

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FRANCIS DALMAS**

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL NA NITRETAÇÃO DE ANÉIS EM AÇO  
CROMO-MOLIBDÊNIO**

**CAXIAS DO SUL**

**2013**

**FRANCIS DALMAS**

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL NA NITRETAÇÃO DE ANÉIS EM AÇO  
CROMO-MOLIBDÊNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito à conclusão do curso de  
Engenharia Mecânica na Universidade de  
Caxias do Sul.

Supervisor: Prof. Msc. Sandro Tomaz Martins.

**CAXIAS DO SUL**

**2013**

FRANCIS DALMAS

**ESTUDO DA VARIAÇÃO DIMENSIONAL NA NITRETAÇÃO DE ANÉIS EM AÇO  
CROMO-MOLIBDÊNIO**

ESTE TRABALHO FOI JULGADO ADEQUADO PARA APROVAÇÃO NA DISCIPLINA  
DE ESTÁGIO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA NA UNIVERSIDADE DE  
CAXIAS DO SUL



Prof. Marcos Alexandre Luciano, Dr. Eng. Prod.  
Coordenador de Estágio II em Engenharia Mecânica

DATA DA APROVAÇÃO: 27/11/2013

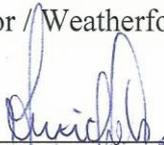
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Sandro Tomaz Martins, Me. Eng. Ciênc. Mater.  
Supervisor de Estágio / Universidade de Caxias do Sul



Rafael de Matos Soares, Eng. Mec.  
Orientador / Weatherford Ind. e Com. Ltda.



Prof. Alexandre Fassini Michels, Dr. Ciênc. Mater.  
Professor Avaliador / Universidade de Caxias do Sul



Prof. Alexandre Viecelli, Dr. Eng. Civ.  
Professor Avaliador / Universidade de Caxias do Sul

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à minha família, que sempre esteve ao meu lado em momentos difíceis.

À minha esposa Beatriz Regina Santos do Amaral pelo companheirismo e afeto em todos os momentos desta caminhada.

Ao meu orientador Rafael de Matos Soares que, além do papel acadêmico neste trabalho, foi um grande companheiro e amigo que fiz nesta jornada.

Ao Prof. Sandro Tomaz Martins, meu supervisor de estágio, por todos os ensinamentos e auxílios, fundamentais na organização e realização deste trabalho, além das discussões técnicas sempre muito produtivas.

A todos os professores e colegas que tive durante a graduação, que contribuíram para que essa jornada fosse muito enriquecedora.

À empresa Weatherford Ind. e Com. Ltda. por acreditar neste trabalho e fornecer-me todo o suporte necessário para a sua realização.

Ao amigo Daniel Bristot, pelo companheirismo em todas as etapas da graduação e na realização deste trabalho.

A todos os colegas da Weatherford, em especial ao Luan Souza, pelo auxílio na realização dos ensaios experimentais, sem o qual este trabalho não seria possível.

À Universidade de Caxias do Sul e ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, pela disponibilização de laboratórios e equipamentos.

Enfim, a todos que de alguma forma me ajudaram nesta caminhada, meu muito obrigado.

## RESUMO

A nitretação é um tratamento que introduz nitrogênio na superfície do aço formando nitretos de elevada dureza. Normalmente peças submetidas a este processo não tem nenhuma etapa posterior de acabamento. Existem pequenas variações dimensionais resultantes do processo, e isto é um problema em peças com tolerância estreita. O presente trabalho avaliou as variações dimensionais em corpos de prova no formato de anéis, onde foram nitretados pelo processo a gás e a plasma. Para a análise variou-se o diâmetro externo e a espessura de parede dos corpos de prova, mantendo a largura constante. A espessura da parede foi o fator que mais influenciou na variação dimensional, sendo que os corpos de prova com parede mais fina tiveram um incremento dimensional maior. O tamanho do diâmetro externo também se mostrou influente na variação dimensional, tendo maior incremento dimensional os corpos de prova com diâmetro maior. A largura foi influenciada apenas pela espessura de parede onde os corpos de prova com parede menor tiveram um incremento dimensional maior na largura.

