornecimento, constituída por martensite revenida e eventualmente bainite (agulhas escuras) (atacado com Böhler Picral). .....	21
<b>Figura 16</b> - Microestrutura do Aço DIN EN 1.2711 após tratamento térmico de 540 °C durante 2 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral).....	21
<b>Figura 17</b> - Microestrutura do Aço DIN EN 1.2711 após tratamento térmico de 540 °C durante 5 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral).....	21
<b>Figura 18</b> - Microestrutura do Aço DIN EN 1.2711 após tratamento térmico de 540 °C durante 12 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral). ....	22
<b>Figura 19</b> - Dureza HV02 de amostras de Nimax, após estágios de 2, 5 e 12h a diferentes temperaturas. Os pontos assinalados a asterisco foram retirados de [37]......	23
<b>Figura 20</b> - Dureza HV02 de amostras de DIN 1.2711 antes e após tratamentos térmicos com estágios de 2, 5 e 12 h a 540 °C. ....	23
<b>Figura 21</b> - Variação dimensional das amostras de Nimax e DIN 1.2711. ....	25
<b>Figura 22</b> - Variação da Energia absorvida ao Impacto dos provetes de Nimax e DIN 1.2711. .....	26
<b>Figura 23</b> - Fratura de dois provetes no estado de fornecimento. a) DIN 1.2711 (direção a); b) Nimax transversal (direção a). ....	26
<b>Figura 24</b> – Fratura de dois provetes no estado de fornecimento vistas em SEM. a) DIN 1.2711 a; b) Nimax a. ....	27
<b>Figura 25</b> - Imagens SEM de Nimax no estado de fornecimento. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados). ....	28
<b>Figura 26</b> - Padrão de Difração de eletrões por retrodispersão. Estrutura cristalina identificada: ferrite.....	29
<b>Figura 27</b> - Padrão de Difração de eletrões por retrodispersão. Fase identificada: martensite. .....	29
<b>Figura 28</b> - Padrão de Difração de eletrões por retrodispersão. Fase identificada: austenite. .....	29
<b>Figura 29</b> - Imagens SEM de Nimax após tratamento térmico de 5 horas a 480 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).....	30
<b>Figura 30</b> - Imagem SEM de Nimax após tratamento térmico de 5 horas a 480 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).....	31
<b>Figura 31</b> - Análise EDS da amostra de Nimax sujeita a tratamento de 480 °C durante 5 horas. Zonas Z1 (canto superior esquerdo), Z2 (canto superior direito), Z3 (canto inferior esquerdo) e Z4 (canto inferior direito), identificadas na figura 25.....	31

<b>Figura 32</b> - Padrão de Difração de elétrons por retrodispersão. Fase identificada: $(\text{Fe, Cr})_3\text{C}$ , cementite. Amostra: Nimax previamente tratado a 480 °C durante 12 horas.....	32
<b>Figura 33</b> - Imagens SEM de Nimax após tratamento térmico de 12 horas a 480 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).....	33
<b>Figura 34</b> - Análise EDS da amostra de Nimax sujeita a tratamento de 480 °C durante 12 horas. Zonas Z8 (canto superior esquerdo), Z9 (canto superior direito), Z10 (canto inferior esquerdo) e Z11 (canto inferior direito), identificadas na figura 29.....	34
<b>Figura 35</b> - Imagens SEM de Nimax após tratamento térmico de 5 horas a 540 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).....	35
<b>Figura 36</b> - Imagens SEM de Nimax após tratamento térmico de 12 horas a 540 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).....	36
<b>Figura 37</b> - Imagens TEM de Nimax no estado de fornecimento. As zonas mais claras correspondem a ferrite bainítica e as mais escuras a austenite. ....	37
<b>Figura 38</b> - Exemplos de padrões de difração obtidos em TEM com a amostra de Nimax no estado de fornecimento. a) Ferrite bainítica; b) Austenite. ....	38
<b>Figura 39</b> - Imagens TEM de Nimax após tratamento térmico de 5h a 480 °C. As zonas mais claras correspondem a ferrite bainítica e as mais escuras a austenite. ....	39
<b>Figura 40</b> – Micrografias TEM de Nimax após tratamento térmico de 5h a 540 °C. ....	40
<b>Figura 41</b> - Exemplos de padrões de difração obtidos de uma amostra de Nimax depois de sujeito a um tratamento térmico de 540 °C durante 5 horas. a) É possível visualizar pontos que correspondem à ferrite bainítica e outros que correspondem a cementite; b) Martensite. ....	41

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Elementos de liga mais comuns adicionados aos aços ferramenta. Os elementos sublinhados são elementos carburígenos (adaptado [6]). .....	3
<b>Tabela 2</b> - Classificação AISI dos aços ferramenta mais comuns (adaptado [3, 5, 7-9, 12]).	6
<b>Tabela 3</b> - Composição química dos aços do tipo P4 e P6 em % mássica (adaptado [13, 14]). .....	7
<b>Tabela 4</b> - Aços ferramenta para moldes temperados e revenidos (adaptado [18, 35]) .....	8
<b>Tabela 5</b> - Composição química do aço Nimax em % mássica (adaptado [18, 28]).....	10
<b>Tabela 6</b> - Propriedades mecânicas do aço Nimax (adaptado [37-42]). .....	11
<b>Tabela 7</b> - Composição química (%mássica) dos aços analisados. ....	14
<b>Tabela 8</b> - Tratamentos térmicos a que os aços Nimax e DIN 1.2711 foram sujeitos.....	15
<b>Tabela 9</b> - Medições de dureza realizadas a amostras de Nimax. ....	24
<b>Tabela 10</b> - Medições de dureza realizadas a amostras de DIN EN 1.2711. ....	24

## **1. Descrição e Objetivos**

O objetivo primordial deste trabalho, definido em conjunto com a F. Ramada, foi estudar a microestrutura e propriedades mecânicas (dureza e resistência ao choque) de um aço ferramenta, Nimax, pré-endurecido por arrefecimento contínuo. Pretendeu-se analisar também a sua resposta a tratamentos térmicos que simulam as temperaturas e tempos de ciclos de nitruração industriais. Por último, comparou-se o aço Nimax com um outro (EN DIN1.2711), pré-endurecido por têmpera e revenido, também vastamente utilizado na indústria de moldes.

## **2. Introdução**

### **2.1. F. Ramada, Aços e Indústrias S.A.**

A empresa F. Ramada foi fundada em 1935, por Francisco Ramada, após contactos com Otto Karlson da Fargesta Bruks AB da Suécia. Inicialmente, a produção da fábrica limitava-se a fita de serra para madeira, passando mais tarde a incluir outras ferramentas com aplicação nas indústrias da madeira, cortiça e curtumes. A relação com a Fargesta Bruks AB e a neutralidade de Portugal e Suécia relativamente à Segunda Guerra Mundial, propiciaram o início da comercialização de aços especiais [1].

Em 1954, a F. Ramada adquiriu o estatuto de sociedade por quotas, tendo adquirido no ano de 1958, o estatuto de Sociedade Anónima, com a designação que ainda hoje prevalece: F. Ramada, Aços e Indústrias S. A.. Foi também neste último ano que se iniciou uma jornada rumo à especialização em estruturas dedicadas à Armazenagem, com o fabrico da primeira cantoneira perfurada em Portugal, sob a licença Dexion. Foram abertas filiais no Porto, Lisboa, Águeda, Marinha Grande e Luanda [1].

Uma unidade industrial dedicada à Laminagem de Arco de Aço a Frio e Estiragem de Aço a Frio foi criada em Cova do Frade em 1962. Já em 1968 outra fábrica surgiu, desta vez em Viana, Angola, dedicada à produção de catanas, fita de serra e cantoneira perfurada [1].

Hoje em dia a F. Ramada, Aços e Indústrias S.A. consiste num grupo de empresas cotadas na Bolsa de Valores, com um capital social de €15.000.000 e um volume de negócios de cerca de €120.000.000. A sua atividade foca-se em cinco áreas distintas, nas quais é líder do mercado nacional: Aços Especiais (comercialização), Arco de Aço Laminado a Frio, Aço Estirado a Frio, Sistemas de Armazenagem e Ferramentas para Madeira [1].

A empresa possui um Sistema de Gestão da Qualidade segundo a norma NP EN ISO 9001:2008, certificado pela APCER (Associação Portuguesa de Certificação) [2].

## 2.2. Aços ferramenta - Generalidades

Quanto à sua utilização os aços podem ser classificados em:

- Aços estruturais: chapa de aço macio, aço para betão armado e pré-esforçado, para material ferroviário e estruturas metálicas, por exemplo;
- Aços para ferramentas: para produção de matrizes, moldes, punções, brocas e material de corte, por exemplo.

Aços ferramenta são aços utilizados no processamento de materiais (pertencentes a qualquer uma das grandes famílias conhecidas), através de:

- Conformação mecânica (por laminagem, forjamento, trefilagem e estampagem, por exemplo);
- Corte (por torneamento, furação e fresagem, por exemplo);
- Solidificação com forma e dimensões definidas (por vazamento em coquilha e injeção).

As aplicações a que se destinam os aços ferramenta, implicam que estes possuam determinadas propriedades, destacando-se entre elas [3-10]:

- Elevada resistência ao desgaste, o que se traduz num longo período de vida útil da ferramenta, tornando-a economicamente rentável;
- Resistência mecânica e dureza suficientemente elevadas para conformar ou cortar outros materiais.

Como os aços ferramenta devem respeitar requisitos e especificações muito exigentes, são geralmente produzidos em fornos elétricos sujeitos a medidas de controlo da qualidade rigorosas, para garantir a menor quantidade possível de porosidades, segregações, impurezas e inclusões não metálicas. A maior parte dos aços ferramenta é comercializada num estado macio, ou seja, recozido, permitindo assim a sua deformação e transformação numa ferramenta propriamente dita. Por este motivo, é crucial que este tipo de aço possua uma grande aptidão a tratamentos térmicos (recozimento, têmpera e revenido), respeitando os requisitos dimensionais da aplicação a que se destina, de modo a adquirir entre outras, as propriedades referidas acima [3-11].

### 2.2.1. Principais elementos de liga

Os elementos de liga mais comuns na composição de aços ferramenta encontram-se representados na tabela 1 e distinguem-se pela sua tendência alfa-gênica ou gama-gênica e pela afinidade química para carbono. Os elementos alfa-gênicos ampliam o domínio da ferrite ( $\alpha$ ), enquanto que os elementos gama-gênicos ampliam o domínio da austenite ( $\gamma$ ) [5].

**Tabela 1** - Elementos de liga mais comuns adicionados aos aços ferramenta. Os elementos sublinhados são elementos carburígenos (adaptado [6]).

Elementos alfa-gênicos			Elementos gama-gênicos	
<u>Cr</u>	<u>W</u>	<u>Nb</u>	<u>Mn</u>	Cu
<u>Mo</u>	<u>Ti</u>	Ta	Ni	Co
<u>V</u>	Zr	Si	N	C

A adição de elementos de liga a aços ferramenta provoca a alteração [5]:

- das características de temperabilidade do aço;
- da natureza e quantidade de carbonetos;
- da resposta ao tratamento térmico [5].

O que se traduz nas seguintes melhorias [5]:

- Aumento da resistência mecânica de peças de grandes dimensões;
- Diminuição da distorção durante o processo de têmpera do aço;
- Aumento da resistência à abrasão;
- Aumento da resistência e dureza a elevadas temperaturas [5].

Alguns dos efeitos dos elementos de liga mais comuns na definição das propriedades e características dos aços ferramenta, são descritos com mais detalhe em seguida.

#### Carbono

O carbono é o elemento de liga mais importante para o endurecimento de um aço ferramenta. Para teores até 1%, a dureza aumenta com o aumento da quantidade de C, podendo atingir 65 HRC no caso de aços sem liga. Este elemento químico promove a formação de carbonetos do tipo MC e, segundo a bibliografia consultada [3, 6], a quantidade ideal é

alcançada quando todos os elementos de liga formam carbonetos numa matriz endurecida por têmpera e revenido [3, 6].

### Crômio

Dependendo do teor em crômio, pode ocorrer a formação de carbonetos do tipo  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$  e  $Cr_3C$ , no arrefecimento de tratamentos térmicos (recozimento ou têmpera). A adição de Cr melhora a aptidão ao corte, uma vez que se formam carbonetos que contribuem para o aumento da resistência ao desgaste. O seu principal efeito, para teores elevados, é a sua contribuição para a resistência à corrosão e oxidação [3, 5].

### Tungstênio e Molibdênio

O tungstênio e molibdênio têm efeitos semelhantes nas características de aços ferramenta. Quer o molibdênio quer o tungstênio são carburígenos, formando carbonetos do tipo  $M_6C$  (representando o M o tungstênio, ferro, e molibdênio ou uma combinação) comumente designados por  $(Fe, Mo, W)_6C$ . O molibdênio promove a formação de carbonetos do tipo  $M_2C$ , que se tornam instáveis a elevadas temperaturas (cerca de 750 °C) e se transformam em carbonetos do tipo  $M_6C$ , por reação com o ferro. Ambos elementos contribuem para o afinamento do tamanho de grão e aptidão à temperabilidade dos aços [3, 5].

### Vanádio

O vanádio apresenta uma grande tendência carburígena, formando carbonetos do tipo MC, que melhoram a resistência ao desgaste abrasivo e facilitam o corte. A adição deste elemento químico resulta também no afinamento do grão da matriz metálica e no aumento da resistência mecânica a quente devido ao endurecimento secundário [5].

### Manganês

Na ausência de manganês formam-se sulfuretos de ferro (FeS), que são duros, frágeis, possuem um ponto de fusão baixo e são segregados para as fronteiras de grão, fragilizando

o aço. Por isso, pode-se dizer que este elemento melhora a maquinabilidade. Este elemento aumenta a profundidade de têmpera [3, 5].

### **Cobalto**

O cobalto é responsável pelo aumento de dureza de aços de corte rápido, por endurecimento, até valores que rondam os 67-70 HRC, em detrimento da tenacidade e resistência ao desgaste [5].

### **Nióbio**

Este elemento químico tem uma grande tendência a formar carbonetos, contribui grandemente para a temperabilidade dos aços quando dissolvido, controla o crescimento do grão austenítico, eleva a resistência a quente por endurecimento secundário [3].

### **Silício**

Teores até 1% endurecem o aço, mas diminuem a sua ductilidade. Elevadas concentrações deste elemento químico fragilizam a ferramenta [5].

### **Alumínio**

O principal efeito deste elemento químico nos aços é a formação de finos precipitados com azoto e oxigênio, limitando o crescimento de grão austenítico. O alumínio reage com o azoto formando uma camada endurecedora. O alumínio é também um poderoso desoxigenante [6].

### **Níquel**

A adição deste elemento aumenta a resistência, tenacidade e temperabilidade do aço. A probabilidade de fissuração durante a têmpera é diminuída [5].

### 2.2.2. Classificação AISI

O sistema de classificação de aços ferramenta mais utilizado é o AISI e pode ser consultado na tabela 2. Os aços são agrupados em diferentes categorias, tendo em consideração a composição química, aplicações e características como a aptidão à têmpera [3, 7].

Tabela 2 - Classificação AISI dos aços ferramenta mais comuns (adaptado [3, 5, 7-9, 12]).

Classificação	Símbolo
Aço de têmpera em água	W
Aço resistente ao choque	S
Aço para trabalho a frio	
Aço de têmpera em óleo	O
Aço de têmpera ao ar	A
Aço de alto C e alto Cr	D
Aço para trabalho a quente	H
Aço ao Cr	H10 - H19
Aço ao W	H21 - H26
Aço ao Mo	H42 - H43
Aço de corte rápido	
Aço ao W	T
Aço ao Mo	M
Aços para fins especiais	
Aço de baixa liga	L
Aço para moldes	P

#### Aços para fins especiais para moldes, P

Estes aços destinam-se à produção de moldes e contêm como principais elementos de liga o carbono (0,1 a 0,3% p) cromo e níquel.

Dois exemplos de aços ferramenta para moldes são os tipos P4 e P6, cuja composição química se encontra na tabela 3. Estes aços podem atingir o endurecimento total através do arrefecimento ao ar. [5].

Tabela 3 - Composição química dos aços do tipo P4 e P6 em % mássica (adaptado [13, 14]).

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	P	S
P4	0.12	0.10- 0.40	0.20- 0.60	4.00- 5.25	0.4- 1.00	-	0.25	0.03	0.03
P6	0.05- 0.15	0.10- 0.40	0.35- 0.70	1.25- 1.75	-	3.25- 3.75	0.25	0.03	0.03

Tal como o nome indica, estes aços são utilizados na elaboração de moldes, que são sujeitos a elevadas pressões a temperaturas relativamente baixas e ao desgaste abrasivo dos pós a moldar (que podem ser cerâmicos, plásticos ou metais) [3, 5].

A resistência ao amaciamento deste tipo de aço é limitada, principalmente a elevadas temperaturas [5].

Aços ferramenta para moldes utilizados na injeção de polímeros são abordados mais pormenorizadamente na secção 2.3.

### **2.3. Aços ferramenta pré-endurecidos utilizados na indústria de moldes para injeção de polímeros**

A crescente produção e utilização de produtos poliméricos veio influenciar o mercado de aços ferramenta para moldes de injeção de plásticos. Dependendo das especificações da aplicação a que cada aço para moldes se destina, este deve possuir determinadas características. Assim, segundo a bibliografia consultada, os aços ferramenta para moldes podem ser:

- Pré-endurecidos (pre-hardened);
- Altamente resistentes ao desgaste (high wear-resistant);
- Resistentes à corrosão (corrosion resistant);
- De corte fácil (easy-cutting);
- Endurecidos por envelhecimento (aging-hardened);
- Endurecidos por precipitação (precipitation hardened);
- Totalmente temperados (through hardened);
- Endurecidos por cementação (case-hardened) [15-32].

O presente relatório de dissertação debruça-se sobre aços para moldes de injeção de polímeros pré-endurecidos.

Os aços pré-endurecidos, no seu estado de fornecimento, não requerem qualquer tratamento térmico adicional. Para um bom desempenho, estes aços devem possuir as seguintes características:

- Valores de dureza pelo menos entre 28 e 42 HRC;
- Elevada resistência mecânica, à corrosão e ao desgaste;
- Boa aptidão à maquinagem, soldadura, nitruração e polimento;
- Estabilidade dimensional;
- Tempo de vida útil (que pode ir para além dos dez anos) [15-32].