**Palavras-chaves:** Nitretação, gás, plasma, variação dimensional, aço cromo-molibdênio, metrologia.

## ABSTRACT

Nitriding is a treatment that introduces nitrogen into the surface of the steel forming nitrides with high hardness. Typically, pieces subjected to this process don't have any subsequent finishing stage. Ordinarily, there are small dimensional changes resulting from the process, but it is a problem in parts with closed tolerances. The present study evaluated the dimensional variations in test specimens with the shape of rings, which were nitrided by gas process and plasma process. Outside diameter and wall thickness of the specimens, were changed, with constant width. The wall thickness is the most important factor that affect the dimensional variation, and the test specimens with thinner wall had a greater increase in dimensional. The size of the outside diameter influence in the dimensional variation, having greater increment dimensional in the specimens with bigger diameter. The width was influenced only by the wall thickness, and the specimens with smaller wall had a greater increase in the width dimension.

**Keywords:** Nitriding, gas, plasma, dimensional variation, chrome-molybdenum steel, measurement.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Típica camada nitretada .....   | 15 |
| Figura 2 - Dissociação da amônia e difusão do nitrogênio.....                      | 16 |
| Figura 3 - Típico processo de dois estágios.....                                   | 17 |
| Figura 4 - Microestrutura (a) simples estágio (b) duplo estágio.....               | 17 |
| Figura 5 - Tensão em função da corrente de uma descarga elétrica.....              | 20 |
| Figura 6 - Regiões do plasma .....   | 21 |
| Figura 7- Crescimento em função da espessura de parede .....                       | 24 |
| Figura 8 - Fluxograma do processo .....  | 25 |
| Figura 9 - Desenho esquemático do corpo de prova .....                             | 27 |
| Figura 10 - Erro de Usinagem .....   | 31 |
| Figura 11 - Perfil de dureza das nitreções .....                                   | 33 |
| Figura 12 - Camadas brancas .....  | 35 |
| Figura 13 - Gráfico da variação dimensional CP com 120mm no diâmetro externo ..... | 37 |
| Figura 14 - Gráfico da variação dimensional CP com 110mm no diâmetro externo ..... | 38 |
| Figura 15 - Gráfico da variação da largura.....                                    | 39 |
| Figura 16 - Influência da camada branca nos diâmetros .....                        | 40 |
| Figura 17 - Tensões nos corpos de prova .....                                      | 41 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição química do material SAE 4130 temperado e revenido.....      | 26 |
| Tabela 2 - Propriedades mecânicas do material SAE 4130 temperado e revenido ..... | 26 |
| Tabela 3 - Dimensões dos corpos de prova .....                                    | 27 |
| Tabela 4 - Dimensões de desbaste .....  | 28 |
| Tabela 5 - Parâmetros de corte .....  | 28 |
| Tabela 6 - Tratamentos para os corpos de prova .....                              | 29 |
| Tabela 7 - Variações dimensionais .....   | 36 |
| Tabela 8 - Dilatação térmica durante a nitretação .....                           | 42 |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                         | <b>10</b> |
| 1.1          | CONTEXTUALIZAÇÃO .....                         | 10        |
| 1.2          | AMBIENTE DE ESTÁGIO .....                      | 11        |
| 1.3          | JUSTIFICATIVA .....                            | 11        |
| 1.4          | OBJETIVOS .....                                | 12        |
| <b>1.4.1</b> | <b>Objetivo geral.....</b>                     | <b>12</b> |
| <b>1.4.2</b> | <b>Objetivos específicos.....</b>              | <b>12</b> |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>             | <b>13</b> |
| 2.1          | NITRETAÇÃO.....                                | 13        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Introdução .....</b>                        | <b>13</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Mecanismos de endurecimento.....</b>        | <b>14</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Estrutura da camada nitretada .....</b>     | <b>14</b> |