Os aços pré-endurecidos mais tradicionais são produzidos através de um tratamento térmico de têmpera e revenido (QP, Quenched and Tempered Pre-hardened Steel). No entanto, este processo apresenta algumas desvantagens [16-19, 22, 27, 30-33]:

- É moroso;
- Acarreta custos elevados, devido não só ao investimento que é necessário fazer para adquirir e proceder à manutenção de fornos para a realização de austenitizações, mas também ao dispêndio de energia que a realização destes tratamentos térmicos implica;
- Alguns aços não podem ser temperados, pois são muito suscetíveis à formação de “estaladelas” (cracks) [18, 22, 27, 30-33].

Alguns exemplos deste tipo de aço, assim como respetivas composições químicas e propriedades encontram-se na tabela 4:

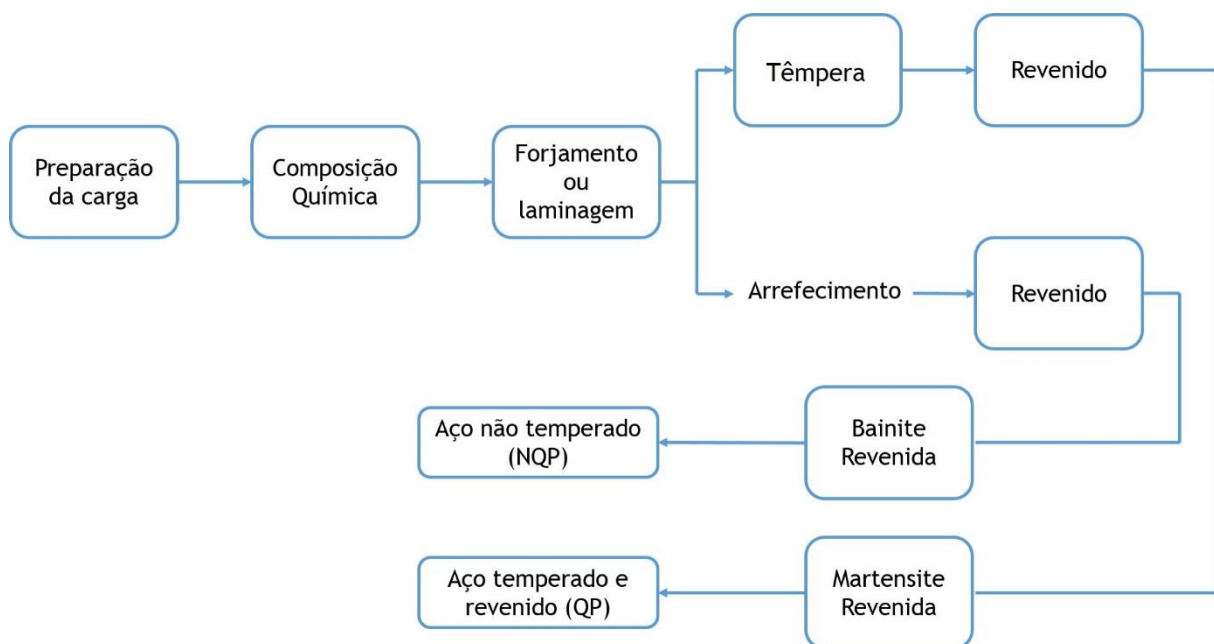
Tabela 4 - Aços ferramenta para moldes temperados e revenidos (adaptado [18, 34])

Impax Supreme HH							
Composição Química							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.36	0.28	1.39	0.02	0.008	1.97	1.0	0.2
Propriedades							
<ul style="list-style-type: none"> <li>• - 40 HRC; excelente polibilidade e maquinabilidade; boa resistência ao desgaste; adequado para nitruração e soldadura.</li> </ul>							
DIN 2738							
Composição Química							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.45	0.40	1.60	0.030	0.030	2.10	1.20	0.25
Propriedades							
<ul style="list-style-type: none"> <li>• - 310 HB; excelente polibilidade e maquinabilidade; boa resistência ao desgaste; adequado para nitruração e soldadura.</li> </ul>							

Aços pré-endurecidos através de outros processamentos, como o arrefecimento contínuo (NQP, Non\_Quenched Pre-hardened Steel), começaram a surgir na década de 1990, de modo a evitar os inconvenientes supracitados. O Nimax, que é produzido pela Uddeholm e veio substituir o Impax HH (que por sua vez é uma modificação do AISI P20), é um exemplo de aço utilizado na indústria de moldes, produzido através de arrefecimento contínuo após operações de forjamento [16-19, 22, 27, 30-33].

Na figura 1, pode observar-se com mais pormenor as etapas de produção de aços pré-endurecidos através de têmpera ou arrefecimento direto, assim como a microestrutura expectável de cada um [22].

Geralmente, um aço QP é austenitizado 50°C acima da temperatura AC3 sendo temperado num meio adequado, que poderá ser um banho polimérico ou de óleo. O aço é então sujeito a um tratamento térmico de revenido com o objetivo de se estabilizar a sua microestrutura e obter um balanço entre as propriedades mecânicas, designadamente, a dureza e a tenacidade. Na maior parte dos casos, o revenido realiza-se em dois ou três passos, de modo a transformar a austenite residual e martensite não revenida [22].



**Figura 1** - Etapas da produção de aços temperados e revenidos (QP) e arrefecidos após forjamento e laminagem (NQP) (adaptado [22]).

A microestrutura de um aço temperado e revenido é geralmente martensítica, podendo apresentar alguma quantidade de bainite, ao passo que a de um NQP é bainítica. Assim, pode-se afirmar que a dureza de um aço temperado é superior à de um NQP e que, conseqüentemente, para baixar a dureza de um aço temperado são necessários tempos e

temperaturas de revenido superiores às de um não temperado, traduzindo-se isto num maior gasto de energia [22].

## 2.4. Aço Nimax

Tal como referido anteriormente, o aço Nimax, cuja composição química pode ser consultada na tabela 5, classifica-se como NQP, ou seja, é um aço pré-endurecido através de arrefecimento contínuo ao ar após as operações de forjamento; este ciclo térmico pode ser analisado na figura 2 [18, 28].

Tabela 5 - Composição química do aço Nimax em % mássica (adaptado [18, 28]).

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,1	0,3	2,5	3,0	0,3	1,0

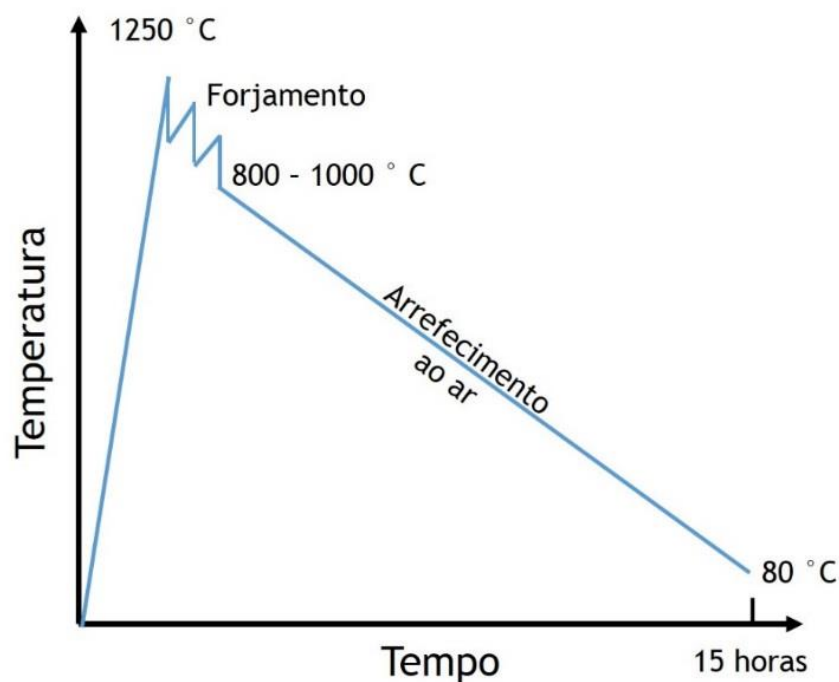


Figura 2 - Ilustração esquemática do processo de fabrico do Nimax (adaptado [28]).

Na tabela 6 é possível consultar algumas características mecânicas e físicas deste aço de baixo carbono no seu estado de fornecimento. Nas figuras 3 e 4 é possível observar a comparação feita entre o Nimax e outros aços ferramenta para moldes de injeção de plásticos, em relação a alguns parâmetros de maquinabilidade [36-41].

Tratamentos de revenido não conferem uma dureza superior ao Nimax, deteriorando até as suas propriedades de dureza e resistência mecânica. Na figura 5 apresenta-se o efeito de tratamentos de revenido na dureza deste aço, durante tempos de estágio de duas horas, podendo-se verificar que a dureza diminui com o aumento da temperatura de revenido. A dureza típica deste aço no seu estado de fornecimento (cerca de 40 HRC) pode ser restaurada elevando-se este aço até aos 850 °C, por um período de 30 minutos e arrefecendo-o posteriormente ao ar [36-40].

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do aço Nimax (adaptado [36-40]).

Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Young (GPa)	Calor específico (J/kg°C)	Dureza (HB)	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	Alongamento (%)
7900	205	460	360-400	785	1265	11

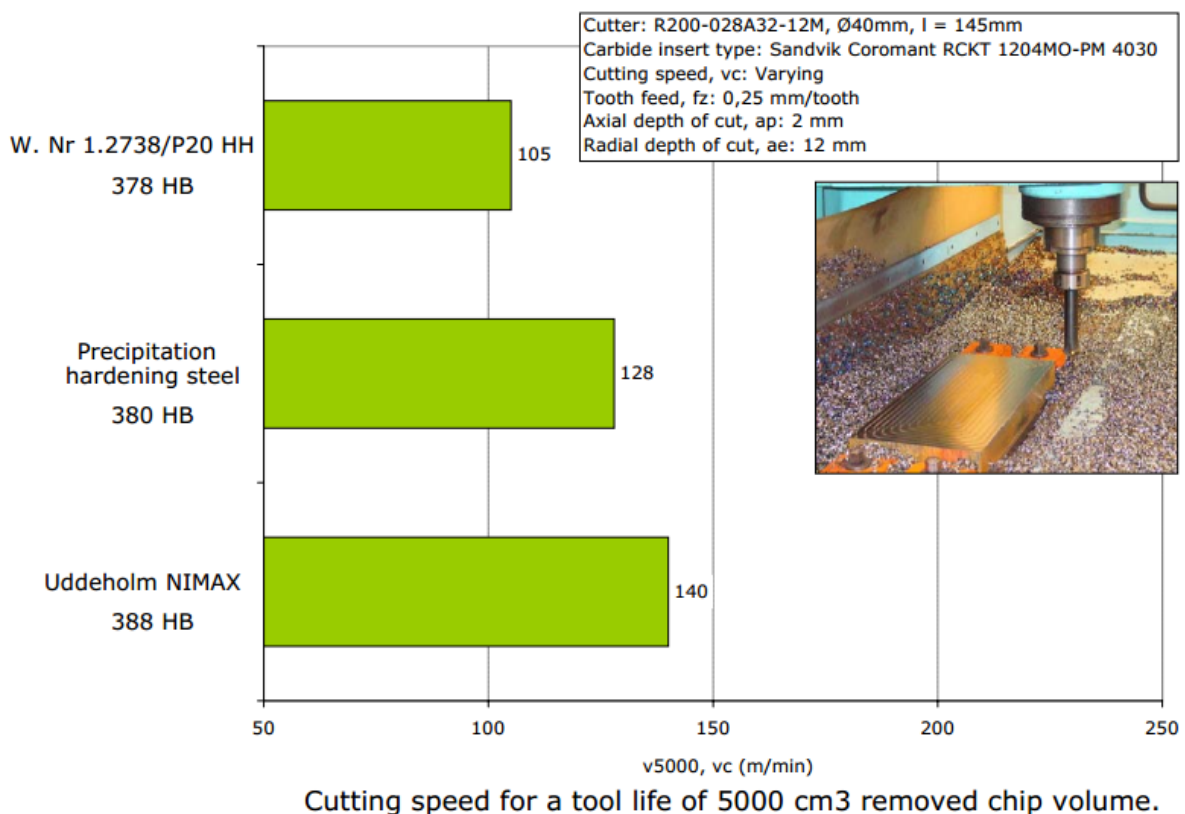


Figura 3 - Comparação entre o Nimax e outros aços ferramenta para moldes de injeção de plástico, relativamente à sua maquinabilidade [41].

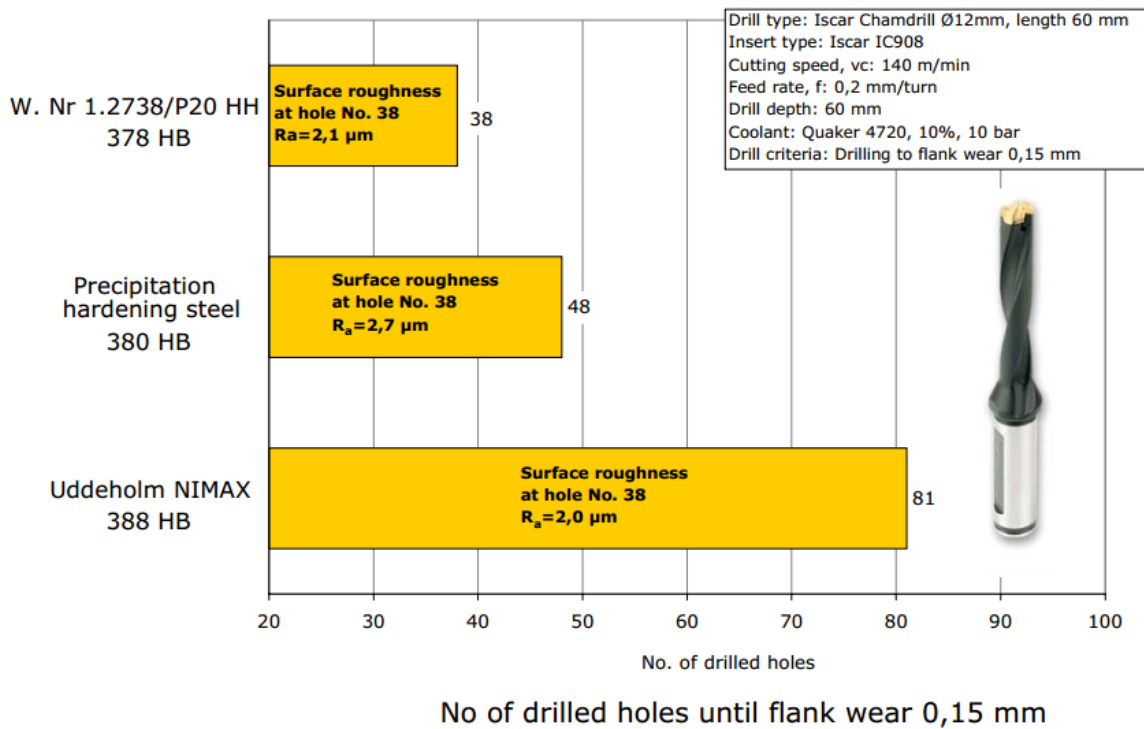


Figura 4 - Comparação entre o Nimax e outros aços ferramenta para moldes de injeção de plástico, relativamente à sua maquinabilidade [41].

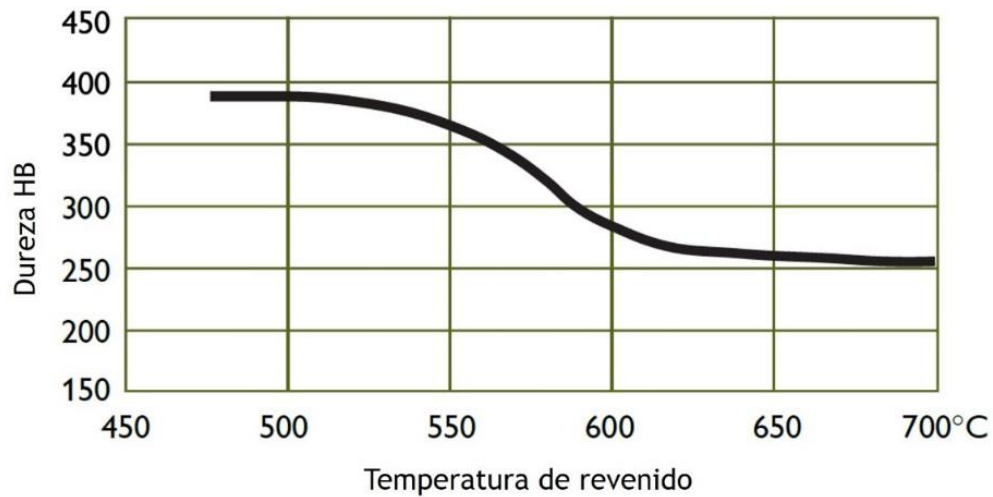


Figura 5 -Efeito do aumento das temperaturas de revenido na dureza do aço Nimax (adaptado [37-40]).

A microestrutura do Nimax é essencialmente bainítica, contendo cerca de 2 a 7% de austenite residual, precipitados de cementite e cerca de 5 a 10% de martensite auto revenida [18, 28,36-41]

As propriedades físicas e mecânicas do Nimax no seu estado de fornecimento tornam-no ideal para as seguintes aplicações [18, 28, 36-41]:

- Moldes para injeção de polímeros indústria de embalagens (produção de recipientes de diferentes tipos); indústria automível (produção de refletores e peças interiores de dimensões consideráveis); eletrodomésticos (fabrico de painéis e puxadores);
- Material de suporte para forjamento e moldes de fundição;
- Material de suporte para ferramentas de corte;
- Componentes estruturais [18, 28, 36-40].

### 3. Materiais e Procedimento Experimental

#### 3.1. Materiais e Provetes

A composição química dos aços estudados pode ser consultada na tabela 7.

Tabela 7 - Composição química (%mássica) dos aços analisados.

Aço	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
Nimax	0,1	0,3	2,5	3,0	0,3	1,0
1.2711	0,55	0,26	0,80	1,10	0,49	1,70

Foram produzidos provetes cúbicos (20x20x20 mm) e provetes de choque de Nimax e DIN 1.2711. Os provetes de choque respeitam os requisitos da norma NP EN 10045-1.

#### 3.2. Preparação metalográfica e análise em MO, SEM, EBSD e TEM

Para observação ao MO e análise SEM/EDS e EBSD desbastou-se os provetes cúbicos com uma série de lixas de 180, 320, 400, 600, 800 MESH. O polimento foi realizado com suspensão abrasiva de diamante de 6 e 1  $\mu\text{m}$  em panos apropriados. As amostras analisadas em EBSD foram ainda polidas com uma suspensão de sílica.