| <b>2.1.4</b> | <b>Nitretação a gás.....</b>                   | <b>15</b> |
| <b>2.1.5</b> | <b>Nitretação a plasma .....</b>               | <b>18</b> |
| 2.1.5.1      | Formação e Sustentação do Plasma.....          | 18        |
| 2.1.5.2      | Regiões do plasma .....                        | 20        |
| 2.2          | DISTORÇÕES E ALTERAÇÕES DIMENSIONAIS .....     | 21        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Distorções na Nitretação .....</b>          | <b>22</b> |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>               | <b>25</b> |
| 3.1          | MATERIAL.....                                  | 26        |
| 3.2          | CORPOS DE PROVA.....                           | 26        |
| 3.3          | METODOLOGIA.....                               | 27        |
| <b>4</b>     | <b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b> | <b>31</b> |
| 4.1          | DIMENSÕES PRÉ-NITRETAÇÃO .....                 | 31        |
| 4.2          | NITRETAÇÃO.....                                | 32        |
| <b>4.2.1</b> | <b>Nitretação a gás.....</b>                   | <b>32</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Nitretação a plasma .....</b>               | <b>33</b> |
| 4.3          | ANÁLISES POR MICROSCOPIA ÓTICA.....            | 34        |
| <b>4.3.1</b> | <b>Camadas brancas.....</b>                    | <b>34</b> |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.4   | VARIAÇÃO DIMENSIONAL .....                                     | 35 |
| 4.4.1 | Varição dimensional dos diâmetros .....                        | 37 |
| 4.4.2 | Varição dimensional da largura .....                           | 39 |
| 4.4.3 | Influência da Camada Branca .....                              | 40 |
| 4.4.4 | Influência das tensões superficiais .....                      | 41 |
|       | CONCLUSÃO.....   | 43 |
|       | REFERÊNCIAS .....  | 45 |
|       | APÊNDICE A – METALOGRAFIA NITRETAÇÃO A PLASMA 1° LOTE .....    | 47 |
|       | APÊNDICE B – METALOGRAFIA NITRETAÇÃO A GÁS 1° LOTE .....       | 48 |
|       | APÊNDICE C – METALOGRAFIAS NITRATAÇÃO A PLASMA 2° LOTE.....    | 49 |
|       | APÊNDICE D – METALOGRAFIAS NITRATAÇÃO A GÁS 2° LOTE .....      | 50 |
|       | APÊNDICE E – METALOGRAFIAS.....                                | 51 |
|       | APÊNDICE F – DIMENSÕES DOS DIÂMETROS PRÉ NITRETAÇÃO.....       | 52 |
|       | APÊNDICE G – DIMENSÕES DOS DIÂMETROS PÓS NITRETAÇÃO .....      | 53 |
|       | APÊNDICE H – DIMENSÕES DA LARGURA PRÉ NITRETAÇÃO .....         | 54 |
|       | APÊNDICE I – DIMENSÕES DA LARGURA PÓS NITRETAÇÃO.....          | 55 |
|       | ANEXO A – CERTIFICADO QUALIDADE NITRETAÇÃO A GÁS “A” .....     | 56 |
|       | ANEXO B – CERTIFICADO QUALIDADE NITRETAÇÃO A GÁS “B” .....     | 57 |
|       | ANEXO C – CERTIFICADO QUALIDADE NITRETAÇÃO A GÁS “C” .....     | 58 |
|       | ANEXO D – CERTIFICADO QUALIDADE NITRETAÇÃO A GÁS “D” .....     | 59 |
|       | ANEXO E – NITRETAÇÃO A GÁS - HISTÓRICO GRÁFICO DO FORNO .....  | 60 |
|       | ANEXO F – NITRETAÇÃO A GÁS – PERFIL DE DUREZA .....            | 61 |
|       | ANEXO G – RELATÓRIO DA NITRETAÇÃO A PLASMA .....               | 62 |
|       | ANEXO H – CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES “A” .....           | 64 |
|       | ANEXO I – CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES “B” .....           | 65 |
|       | ANEXO J – CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES “C” .....           | 66 |
|       | ANEXO L – CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES “D” .....           | 67 |
|       | ANEXO M – ALÍVIO DE TENSÕES - HISTÓRICO GRÁFICO DO FORNO ..... | 68 |
|       | ANEXO N – CERTIFICADO DO MATERIAL .....                        | 69 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Atualmente, o desenvolvimento de novos materiais e processos para atender às necessidades do mercado é um dos grandes desafios da engenharia. Novos projetos estão levando os materiais a ambientes onde são necessárias elevada resistência ao desgaste, corrosão, fadiga entre outras propriedades (PINEDO, 2013). Diante disso, o tratamento de superfícies tem se mostrado uma solução economicamente viável (OLIVEIRA JR., 2011).

Tratamentos termoquímicos têm como principal função o endurecimento superficial através de reações químicas que ocorrem entre elementos do aço e elementos do meio que pode ser sólido, líquido e gasoso. Existem diferentes tratamentos termoquímicos como a cementação, nitretação, cianetação, carbonitretação, nitrocarbonetação e boretação (CHIAVERINI, 2003).

Dentre tais processos pode-se destacar pela sua grande aplicabilidade em diversas situações a nitretação, que é subdividida em nitretação a gás, nitretação líquida, nitretação a plasma e sulfonitretação. Dentre estes, neste trabalho será dado foco na nitretação a gás e a nitretação a plasma.

Nitretação é um tratamento termoquímico que introduz nitrogênio na superfície do aço que se combina com elementos formando nitretos. A temperatura do tratamento é relativamente baixa quando comparada a temperatura de outros tratamentos termoquímicos não atingindo a temperatura da zona crítica e, por tanto, não ocorre nenhuma transformação de fase (LAMPMAN, 2004).

Os principais benefícios deste processo são: aumento da dureza superficial, aumento da resistência ao desgaste, aumento da vida em fadiga e o aumento da resistência a corrosão (KNERR; ROSE e FILKOWSKI, 2004).

Apesar da temperatura do tratamento ser relativamente baixa, pequenas distorções dimensionais ocorrem nas peças. Normalmente peças submetidas a este processo não sofrem nenhuma etapa posterior de acabamento.

## 1.2 AMBIENTE DE ESTÁGIO

A Weatherford, empresa multinacional que está presente em mais de 100 países, com atividades voltadas ao segmento de serviços e equipamentos para perfuração, completação, produção e intervenção em poços de petróleo e gás, destaca-se por ser uma empresa que prima pela busca de novas tecnologias e desenvolvimento de novos projetos sempre em busca da melhoria da sua linha de produtos.

O presente estágio foi desenvolvido junto à fábrica da empresa, com acompanhamento da engenharia de processos e do setor de programação CNC, os quais viabilizaram a manufatura dos corpos de prova.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Mesmo com temperaturas baixas durante a nitretação, pequenas distorções dimensionais ocorrem nas peças. Em peças com tolerâncias dimensionais estreitas a serem atendidas é necessário um cuidado especial, pois a variação durante o processo termoquímico pode ser maior do que a tolerância especificada em projeto.

Sendo a manufatura de Caxias do Sul responsável pela fabricação e montagem de uma grande gama de produtos para as mais diversas aplicações, dentre as peças produzidas tem-se anéis guia utilizados em rolamentos, que passam pelo tratamento de nitretação para aumentar a resistência ao desgaste, pois os mesmos ficam em contato com os cilindros do rolamento.

Estes anéis guia possuem paredes relativamente finas e tolerâncias dimensionais de 0,025mm no diâmetro. Como não há nenhuma etapa de acabamento após a nitretação, a variação dimensional ocorrida durante o processo torna-se um empecilho, pois se usinado na medida final, ao retornar do tratamento, as medidas ficam fora da tolerância admitida.

Com isso torna-se necessário um estudo a respeito destas distorções ocorridas durante o processo a fim de se fazer uma correção nas medidas de fabricação, para que após a nitretação estas medidas fiquem de acordo com projeto.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral compreender as variáveis que mais influenciam nas distorções dimensionais que ocorrem durante o processo de nitretação.

### 1.4.2 Objetivos específicos

Com o intuito de atender o objetivo geral foram realizados os seguintes objetivos específicos:

- (a) Aprofundar o conhecimento sobre nitretação;
- (b) Levantar as principais causas de distorções dimensionais na nitretação; e
- (c) Mensurar e comparar a variação dimensional gerada pelos processos de nitretação a plasma e gasosa em anéis de aço cromo-molibdênio;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 NITRETAÇÃO

#### 2.1.1 Introdução

Nitretação é um processo de endurecimento superficial que introduz nitrogênio na superfície do aço. O objetivo é a formação de nitretos e não de martensita como na cementação e têmpera, assim as temperaturas são relativamente baixas não ocorrendo transformação de fase (KRAUSS, 2005).

As principais vantagens da nitretação são: o aumento da dureza superficial, o aumento da resistência ao desgaste, o aumento da vida em fadiga e o aumento da resistência a corrosão (KNERR; ROSE e FILKOWSKI, 2004).

Em testes realizados por Sirin et al. (2008) a resistência à fadiga do aço AISI 4340 foi aumentado em até 91% pela nitretação iônica. Nos testes houve uma relação linear entre a resistência a fadiga e a profundidade da camada nitretada.

Há três tipos de processos de nitretação bem estabelecidos: a nitretação a gás, a nitretação líquida ou em banho de sais e a nitretação a plasma.

Na nitretação a gás o meio nitretante é usualmente a amônia que se decompõem originando o nitrogênio. Ao atingir certo nível de saturação de nitrogênio na superfície do metal, nitretos são formando através da nucleação e crescimento, após o nitrogênio se difunde para o interior do metal (SKONIESKI, 2008). Este processo será abordado de maneira mais completa no item 2.1.4.