O reagente utilizado para atacar as amostras, com o fim de as observar ao microscópio ótico e facilitar a sua visualização em SEM, denomina-se por Böhler Picral e é constituído por 930 ml de etanol, 20 g de ácido pícrico e 50 ml de ácido clorídrico concentrado [18].

O equipamento de microscopia ótica utilizado permite ampliação até 1000X. O equipamento de SEM e EDS/ EBSD designa-se (FEI Quanta 400FEG ESEM/ EDAX Genesis X4M) operou com uma energia de 15 keV.

A preparação de amostras para TEM consistiu em:

1. Desbastar (até à lixa de 800 MESH) e polir (com suspensão abrasiva de diamante de 6 e 1  $\mu\text{m}$ ) cada amostra até se obter uma superfície sem riscos e com uma espessura igual ou inferior a 0,1 mm;
2. Cortar as amostras com diâmetro de 3 mm;
3. Furar as amostras através de eletropolimento, recorrendo-se a um equipamento Struers Tenupol-3. A solução eletrolítica utilizada consiste em 5% de ácido

perclórico, 25% de glicerol e 70% de etanol. A amperagem utilizada foi de 0,5 A e a voltagem de 20/60 V.

O equipamento TEM utilizado (FEI-Tecnai G2 Spirit Biotwin) operou com a energia de 20 kV.

### 3.3. Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos aos quais os aços Nimax e DIN 1.2711 foram sujeitos são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Tratamentos térmicos a que os aços Nimax e DIN 1.2711 foram sujeitos.

Aquecimento (°C/minuto)	Temperatura de estágio (°C)	Tempo de estágio (horas)	Velocidade de arrefecimento (°C/minuto)
8	480, 500*, 520*, 540	2 <sup>(a, b)</sup> , 5 <sup>(a)</sup> , 12 <sup>(a)</sup>	8
<b>Atmosfera</b>	Fluxo de Árgon		

a: Tempos de estágio a que o aço Nimax foi sujeito; b: Tempos de estágio a que o aço DIN 1.2711 foi sujeito.

\*\* Não foram realizados estágios a estas temperaturas para 5 e 12 horas.

O controlo dimensional, antes e após tratamento térmico, de todas as amostras cujo tempo de estágio foi de duas horas, foi realizado com um micrómetro digital NIKON ELIPSE 150 mitutoyo, cuja amplitude de medição é de 0-25 mm e a resolução é de 0,001 mm.

### 3.4. Ensaios de dureza

Mediu-se a microdureza Vickers das amostras de NIMAX e DIN 1.2711 no seu estado de fornecimento e depois de termicamente tratadas, como descrito em 3.3. A carga utilizada foi de 200 gramas e o tempo de aplicação da mesma foi de 15 segundos.

### 3.5. Ensaio de Choque

Provetes de choque que respeitavam as dimensões indicadas na norma NP-EN 10045-1, foram sujeitos a ensaios de Charpy, seguindo os procedimentos referidos na mesma norma. Os ensaios de Charpy foram realizados com um pêndulo Galdabini CH/30 cuja energia é de 300 J.

Antes da realização de ensaios de choque, realizou-se um ensaio com provetes padrão para verificar o estado de funcionamento do equipamento.

Alguns dos provetes de choque foram previamente tratados termicamente. Assim, as condições ensaiadas foram as seguintes, para ambos os aços:

- Estado de fornecimento, em duas direções distintas, designadas de *a* e *b*;
- Após tratamento térmico à temperatura de 500 °C, durante 2 horas;
- Após tratamento térmico à temperatura de 540 °C, durante 2 e 12 horas.

Foram ensaiados três provetes de cada condição.

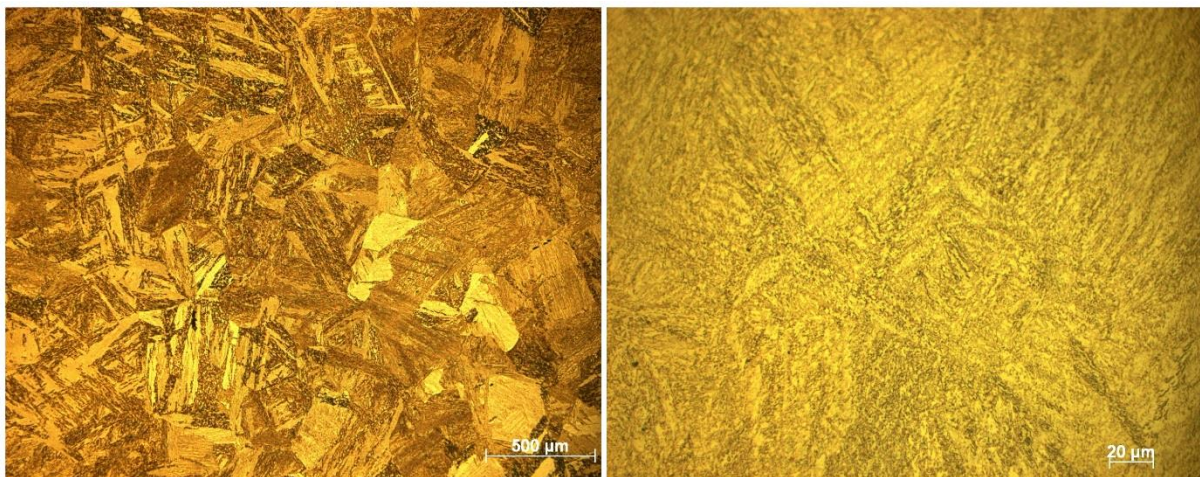
## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Microestruturas Microscópio Ótico

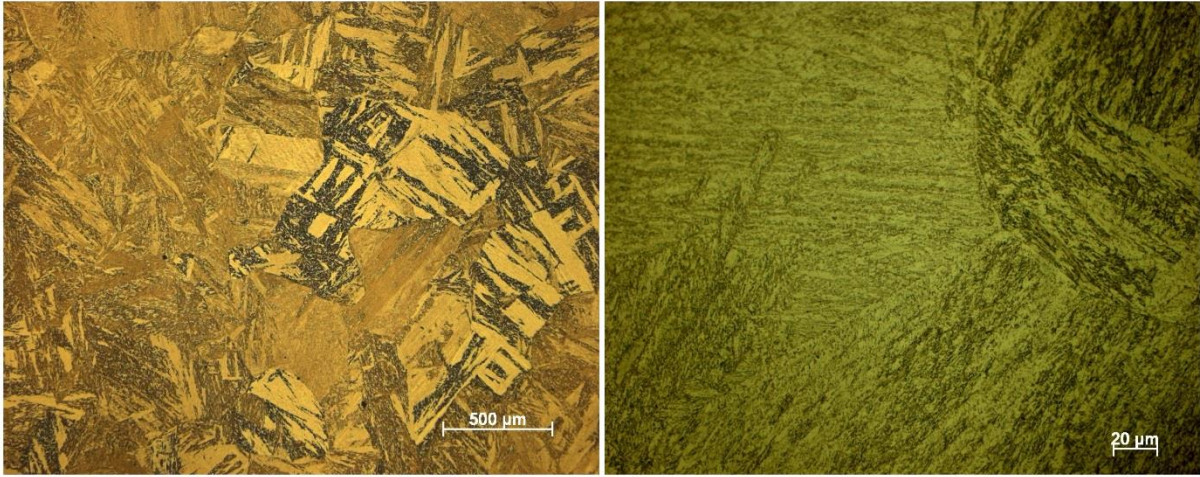
#### 4.1.1. Aço Nimax

É possível constatar que o Nimax possui uma estrutura constituída por bainite (zonas atacadas mais escuras) e eventualmente martensite (zonas atacadas mais claras) no seu estado de fornecimento, através da observação da figura 6.

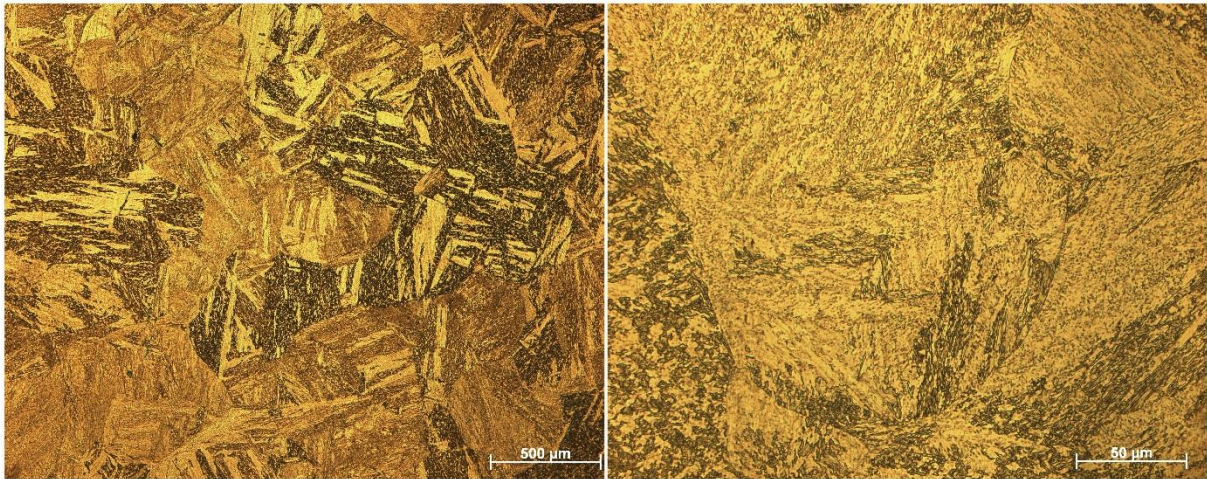
Através de técnicas como a difração de Raios-X, SEM, EBSD e TEM (como se verá mais detalhadamente adiante), também se pôde confirmar que esta microestrutura contém ainda austenite residual. Nas figuras 7 a 14, pode-se observar as várias microestruturas obtidas para cada tratamento térmico realizado.



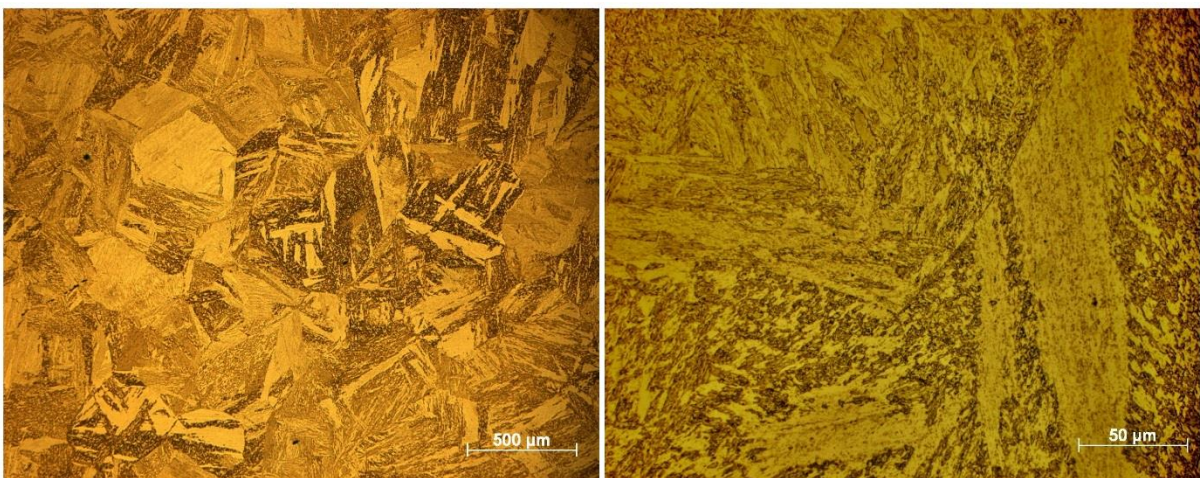
**Figura 6** - Microestrutura do Aço Nimax no estado de fornecimento, constituída por bainite e eventualmente martensite (atacado com Böhler Picral).



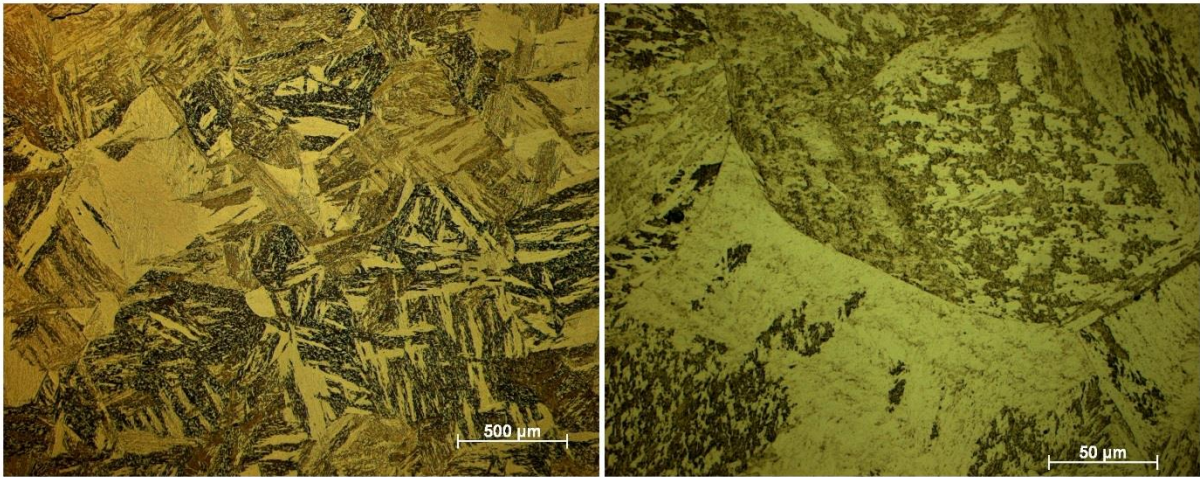
**Figura 7** - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 480 °C durante 2 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).



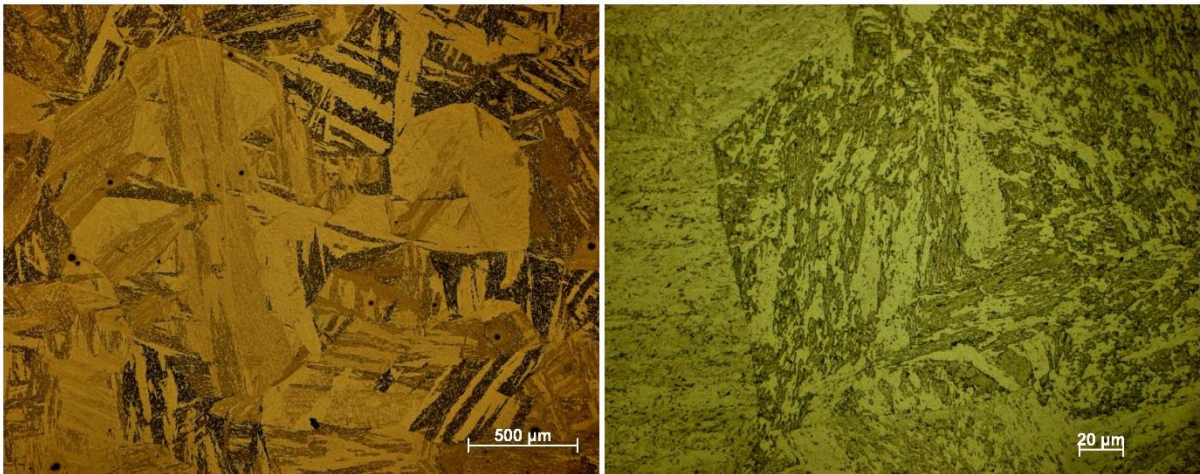
**Figura 8** - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 480 °C durante 5 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).



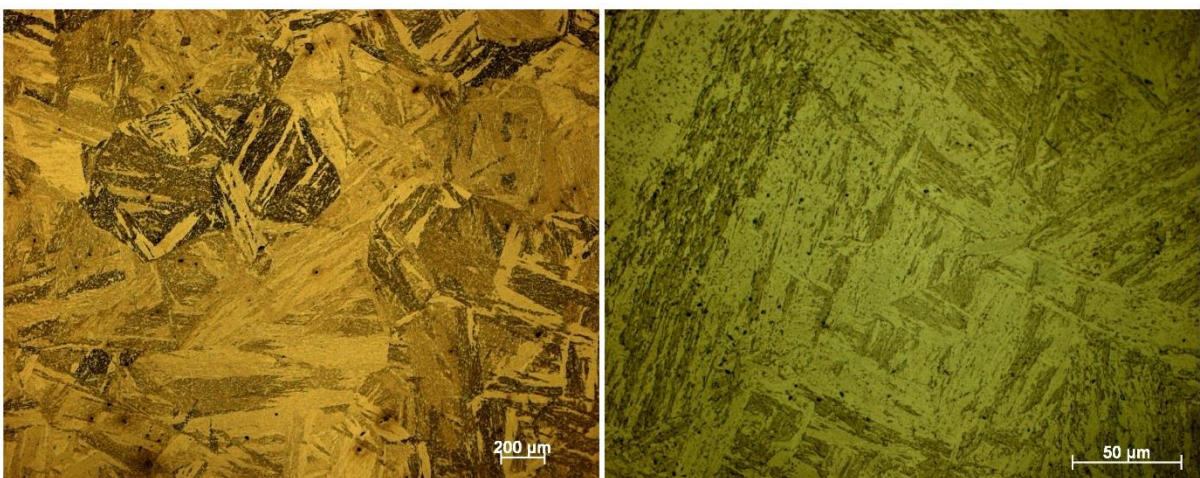
**Figura 9** - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 480 °C durante 12 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).



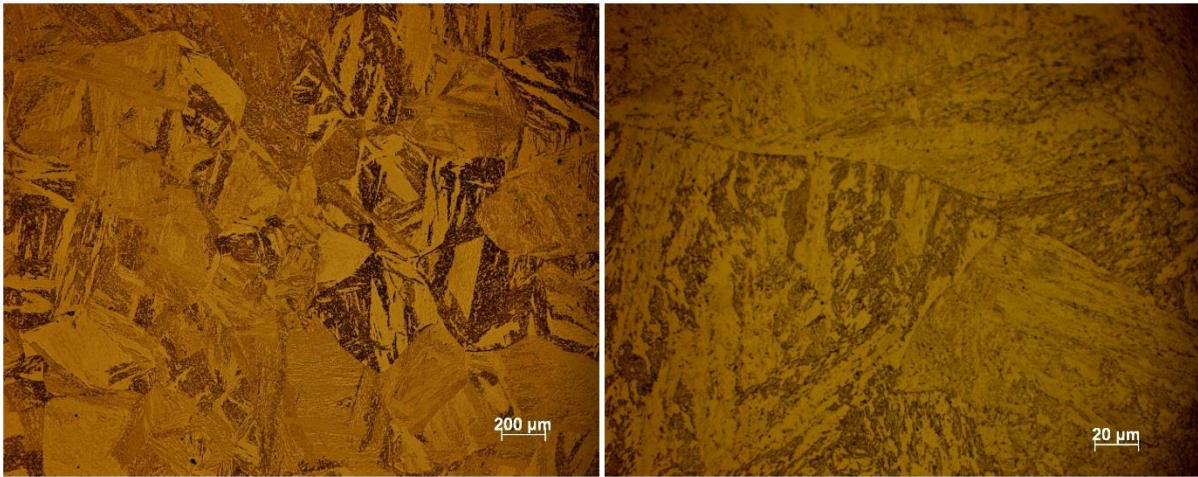
**Figura 10** - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 500 °C durante 2 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).



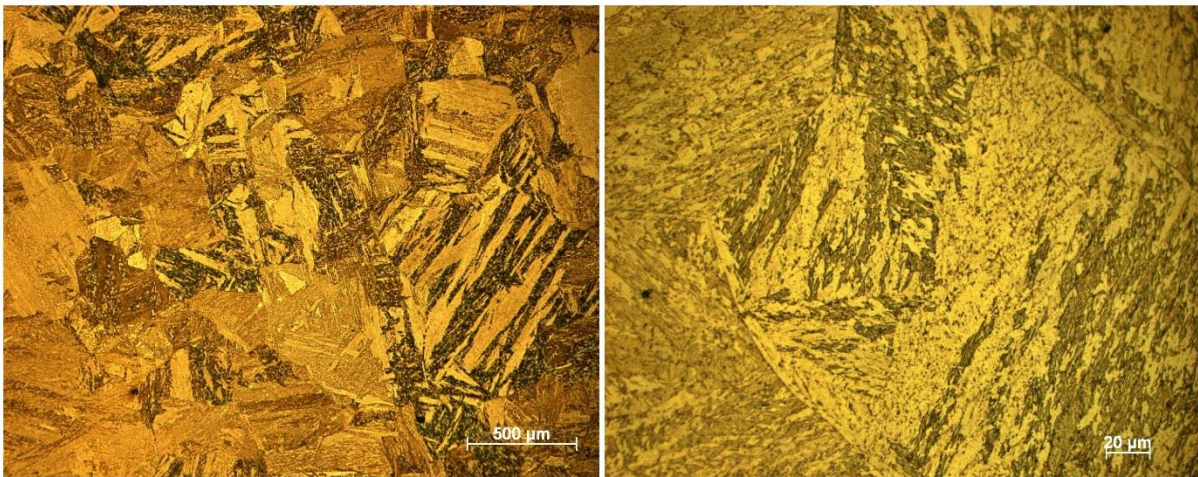
**Figura 11** - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 520 °C durante 2 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).



**Figura 12** - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 540 °C durante 2 horas, constituída por bainite e eventualmente martensite revenida (atacado com Böhler Picral).



**Figura 13** - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 540 °C durante 5 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral).

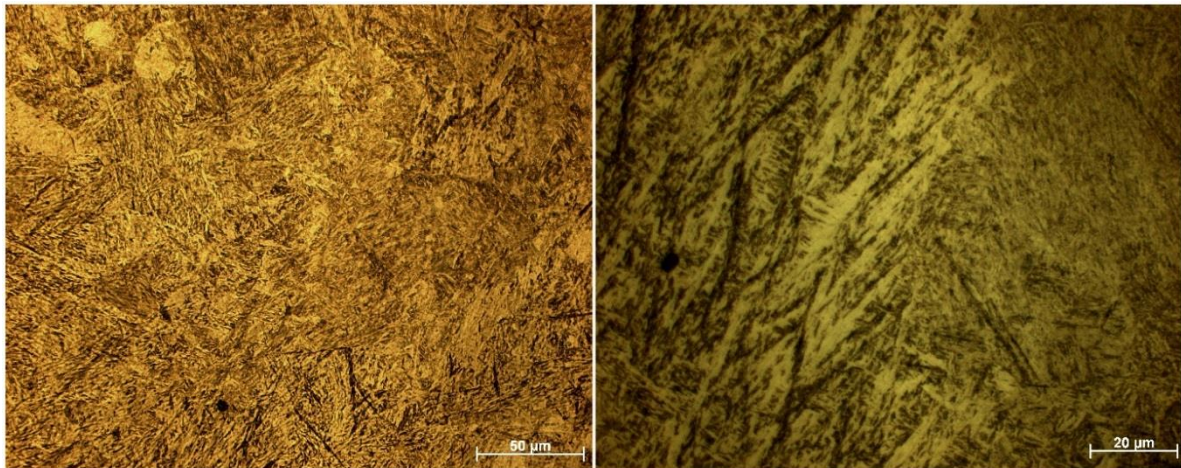


**Figura 14** - Microestrutura do Aço Nimax após tratamento térmico de 540 °C durante 12 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral).

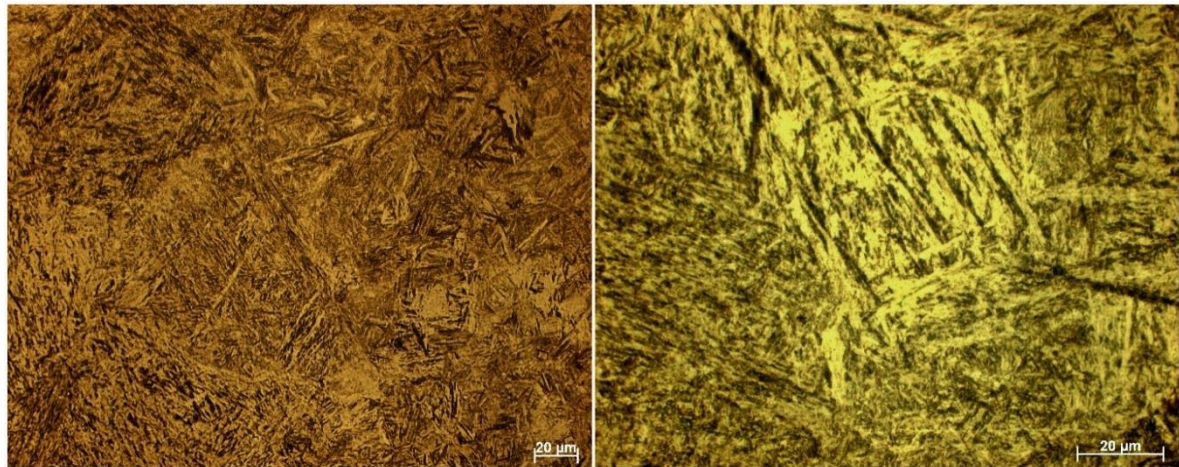
#### 4.1.2. Aço DIN EN 1.2711

É possível constatar que o aço DIN 1.2711 possui aparentemente uma estrutura essencialmente bainítica (zonas atacadas mais escuras) e martensítica (zonas atacadas mais claras) no seu estado de fornecimento, através da observação da figura 15.

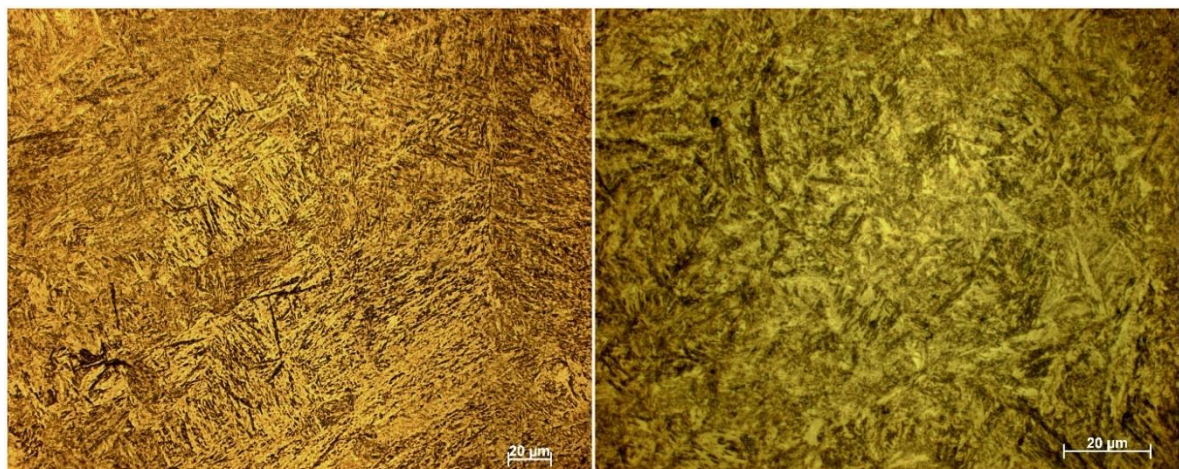
Nas figuras 16 a 18, pode-se observar as microestruturas obtidas para cada tratamento térmico a que este aço foi submetido, também elas constituídas por bainite e martensite.



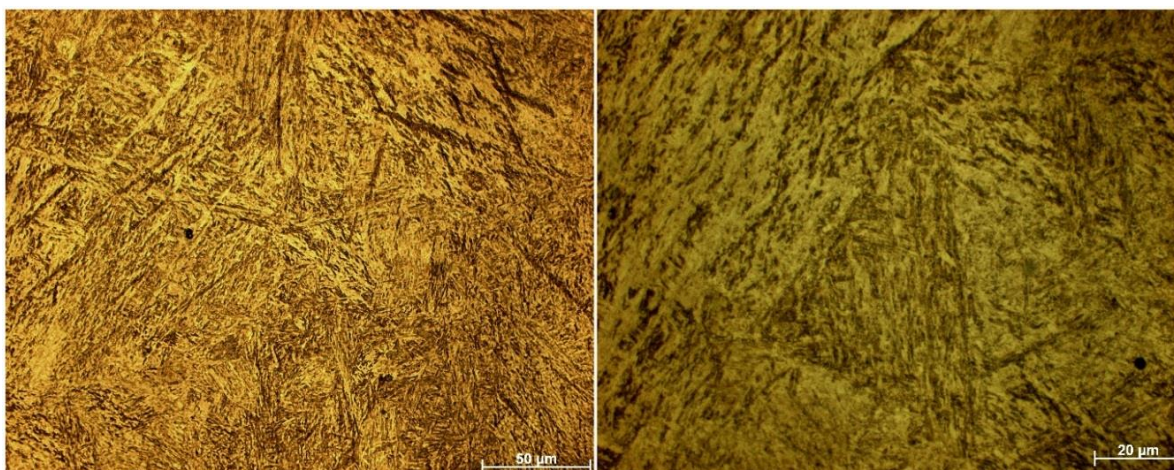
**Figura 15** - Microestrutura do Aço DIN EN 1.2711 no estado de fornecimento, constituída por martensite revenida e eventualmente bainite (agulhas escuras) (atacado com Böhler Picral).



**Figura 16** - Microestrutura do Aço DIN EN 1.2711 após tratamento térmico de 540 °C durante 2 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral).



**Figura 17** - Microestrutura do Aço DIN EN 1.2711 após tratamento térmico de 540 °C durante 5 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral).



**Figura 18** - Microestrutura do Aço DIN EN 1.2711 após tratamento térmico de 540 °C durante 12 horas, constituída por martensite revenida e bainite (atacado com Böhler Picral).

## 4.2. Durezas

Nas figuras 19 e 20 pode-se observar a variação da dureza HV 0,2 para diferentes condições do aço Nimax e do aço 1.2711, respetivamente. As médias são representadas por pontos e os desvios padrões por barras de erro. Nas tabelas 9 e 10 estão expostas todas as medições de dureza realizadas.

Na figura 19, os pontos que se encontram assinalados com um asterisco foram retirados da dissertação *Estudo Do Processo De Nitruração De Um Aço Ferramenta Nimax* [37], pois poderia ser interessante confrontar os dados obtidos, com os disponíveis na bibliografia para diferentes condições (tempos de estágio de 5 e 12h para temperaturas de 500 e 520 °C). As condições de ensaio utilizadas pela fonte consultada foram as mesmas deste trabalho experimental.

Verifica-se que o aço Nimax sofre um amaciamento particularmente significativo quando tratado termicamente a temperaturas de estágio mais elevadas (520 e 540 °C). Tempos de estágio mais longos também exercem influência no abaixamento da dureza.

O aço DIN EN 1.2711 amacia ligeiramente a 540 °C (15 a 20 HV), mas o tempo de estágio não parece ter grande influência na diminuição de dureza.

O aço Nimax sofre um amaciamento maior que o aço DIN EN 1.2711, quando sujeito a estágios de 540 °C a 5 e 12 horas. Isto poder-se-à dever a uma quantidade de precipitados mais elevada no aço DIN EN 1.2711, uma vez que possui um teor superior em carbono.

A menor estabilidade que o aço DIN EN 1.2711 do ponto de vista de dureza (e de variação dimensional), pelo menos após tratamento térmico a 540 °C durante os tempos de estágio

mais longos, torna o aço Nimax menos interessante no que respeita ao seu processamento (por exemplo no caso de se necessitar realizar uma nitruração nestas condições).

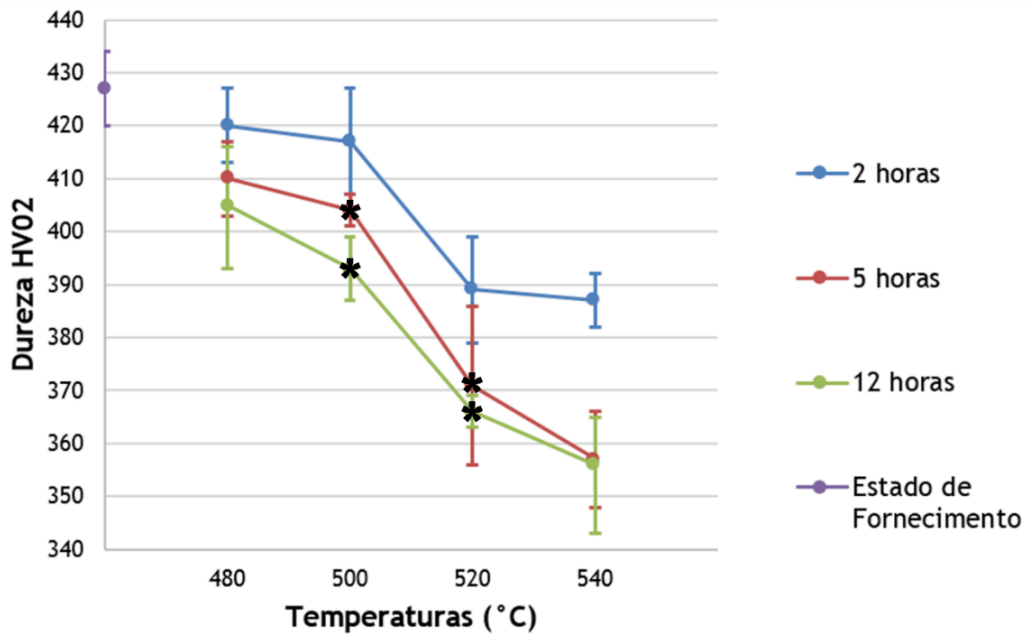


Figura 19 - Dureza HV02 de amostras de Nimax, após estágios de 2, 5 e 12h a diferentes temperaturas. Os pontos assinalados a asterisco foram retirados de [37].

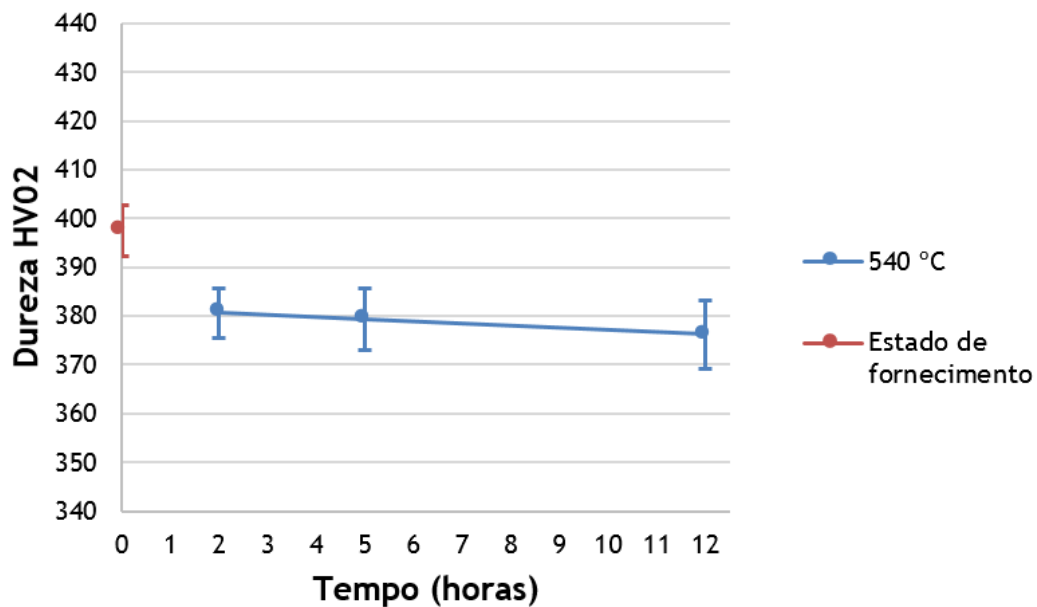


Figura 20 - Dureza HV02 de amostras de DIN 1.2711 antes e após tratamentos térmicos com estágios de 2, 5 e 12 h a 540 °C.

Verifica-se que a dureza da microestrutura bainítica e martensítica do aço Nimax, é superior à da microestrutura constituída por martensite revenida e bainite do aço DIN EN 1.2711, no estado de fornecimento.

Tabela 9 - Medições de dureza realizadas a amostras de Nimax.

		Condições								
		Forneci- mento	480 °C; 2h	480 °C; 5h	480 °C; 12h	500 °C; 2h	520 °C; 2h	540 °C; 2h	540 °C; 5h	540 °C; 12h
Medições	1	425,6	425,4	417,7	409,8	413,6	394,9	377,4	351,8	357,9
	2	429,7	405,9	402,3	402,3	406,2	391,3	391,3	364,2	364,2
	3	421,6	433,7	402,3	398,6	402,2	384,2	380,8	374	364,7
	4	425,6	425,6	402,4	402,2	417,5	384,2	391,2	364,3	354,8
	5	417,6	421,5	406	406,1	421,5	374,1	391,3	354,8	364
	6	425,6	417,6	409,9	406,1	417,4	374,1	391,2	361,1	342,8
	7	417,6	429,6	409,8	413,7	438,1	391,3	384,2	348,7	345,7
	8	433,9	406	421,5	407,6	413,6	406	387,7	339,9	351,7
	9	442,3	409,8	413,7	397,6	421,5	398,6	391,3	357,9	354,8
Média		426,6	419,5	409,5	404,9	416,8	416,8	387,4	357,4	355,6
Desvio Padrão		7,4	9,7	6,6	5,2	9,7	9,7	5	9,4	7,5

Tabela 10 - Medições de dureza realizadas a amostras de DIN EN 1.2711.

		Condições			
		Forneci- mento	540 °C; 2h	540 °C; 5h	540 °C; 12h
Medições	1	402,3	370,7	374,2	364,3
	2	397,6	374,3	377,5	387,9
	3	398,6	380,8	387,5	367,5
	4	402,3	391,3	380,9	387,8
	5	406,1	394,9	387,8	374,1
	6	391,3	370,7	378,9	357,9
	7	394,9	391,3	368,2	387,8
	8	387,8	377,4	387,8	374,1
	9	394,9	374,1	374,1	384,3
Média		397,3	380,6	379,7	376,2
Desvio Padrão		5,2	8,5	6,3	10,2

### 4.3. Variação dimensional linear

Mediu-se a variação dimensional do aço Nimax quando sujeito a tratamentos térmicos, variando-se a temperatura (480, 500, 520 e 540 °C) para um tempo de estágio de 2 horas. Analisou-se também a variação dimensional do aço DIN EN 1.2711, quando sujeito a 540 °C, durante 2 horas. As variações dimensionais dos diferentes aços para as condições descritas podem ser consultadas na figura 21.

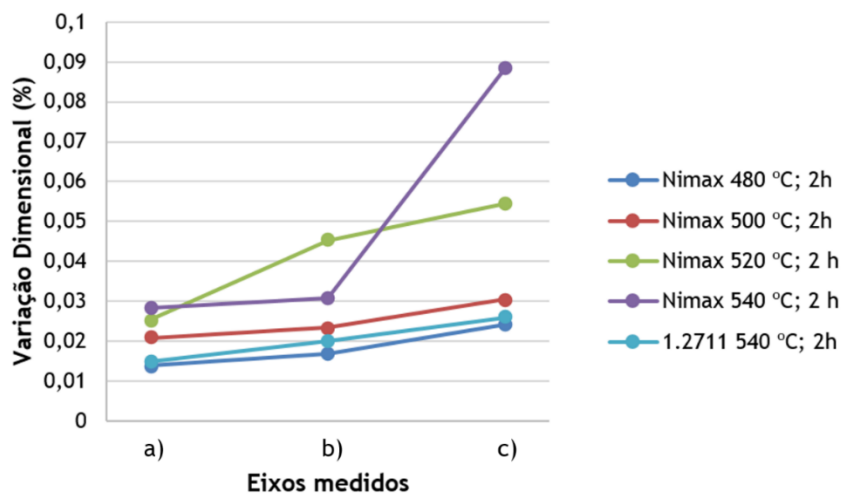


Figura 21 - Variação dimensional das amostras de Nimax e DIN 1.2711.

Pode-se verificar que, de forma geral, quanto mais elevada a temperatura de estágio, maior a variação dimensional do aço Nimax. Esta variação poderá dever-se à transformação de alguma austenite residual, à perda da tetragonalidade da martensite e à possível formação de carbonetos.

### 4.4. Ensaios de choque

A energia absorvida no impacto para diferentes condições de provetes de Nimax e DIN EN 1.2711 pode ser analisada na figura 22.

Verificou-se uma diferença significativa na energia absorvida pelos provetes de DIN 1.2711 retirados da direção *a* e da direção *b*. Os provetes *a* absorveram cerca de cinco vezes mais energia que os *b*. Esta discrepância está relacionada com o processo de fabrico do aço (direção de laminagem).

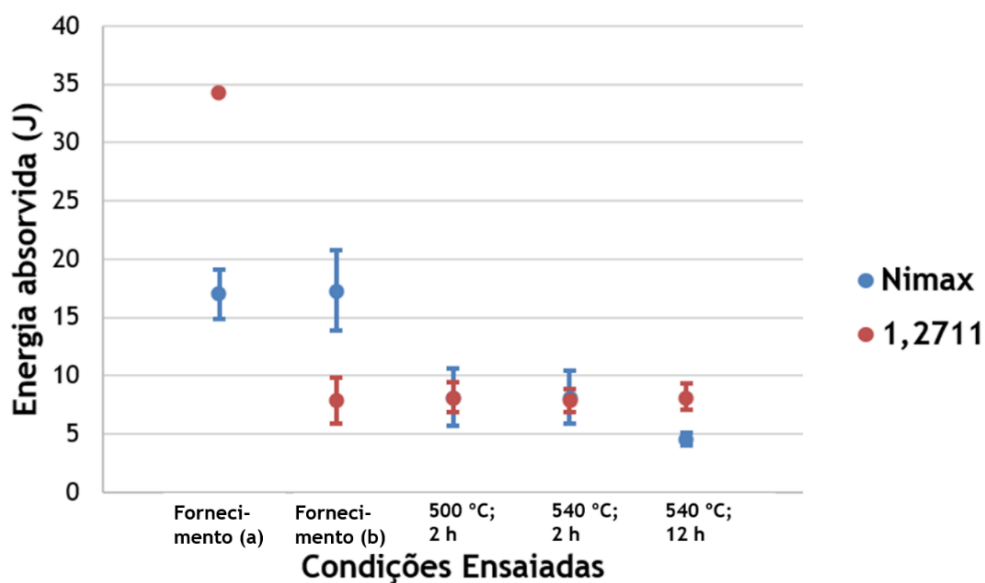


Figura 22 - Variação da Energia absorvida ao Impacto dos provetes de Nimax e DIN 1.2711.

Constata-se que ambos os aços, perdem tenacidade depois de sujeitos a tratamentos térmicos de revenido. Ambos apresentam uma resposta semelhante ao impacto quando termicamente tratados a 500 °C e 540 °C, com estágio de 2 horas. Porém, o Nimax absorve ligeiramente menos energia que o DIN EN 1.2711 após um tratamento de 540 °C durante 12h.

É interessante verificar, através da figura 23, a fratura do provete de Nimax *a*, no estado de fornecimento, brilhante e frágil, ao passo que a de um provete de DIN EN 1.2711 *a*, também no estado de fornecimento, mais dúctil e com alguma deformação. A figura 24 mostra as fraturas destes provetes vistas em SEM.

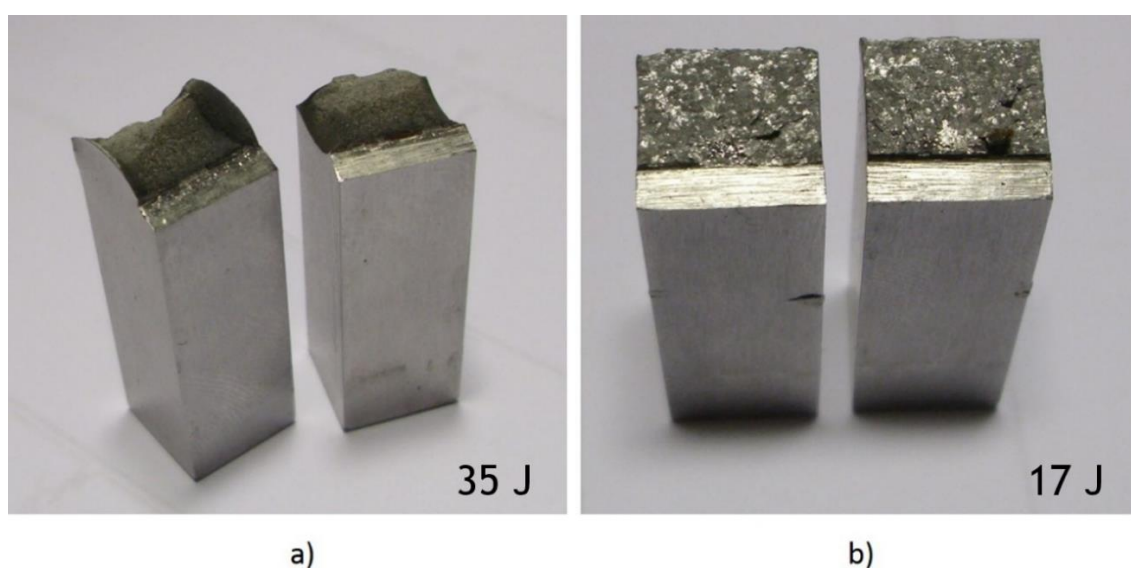


Figura 23 - Fratura de dois provetes no estado de fornecimento. a) DIN 1.2711 (direção *a*); b) Nimax transversal (direção *a*).

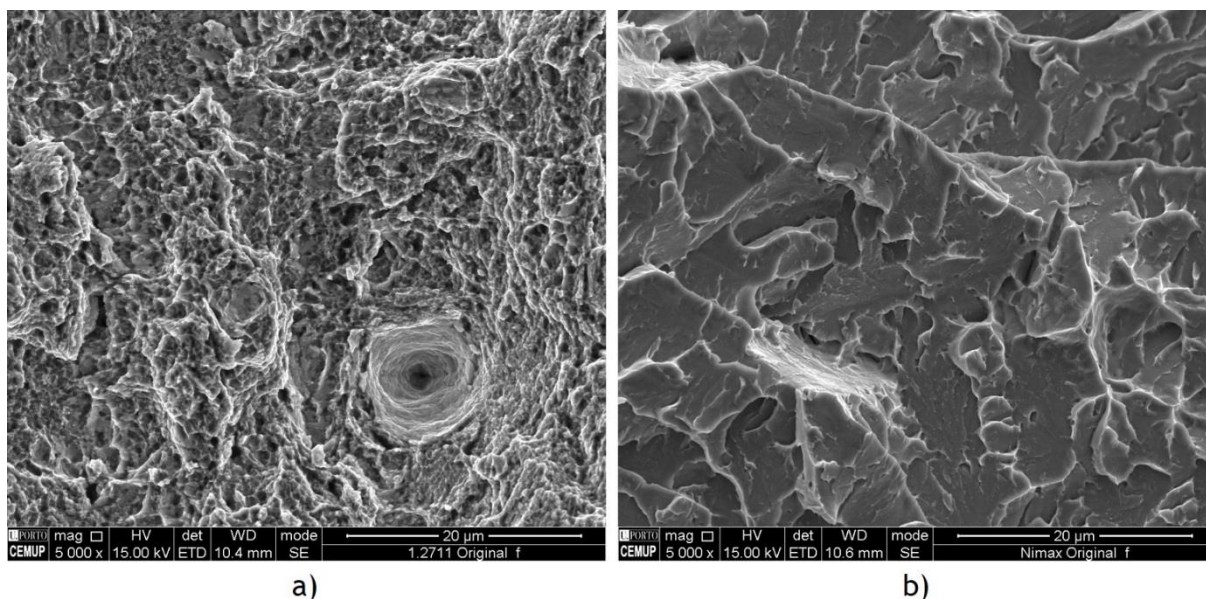


Figura 24 – Fratura de dois provetes no estado de fornecimento vistas em SEM. a) DIN 1.2711 a; b) Nimax a.

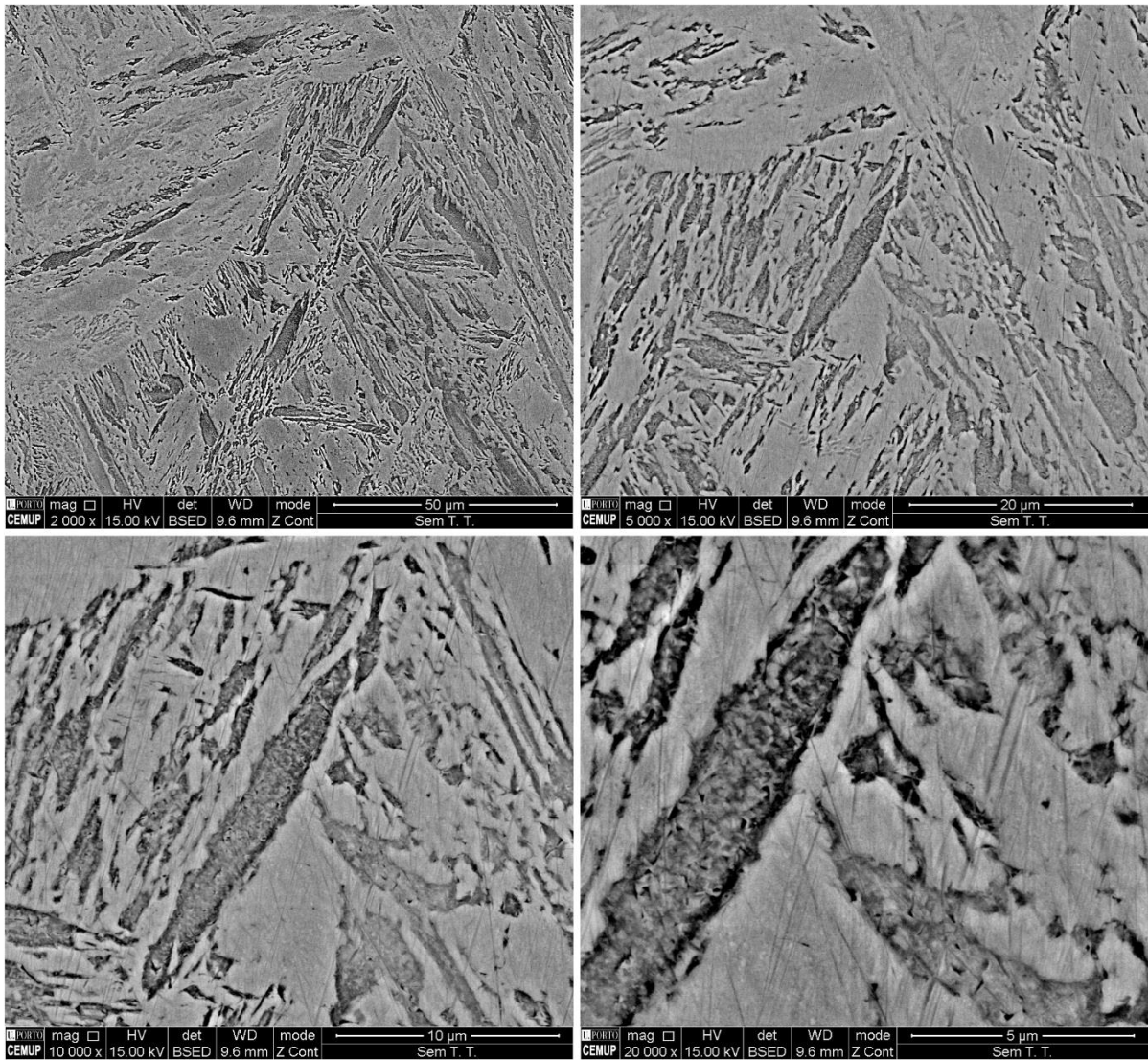
#### 4.5. Microscopia eletrónica de varrimento (SEM) com microanálise de Raios-X (EDS) e Análise de Padrões de Difração de Eletrões Retrodifundidos (EBSD)

Neste capítulo pode-se observar figuras SEM de Nimax para diferentes condições. Embora visualmente se observem contrastes nas diferentes microestruturas observadas em SEM, as análises de EDS não mostraram diferenças significativas de composição química. Isto poderá dever-se ao facto das fases presentes (martensite e eventualmente martensite e austenite residual) possuírem composições químicas semelhantes. Consequentemente, seria necessário distingui-las através das suas estruturas cristalinas, recorrendo-se a técnicas como EBSD e TEM.

Seria expectável que pelo menos os carbonetos (mencionados na bibliografia) fossem possíveis de identificar através da análise EDS, uma vez que a composição química seria claramente diferente. No entanto, tal não se verificou. Isto poderá dever-se ao volume de interação (de alguns micrómetros cúbicos) ser maior que os próprios carbonetos e apanhar a zona da matriz, obtendo-se assim uma análise média (matriz + carbonetos).

Na figura 25 pode-se observar imagens SEM de Nimax no estado de fornecimento. A análise EBSD desta amostra permitiu identificar as fases da ferrite, martensite e austenite.

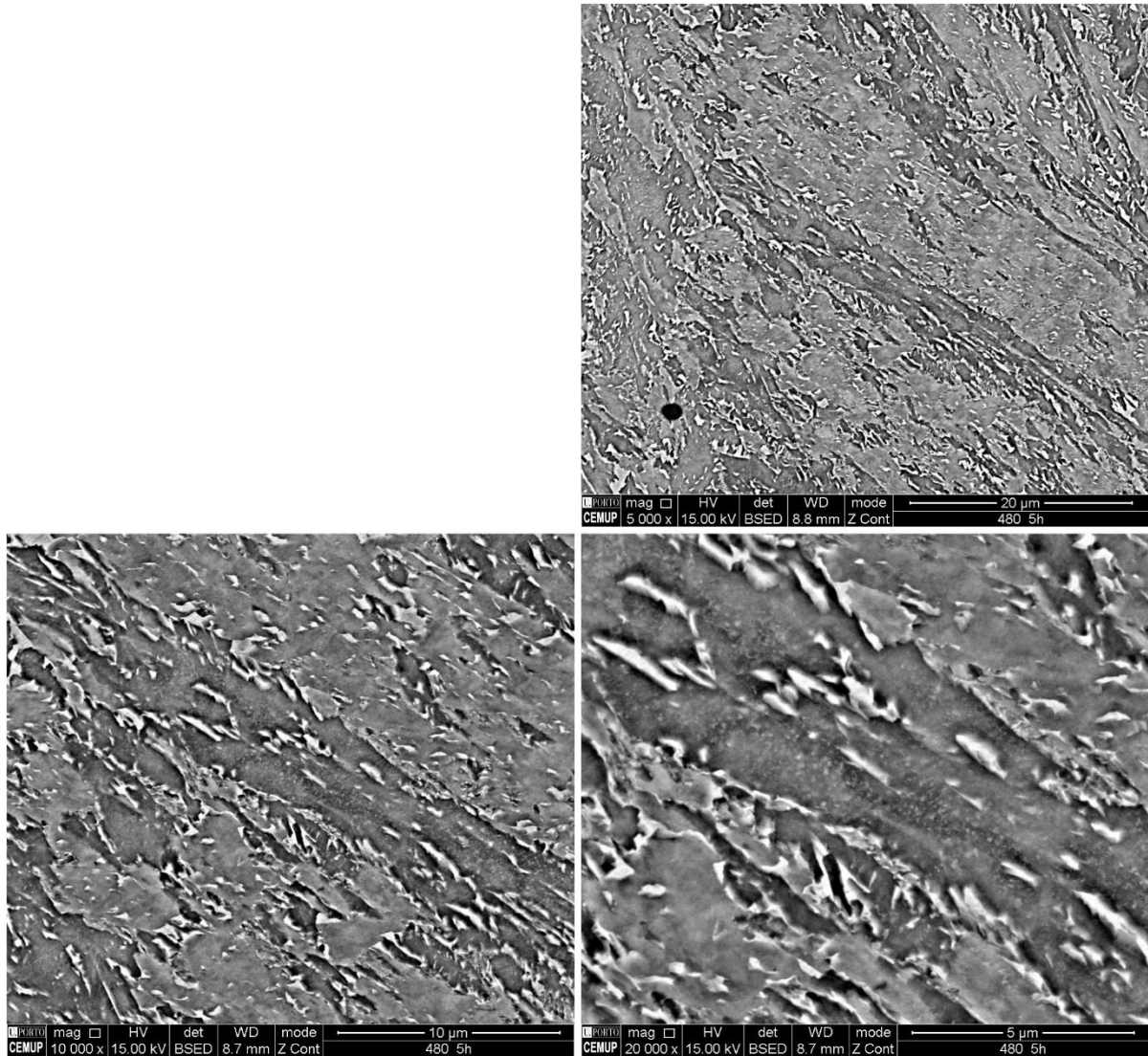
Nas figuras 26, 27 e 28 apresentam-se exemplos dos padrões obtidos de ferrite, martensite e austenite, respetivamente.



**Figura 25** - Imagens SEM de Nimax no estado de fornecimento. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).



Na figura 29 estão expostas imagens SEM de Nimax previamente tratado a 480 °C, durante 5 horas. A figura 30 corresponde a uma imagem SEM desta mesma condição, cuja análise EDS das zonas identificadas, se encontra na figura 31.



**Figura 29** - Imagens SEM de Nimax após tratamento térmico de 5 horas a 480 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).

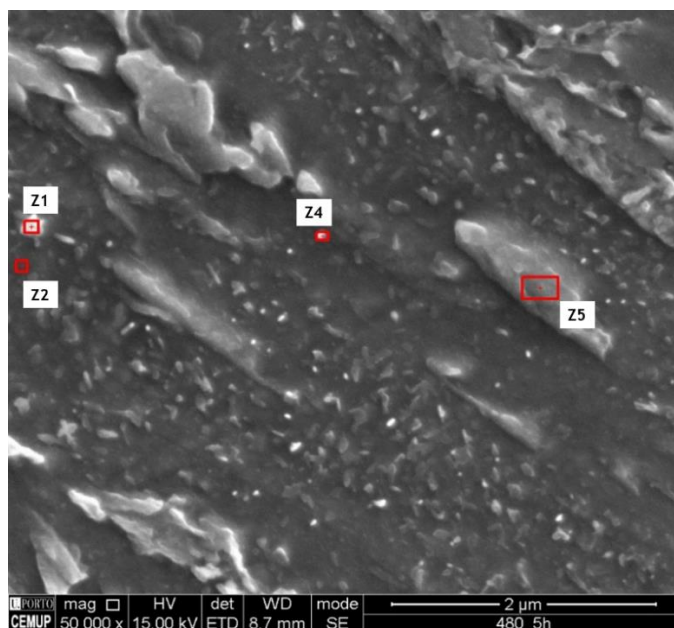


Figura 30 - Imagem SEM de Nimax após tratamento térmico de 5 horas a 480 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).

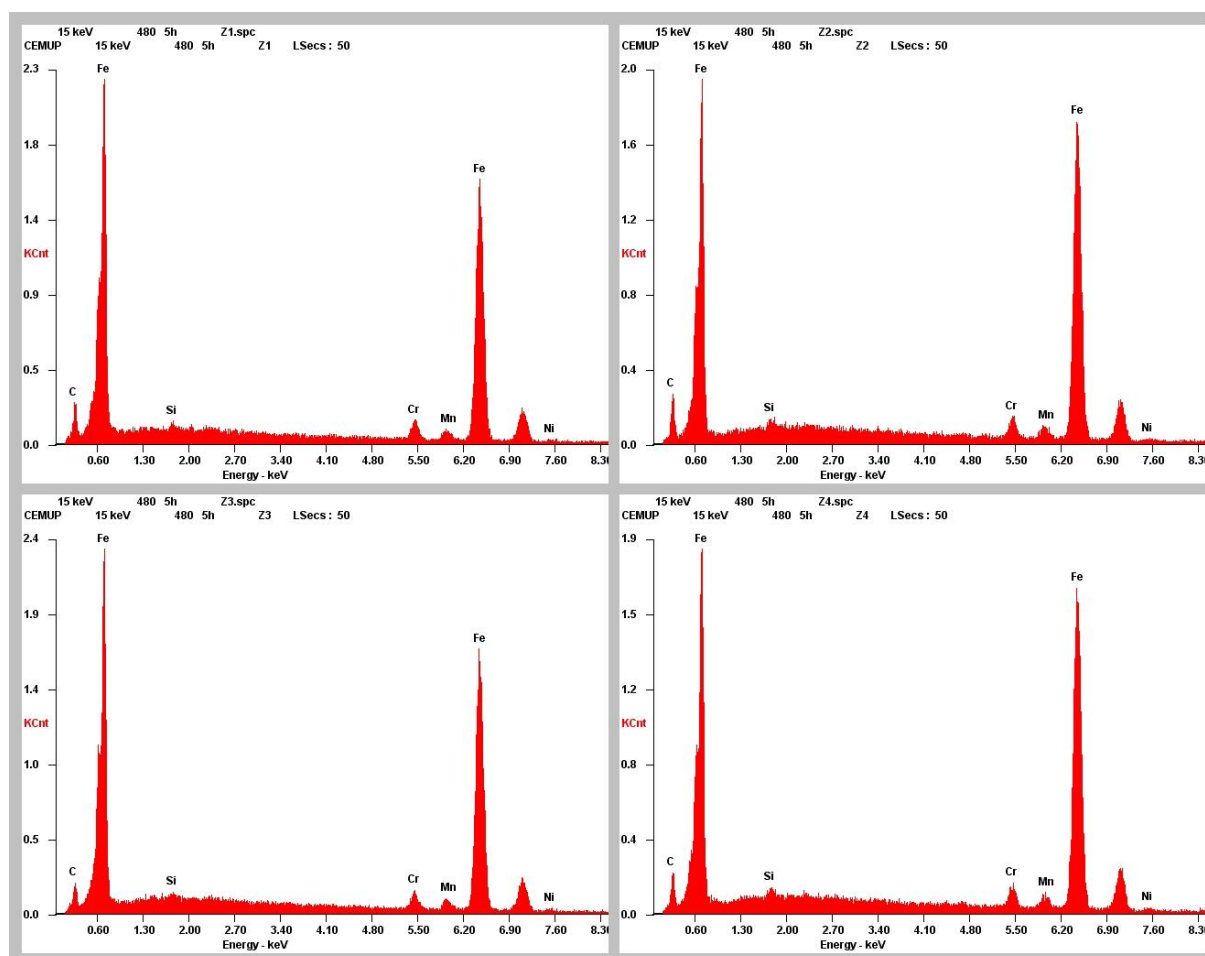
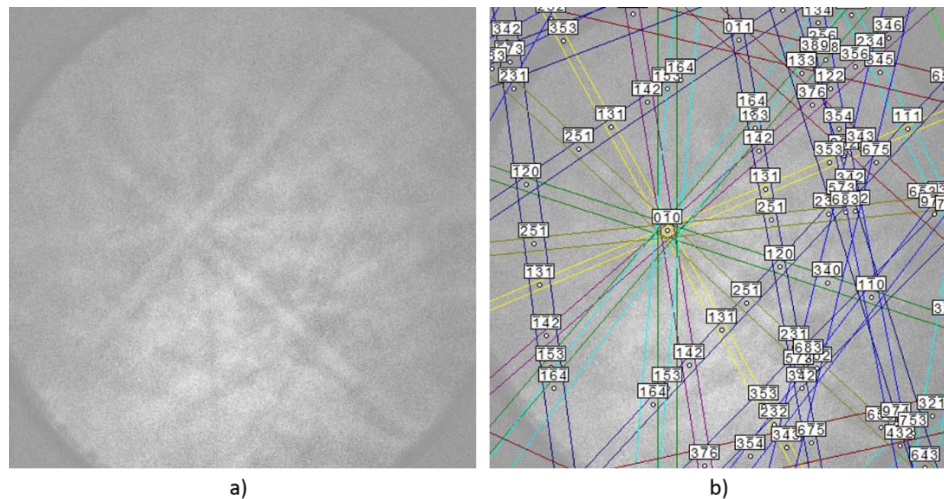


Figura 31 - Análise EDS da amostra de Nimax sujeita a tratamento de 480 °C durante 5 horas. Zonas Z1 (canto superior esquerdo), Z2 (canto superior direito), Z3 (canto inferior esquerdo) e Z4 (canto inferior direito), identificadas na figura 25.

A análise EBSD desta amostra permitiu identificar ferrite, martensite, austenite e carbonetos. Na figura 32 pode-se observar um dos padrões de linhas de Kikuchi obtidos e a sua indexação.



**Figura 32** - Padrão de Difração de elétrons por retrodispersão. Fase identificada:  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ , cementite. Amostra: Nimax previamente tratado a  $480\text{ }^\circ\text{C}$  durante 12 horas.

Os carbonetos identificados podem ser do tipo  $\text{Fe}_3\text{C}$  ou  $\text{Cr}_3\text{C}$ . O motivo pelo qual não se pode ter a certeza de que carbonetos se tratam é que ambos possuem uma estrutura cristalina ortorrômbica e parâmetros de malha muito semelhantes. Além disso, o aço Nimax possui cerca de 3% de cromo, o que é uma quantidade considerável.

Os padrões de carbonetos encontrados não são muito bem definidos. Isto poderá ser justificado pelo tamanho reduzido dos carbonetos. Assim, é normal que o volume de interação do feixe de elétrons que incide na amostra apanhe não só as zonas dos carbonetos, mas também as zonas envolventes, obtendo-se assim padrões de carbonetos sobrepostos com os padrões da matriz.

Não seria expectável a presença de austenite residual nas amostras termicamente tratadas. No entanto, estes resultados podem ser explicados pelo facto de os padrões de austenite e martensite serem bastante semelhantes.

Na figura 33 estão expostas imagens SEM de Nimax previamente tratado a  $480\text{ }^\circ\text{C}$ , durante 12 horas. Note-se que a análise EDS das zonas Z8 a Z11 se encontra na figura 34; mais uma vez, não se verificam diferenças significativas de composição. A análise EBSD desta amostra permitiu identificar as fases da ferrite, bainite, austenite, martensite e carbonetos.

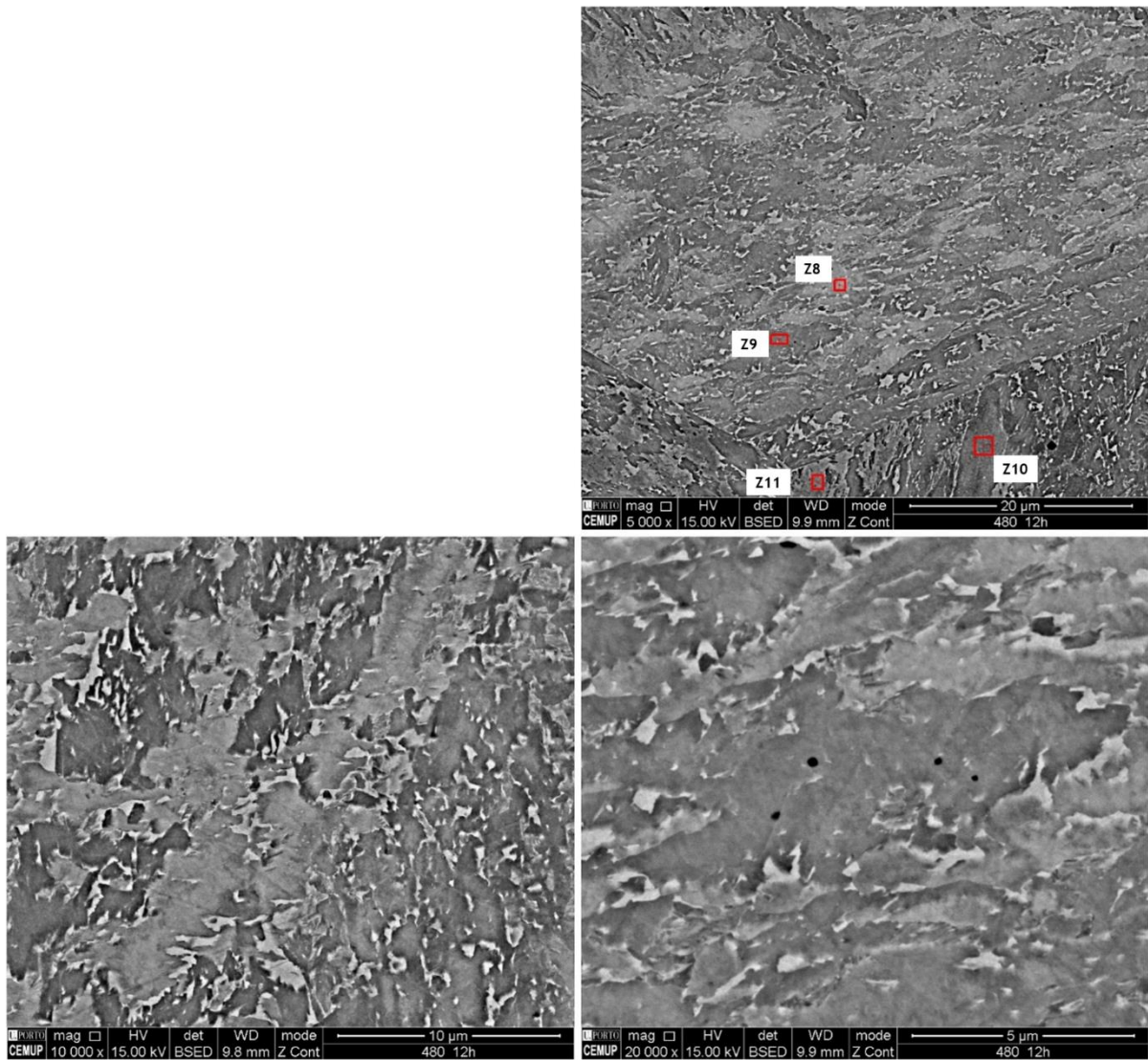
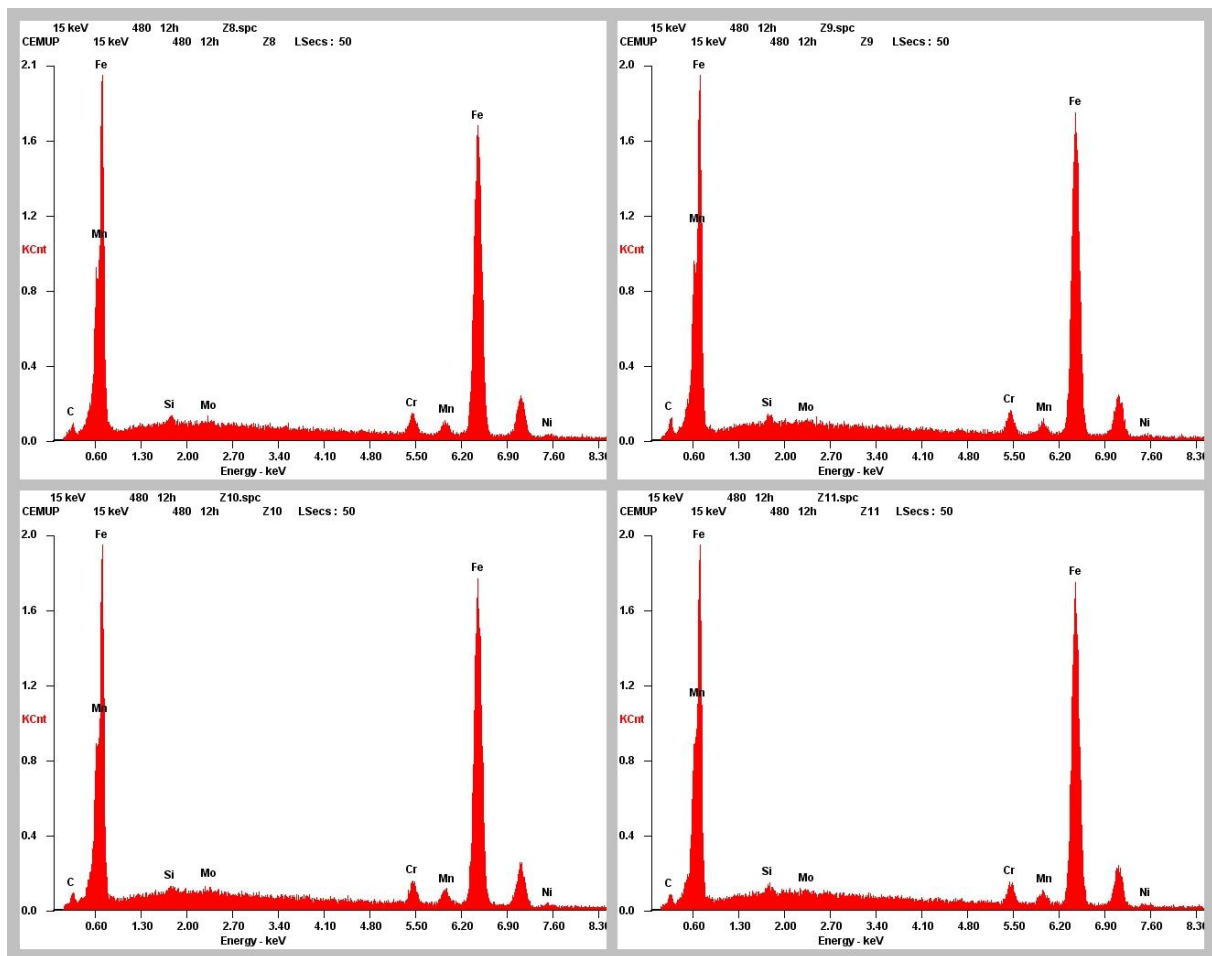
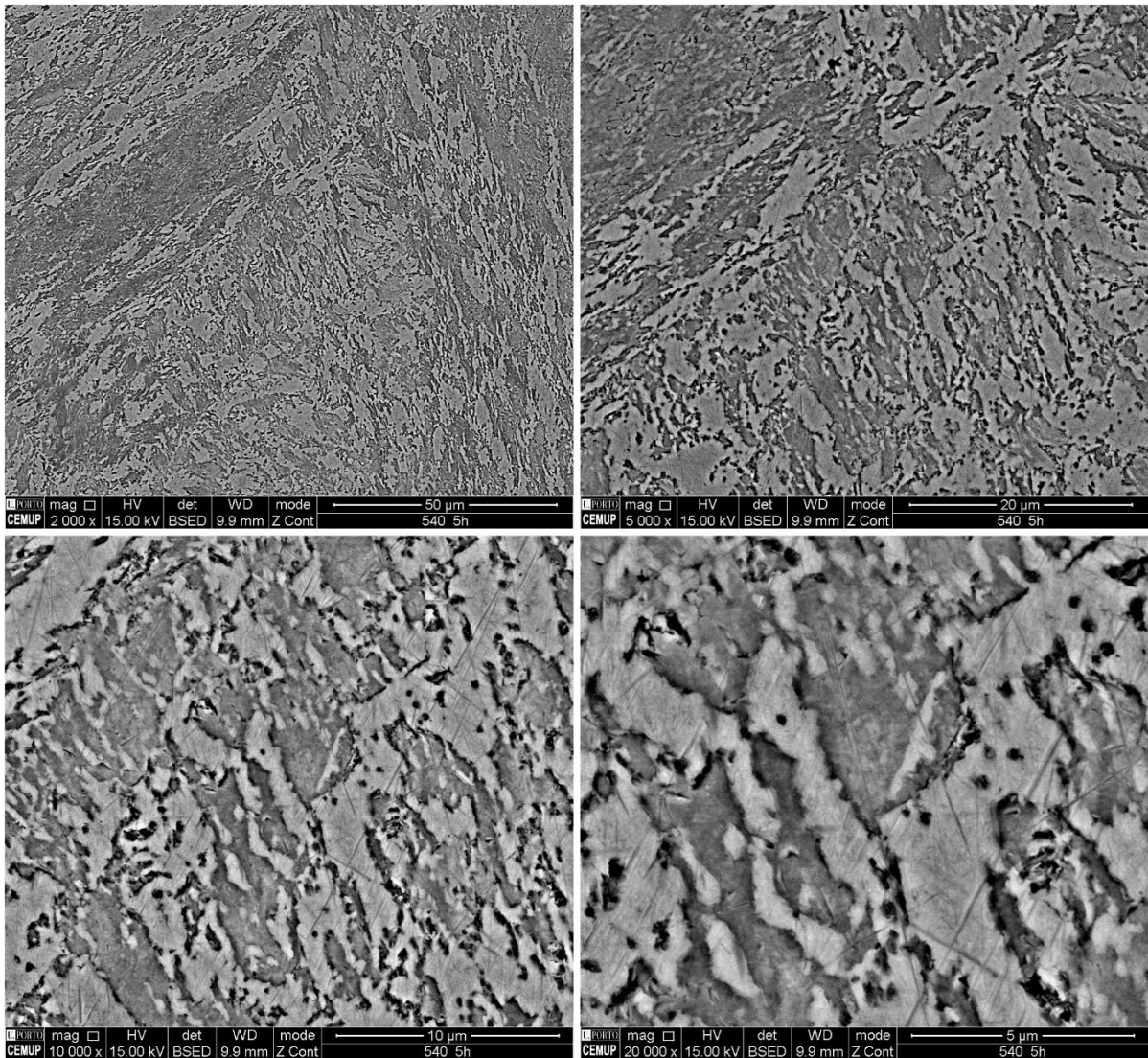


Figura 33 - Imagens SEM de Nimax após tratamento térmico de 12 horas a 480 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).



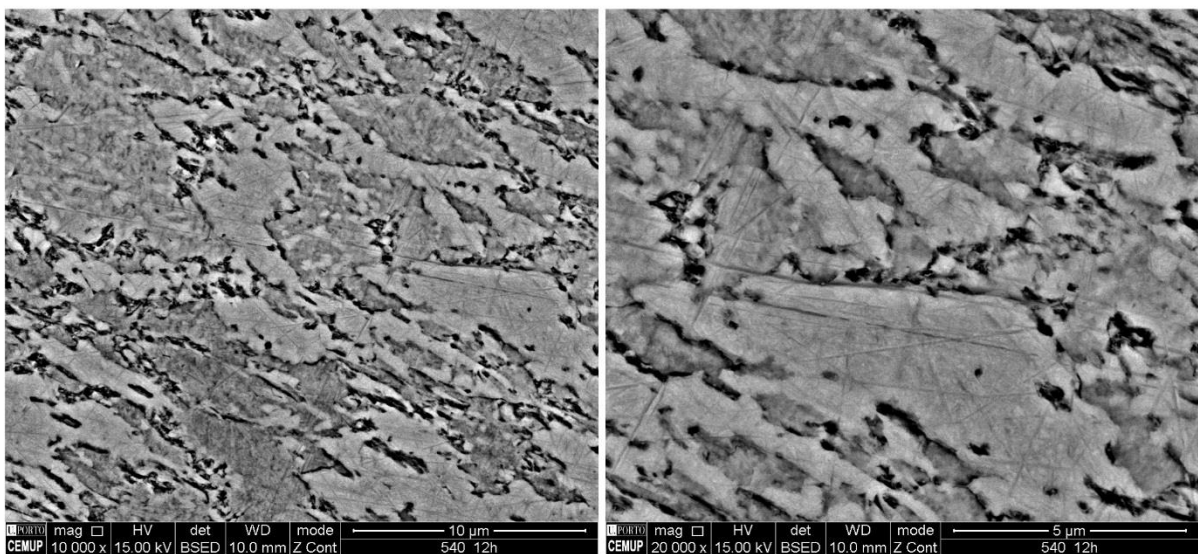
**Figura 34** - Análise EDS da amostra de Nimax sujeita a tratamento de 480 °C durante 12 horas. Zonas Z8 (canto superior esquerdo), Z9 (canto superior direito), Z10 (canto inferior esquerdo) e Z11 (canto inferior direito), identificadas na figura 29.

Na figura 35 observa-se imagens SEM de Nimax previamente tratado a 540 °C, durante 5 horas. A análise EBSD desta amostra permitiu identificar as fases da ferrite, austenite e martensite.



**Figura 35** - Imagens SEM de Nimax após tratamento térmico de 5 horas a 540 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).

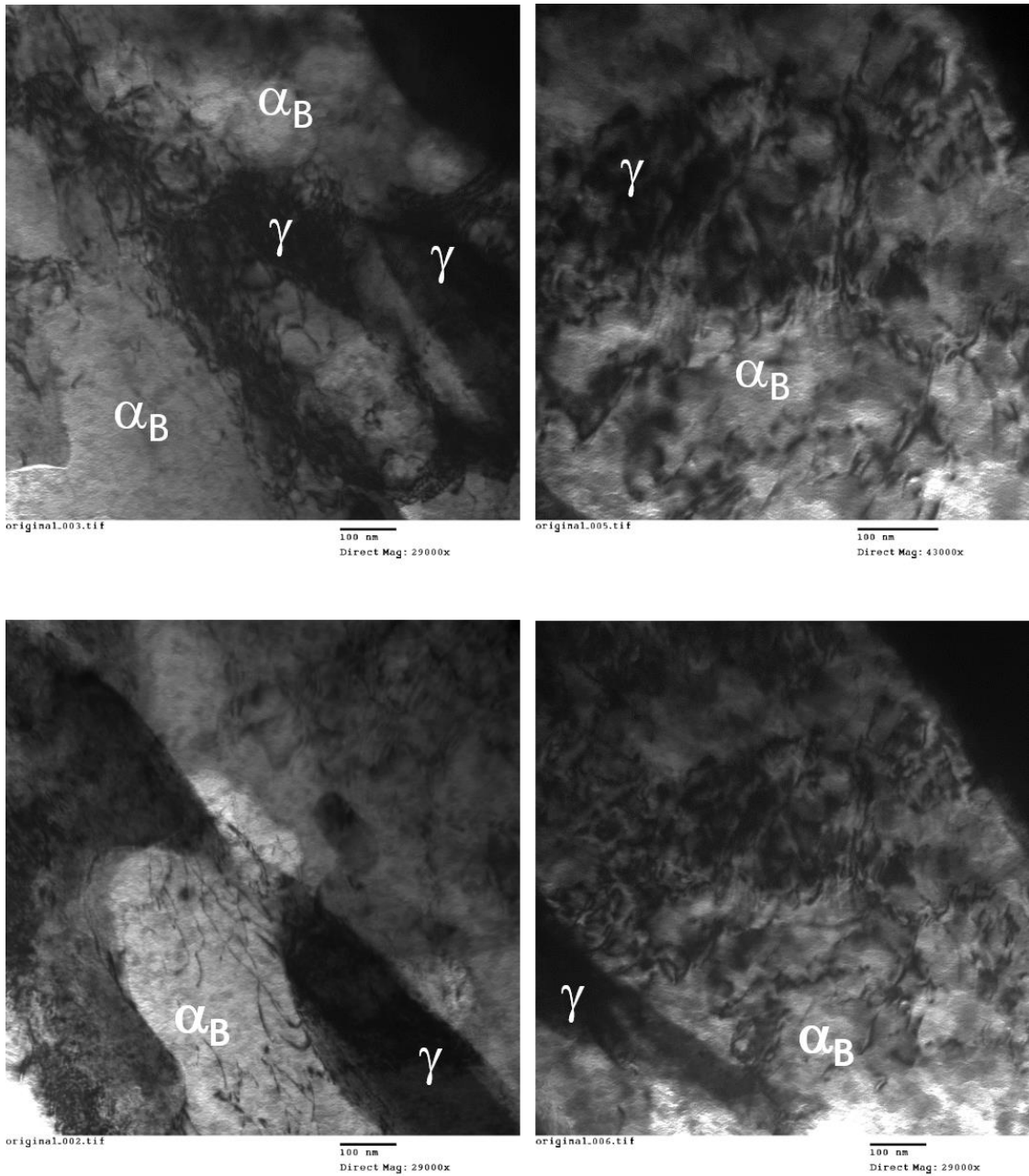
Na figura 36 observa-se imagens SEM de Nimax previamente tratado a 540 °C, durante 12 horas. A análise EBSD desta amostra permitiu identificar as fases da austenite, martensite e carbonetos.



**Figura 36** - Imagens SEM de Nimax após tratamento térmico de 12 horas a 540 °C. Observam-se placas de bainite (ferrite e carbonetos precipitados).

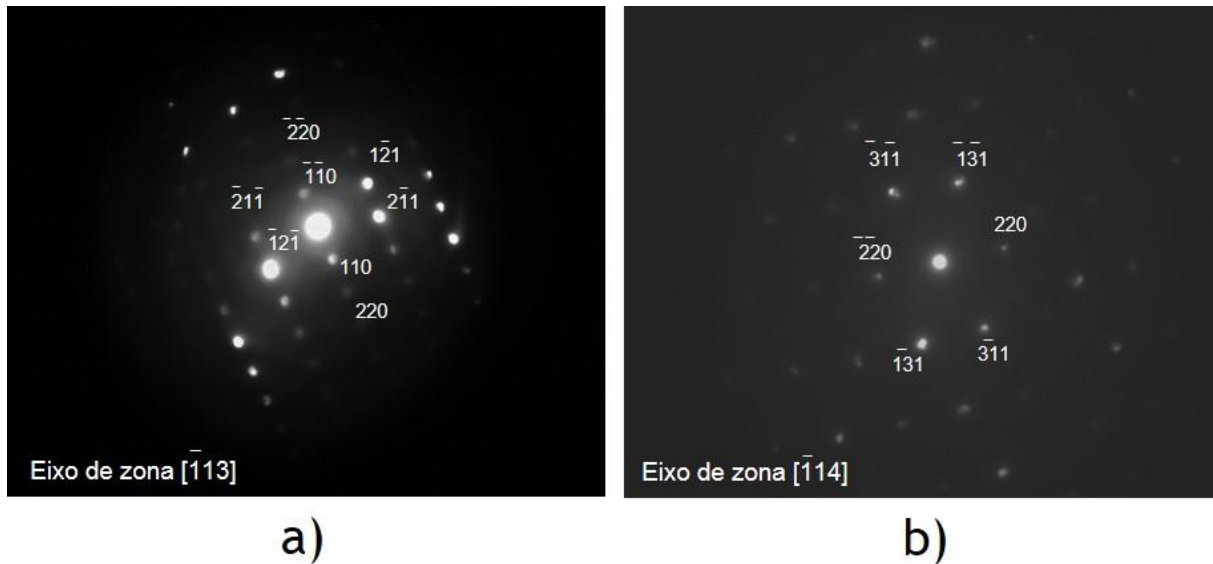
#### 4.6. Microscopia Eletrónica de Transmissão

Na figura 37 é possível observar algumas imagens TEM de Nimax no estado de fornecimento. Obtiveram-se padrões de difração e procedeu-se à sua indexação, tendo-se identificado duas fases: a austenite (zonas mais escuras) e ferrite bainítica (zonas mais claras).



**Figura 37** - Imagens TEM de Nimax no estado de fornecimento. As zonas mais claras correspondem a ferrite bainítica e as mais escuras a austenite.

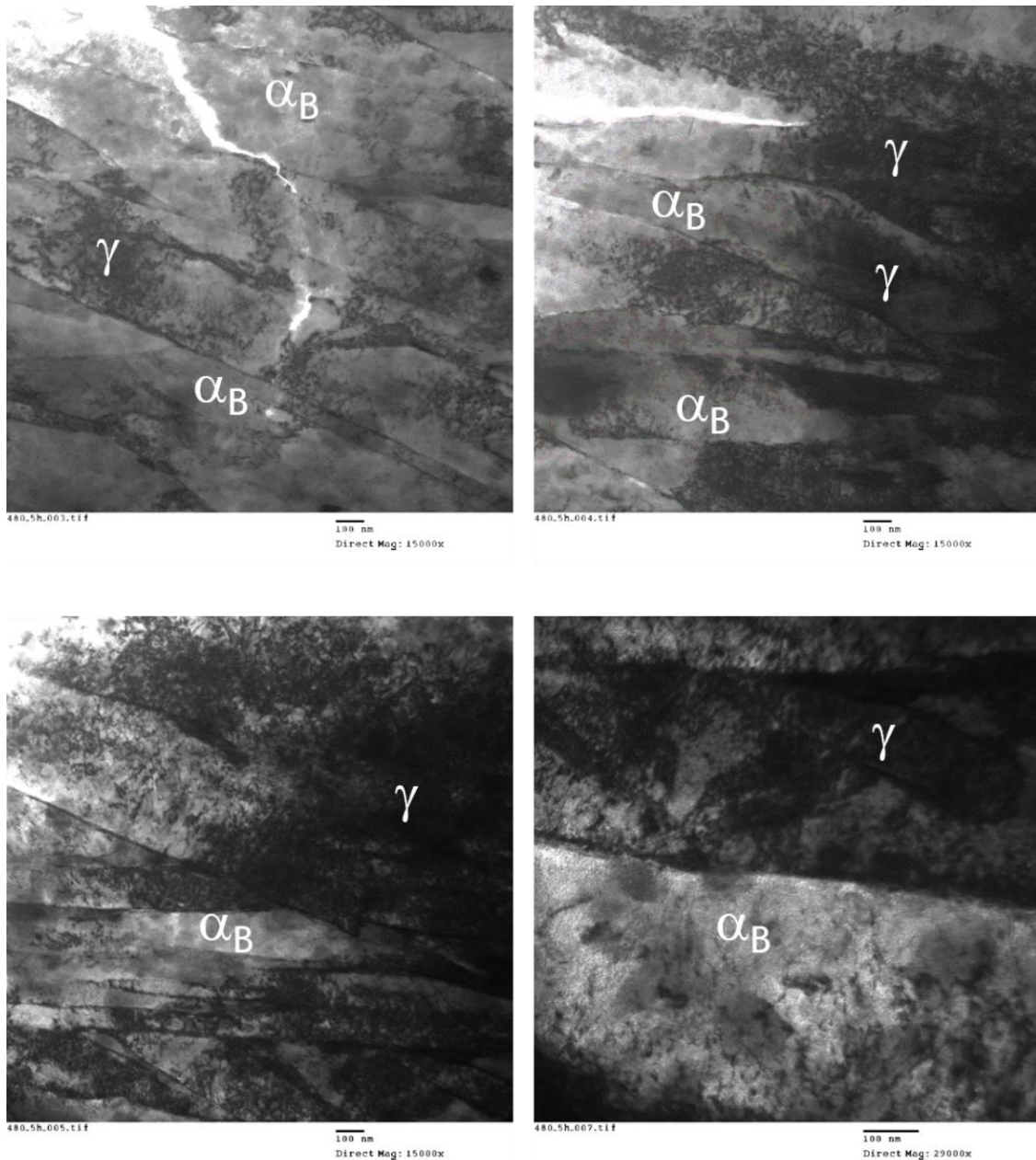
Na figura 38 é possível ver dois exemplos dos padrões de difração obtidos de austenite e ferrite bainítica.



**Figura 38** - Exemplos de padrões de difração obtidos em TEM com a amostra de Nimax no estado de fornecimento. a) Ferrite bainítica; b) Austenite.

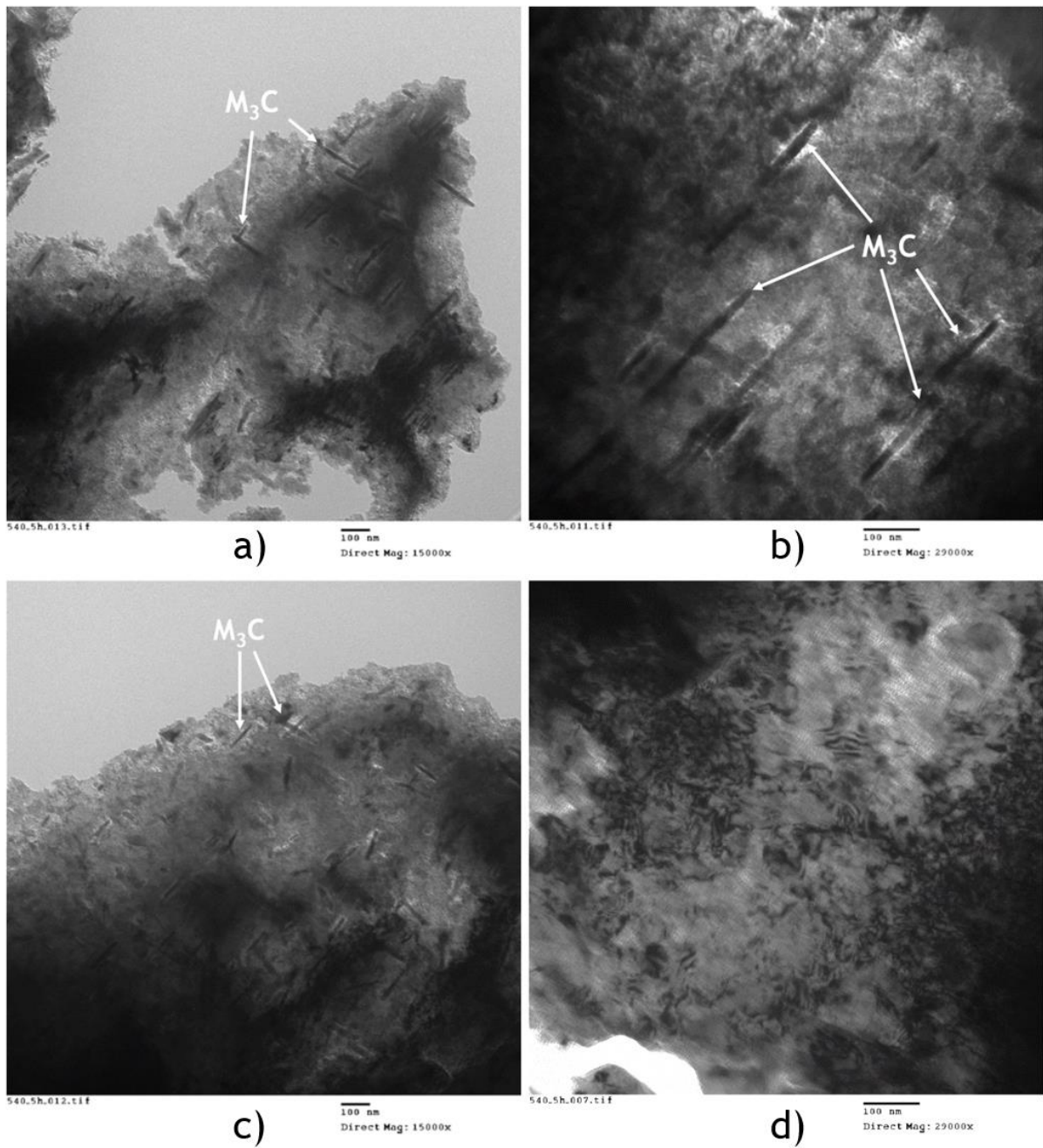
Na figura 39 observam-se imagens TEM do aço Nimax depois de sujeito a um tratamento térmico a 480 °C, durante 5 horas. Mais uma vez, a estrutura observada consiste essencialmente de bainite com alguma austenite.

Embora não se tenha obtido padrões de martensite nas amostras de Nimax no estado de fornecimento e na tratada a 480 °C durante 5 horas, isso não significa que esta fase não esteja presente (aliás, até foi identificada utilizando-se a técnica de EBSD). Se as amostras destas condições possuísem mais zonas adequadas à realização de indexações, provavelmente ter-se-ia obtido padrões de martensite.



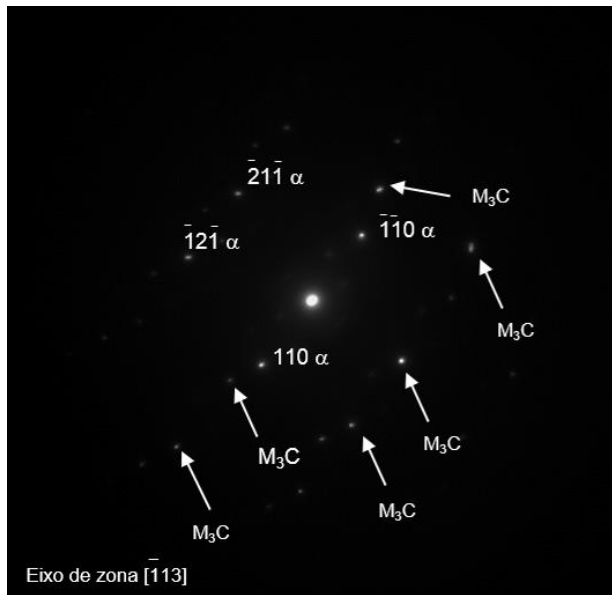
**Figura 39** - Imagens TEM de Nimax após tratamento térmico de 5h a 480 °C. As zonas mais claras correspondem a ferrite bainítica e as mais escuras a austenite.

Na figura 40 é possível observar imagens TEM de Nimax após tratamento térmico de 540 °C durante 5 horas. Obteve-se padrões de carbonetos que poderão ser de ferro e/ ou crômio, facilmente distinguíveis do resto da matriz, nas imagens a) b) c). Como já foi dito anteriormente não se pode ter a certeza se se trata de Fe<sub>3</sub>C ou Cr<sub>3</sub>C por ambos possuírem uma estrutura cristalina ortorrômbica e parâmetros de malha quase iguais. Obteve-se padrões de martensite no campo identificado na figura 42 d).

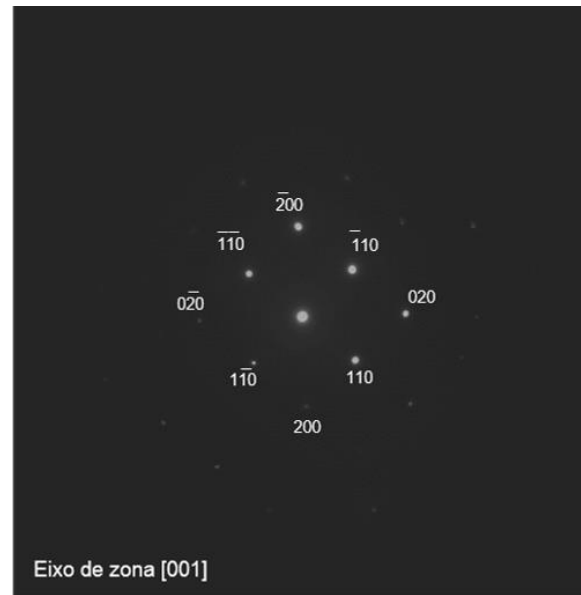


**Figura 40** – Micrografias TEM de Nimax após tratamento térmico de 5h a 540 °C.

Na figura 41 a) é possível observar um padrão de difração em que se distinguem pontos que correspondem à ferrite bainítica e pontos que correspondem a carbonetos  $M_3C$ , ou seja, o padrão do carboneto está sobreposto com o da matriz, devido ao volume de interação (à semelhança do que aconteceu em EBSD). Em 41 b) pode-se observar um padrão de difração que corresponde à martensite.



a)



b)

**Figura 41** - Exemplos de padrões de difração obtidos de uma amostra de Nimax depois de sujeito a um tratamento térmico de 540 °C durante 5 horas. a) É possível visualizar pontos que correspondem à ferrite bainítica e outros que correspondem a cementite; b) Martensite.

## 5. Conclusões e sugestões de trabalho futuro

Ambos os aços, Nimax e DIN EN 1.2711, apresentam variações dimensionais e abaixamento de dureza e tenacidade quando sujeitos a tratamentos térmicos que simulam as temperaturas e tempos de nitruração industriais.

Embora a dureza do aço Nimax no estado de fornecimento seja superior à do aço DIN EN 1.2711, o mesmo não se verifica após tratamento térmico a 540 °C durante 5 e 12 horas, o que terá como causa o teor de carbono mais elevado do aço DIN EN 1.2711 e, conseqüentemente, numa maior precipitação de carbonetos.

O amaciamento mais acentuado do aço Nimax para temperaturas mais elevadas, assim como a sua estabilidade dimensional menor (após tratamento a 540 °C durante 2 horas), torna-o menos interessante que o aço DIN EN 1.2711 ao nível do processamento (se se pretender realizar uma nitruração, por exemplo) e da aplicação (uma vez que a estabilidade dimensional é uma das características mais importantes de um molde).

O aço Nimax e o aço DIN EN 1.2711 devem ser nitrurados a diferentes temperaturas, de modo a produzir-se idênticas variações dimensionais e níveis de dureza. Assim, é aconselhável que o aço Nimax seja nitrurado a temperaturas mais baixas (cerca de 480 °C) durante tempos mais longos, enquanto que o aço DIN EN 1.2711 pode ser nitrurado a temperaturas mais elevadas (540 °C, por exemplo) durante tempos mais curtos.

É de notar que variações dimensionais causadas por uma nitruração seriam ainda mais acentuadas do que as verificadas durante a realização do trabalho experimental desta dissertação. Assim, como trabalho a desenvolver futuramente, seria interessante nitrurar estes aços às temperaturas de 480, 500, 520 e 540 °C, para os tempos de estágio com mais interesse industrial.

De modo a comparar melhor as microestruturas de ambos os aços, seria interessante analisar o DIN EN 1.2711 em microscopia eletrónica de varrimento, recorrendo-se às técnicas de microanálise por raios-X e análise de padrões de difração de elétrons retrodifundidos, estudando-o para as mesmas condições que já começaram a ser abordadas em relação ao Nimax (estado de fornecimento, 480 e 540 °C durante 5 e 12 horas).

Na tentativa de responder a questões como, por exemplo, se efetivamente existe austenite residual após tratamentos térmicos ou se os carbonetos identificados nas amostras de TEM são de  $Fe_3C$  e/ ou  $Cr_3C$ , poder-se-ia recorrer a microscopia eletrónica de transmissão associada a microanálise por raios-X.

## 6. Bibliografia

- [1] "Ramada." . RAMADA, F. Ramada Aços e Indústrias S. A. Acedido a 13 Jun 2014 <<http://www.ramada.pt/index.php?&cat=7>>.
- [2] "Qualidade." . RAMADA, F. Ramada Aços e Indústrias S. A. Acedido a 13 Jun 2014. <<http://www.ramada.pt/index.php?cat=30>>.
- [3] Santos, Henrique. *Materiais Metálicos*. Trabalho não publicado.
- [4] Roberts, George, George Krauss, and Richard Kennedy. *Tool Steels* . : ASM International, 1980.
- [5] Højerslev , Christian. "Tool Steels." . N.p., 1 Jan. 2001. Web. 14 Jun 2014. <[http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:88113/datastreams/file\\_7728903/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:88113/datastreams/file_7728903/content)>.
- [6] "Introduction to Steels and Cast Irons." . ASM International, Jan. 2002. 13 Jun 2014. <[http://ims.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles/06040G\\_Chapter\\_1.pdf](http://ims.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles/06040G_Chapter_1.pdf)>.
- [7] Ribeiro, Laura. *Materiais Metálicos*. Trabalho não publicado.
- [8] Smith, William. *Structure and Properties of Engineering Alloys*. : McGraw-Hill, 1981.
- [9] Krauss, George. "Tool Steels." *Steels: Processing, Structure and Performance*. : ASM International, 2005.
- [10] *Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys*. : ASM International, 1990.
- [11] Brooks, Charlie. *Principles of the Heat Treatment of Plain Carbon and Low Alloy Steels* . : ASM International, 1996.
- [12] Persson, Anders. *On Tool Failure in Die Casting*. Diss. Uppsala U, 2003.
- [13] "P4 Tool Steel (UNS T51604)." Web. 13 Jun 2014. <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6236>>.
- [14] "P6 Tool Steel (UNS T51606)." Web. 13 Jun 2014. <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6238>>.
- [15] Sjöström, Johnny. "Chromium Martensitic Hot-work Tool Steels." Diss. Karlstad U, 2004.
- [16] Yi, Luo, Wu Xiao-chun, Wang Hong-bin, and Min Yong-an. "Study on microstructure and hardness uniformity of non-quenched prehardened steel for large section plastic mould." *Materials Science and Engineering A* 492: 205-210.
- [17] Yi, Luo, Wu Xiao-chun, Wang Hong-bin, and Min Yong-an. "A comparative study on non-quenched and quenched prehardened steel for large section plastic mould." *Journal of Materials Processing Technology* 209: 5437-5442.
- [18] Hoseiny, H., U. Klement, P. Sotkovszki, and J. Andersson. "Comparison of the microstructures in continuous-cooled and quench-tempered pre-hardened mould steels." *Materials and Design* 32: 21-28.

- [19] Luo, Yi, Xiao-chun Wu, Yong-an Min, Zhu Zhu, and Hong-bin Wang. "Development of Non-Quenched Prehardened Steel for Large Section Plastic Mould." *Journal of Iron and steel research, International* 16: 61-67.
- [20] Rech, J., C. Le. Calvez, and M. Dessoly. "A new approach for the characterization of machinability—application to steels for plastic injection molds." *Journal of Materials Processing Technology* 152: 66-70.
- [21] Ernst, C., and W. Pannes. "Optimized Steel Selection for Applications in Plastics Processing." Proc. of 6th International Tooling Conference.
- [22] Luo, Yi, and Wu Xiao-chun. "Application of temperature field simulation and artificial neural network for design of nonquenched prehardened steels for large molds for plastics." *Metal Science and Heat Treatment* 54: 360-367.
- [23] Irshad, Muhammad Aatif. *The Effect of Prior Austenite Grain Size on the Machinability of a Pre-hardened Mold Steel*. Diss. Karlstads U - Faculty of Technology and Science, 2011.
- [24] Hoseiny, H., F. G. Caballero, B. Caballero, D. San Martin, C. Capdevila, L. G. Capdevila, and Hans-Olof Andrén . "The effect of the martensitic packet size on the machinability of modified AISI P20 prehardened mold steel." *Journal of Materials Science* 47: 3613-3620.
- [25] Mesquita, Rafael Agnelli, and Celso Antonio Barbosa. "Propriedades De Manufatura Nos Aços VP20 ISO e VP50IM, Aplicados Em Moldes De Plástico."
- [26] Mesquita, Rafael Agnelli, and Celso Antonio Barbosa. "40 HRC Plastic Mould Steels: Manufacturing Properties Considerations." Proc. of 18th International Congress of Mechanical Engineering, Minas Gerais, Ouro Preto.
- [27] Hoseiny, Hamed, Berne Högman, Hans-Olof Andrén, Uta Klement, Jan-Eric Ståhl, and Anders Thuvander. "The influence of microstructure and mechanical properties on the machinability of martensitic and bainitic prehardened mould steels. <http://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/146.110926>." *International of Materials Research* 104: 748-761.
- [28] Hansson, Per. "Use Of Modern Pre-Hardened Tool Steel Enables Faster Mold Manufacturing."
- [29] "Machinability Of Three Different Steels For Plastic Injection Mould Considering The Cutting Forces In Turning." COBEM. Proc. of 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, Brazil. 2009.
- [30] Hoseiny, Hamed, Berne Hogman, Uta Klement, and Anders Kinnander. "Machinability evaluation of pre-hardened plastic mould steels." *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 11: 327-341.
- [31] Bacalhau, José, Paulo Haddad, and Celso Barbosa. "Nova Geração de Aços para Moldes Plásticos." *Siderurgia Brasil* 1 May 2012: 15-20.

- [32] Walid, Jomaa, Imed Zaghbani, Victor Songmeme, Louis-Philippe L. Boire, and Lehuy Hoang. "Dry and Wet Machinability of Hardened Mould Steels." *International Conference on Environmental Pollution and Remediation*. Canada, Ontario.
- [33] Zaghbani, Imed, Walid Jomaa, Victor Songmene, Louis-Philippe L. Boire, and Hoang Lehuy. "Investigation on Tool Wear During Dry and Wet Machining of Hardened Mould Steels." *International Journal of Civil Engineering and Building Materials 2*
- [34] "1.2738 40CrMnNiMo8-6-4". OZCT. Acedido a 13 Jun 2014. <<http://www.ozct.com.tr/en/pdf/1.2738%2040CrMnNiMo8-6-4.pdf>>
- [35] "NIMAX - A DUREZA MÍNIMA DE 40 HRC COM A FACILIDADE DE MAQUINAÇÃO DE 30 HRC.". RAMADA, F. Ramada Aços e Indústrias S. A., n.d. Web. . <<http://www.ramada.pt/index.php?cat=11&item=1404&PHPSESSID=98a71f5911984ac2f43162f6258134ae>>.
- [36] Branco, Bruno. *Estudo Do Processo De Nitruração De Um Aço Ferramenta Nimax*. Diss. Universidade Do Porto - Faculdade De Engenharia, 2013.
- [37] "Uddeholm Nimax." . Uddeholm, 1 Mar. 2014. Web. . <[http://www.uddeholm.com/files/AB\\_steel\\_for\\_moulds\\_eng.pdf](http://www.uddeholm.com/files/AB_steel_for_moulds_eng.pdf)>.
- [38] "Uddeholm Nimax." . Uddeholm, 1 Jan. 2012. Web. . <[http://www.uddeholm.com/files/PB\\_Uddeholm\\_nimax\\_english.pdf](http://www.uddeholm.com/files/PB_Uddeholm_nimax_english.pdf)>.
- [39] "Pocket Book- The Uddeholm range of tooling materials." . Uddeholm, n.d. Web. . <[http://fullnulled.com/doc/pdf/download/www\\_\\_uddeholm\\_\\_com--files--pocket\\_book\\_EN.pdf](http://fullnulled.com/doc/pdf/download/www__uddeholm__com--files--pocket_book_EN.pdf)>.
- [40] "Uddeholm Nimax." . Uddeholm, 1 Mar. 2007. Web. . <[http://www.uddeholm.com/files/SB\\_Nimax\\_English.pdf](http://www.uddeholm.com/files/SB_Nimax_English.pdf)>.
- [41] Hillskog, Thomas. "EVEN BASIC CAN BE BETTER UDDEHOLM AUTOMOTIVE TOOLING SEMINAR 2008.", 1 Jan. 2008. Web. . <[http://www.istma.org/istma-world/ISTMA\\_Conferencehall/uddeholm2008/Uddeholm%20Nimax%20-%20Even%20basic%20can%20be%20better.pdf](http://www.istma.org/istma-world/ISTMA_Conferencehall/uddeholm2008/Uddeholm%20Nimax%20-%20Even%20basic%20can%20be%20better.pdf)>.