Na nitretação líquida o meio nitretante é de cianetos fundidos, o banho típico é composto de sais de sódio e potássio. Este processo é altamente poluente (SKONIESKI, 2008). Uma vantagem deste processo são tempos mais curtos no tratamento.

A nitretação a plasma é geralmente feita em atmosferas contendo  $H_2$  e  $N_2$  em baixas pressões. Através de uma diferença de potencial entre o cátodo (peça) e o ânodo (carcaça do reator) o gás é ionizado formando o plasma (RAMOS, 2003). Este processo será abordado de maneira mais completa no item 2.1.5.

Para aumentar a resistência à corrosão em peças nitretadas também pode ser feita uma pós-oxidação, Ranalli et al. (2009) realizaram testes que mostram que as superfícies nitretadas a plasma com pós-oxidação apresentaram maior resistência à corrosão quando exposta em solução aquosa de  $NaCl$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ . Após 72 horas em ensaio de *salt spray*, não

foram observados pontos de corrosão. A camada composta apresentou-se de forma homogênea e sem porosidade e o tratamento de pós-oxidação contribuiu na resistência à corrosão por pite.

Em outro teste relacionando o volume de nitretos formados na superfície com o aumento da resistência a corrosão em meio aquoso, realizado por Basu et al. (2008) verificou-se que quanto maior a quantidade de nitretos formados, maior a resistência a corrosão.

### **2.1.2 Mecanismos de endurecimento**

Os principais mecanismos de endurecimento na nitretação são o endurecimento por solução sólida e o endurecimento por precipitação.

Na solução sólida ocorre à introdução de átomos de soluto na rede de átomos solvente, o tipo de solução sólida que ocorre no caso do nitrogênio no ferro é o intersticial devido à diferença de tamanho dos átomos de soluto (nitrogênio) e solvente (ferro) (DIETER, 1998).

O endurecimento por precipitação ocorre após o nitrogênio estar saturado no reticulado cristalino do ferro (0,1% em peso nas temperaturas usuais de nitretação), então se inicia a formação de nitretos ou carbonitretos nos contornos de grãos e no interior dos grãos (SKONIESKI, 2008). A quantidade e a distribuição dos nitretos encontrados juntamente com a dureza do metal base determinam a dureza na camada nitretada.

### **2.1.3 Estrutura da camada nitretada**

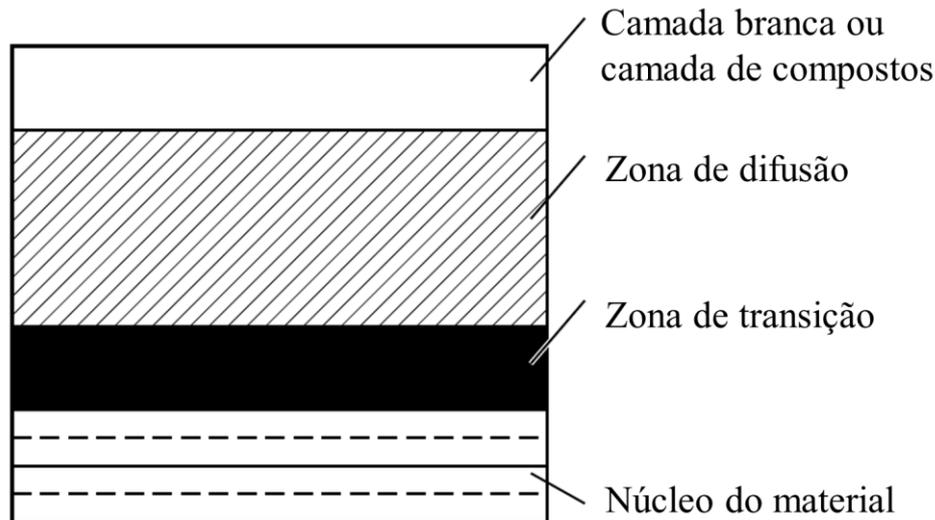
A espessura da camada formada na nitretação e sua dureza dependem do aço e dos elementos de liga nele presentes (CHIAVERINI, 2003). A camada resultante do processo é composta de três regiões. A Figura 1 ilustra uma típica camada nitretada.

A camada mais superficial é conhecida como “camada branca”, ela cresce à partir da superfície do aço. Esta camada é normalmente muito dura e quebradiça, sua espessura é determinada pelo tempo, temperatura, composição química do aço e composição química do meio nitretante.

Abaixo da camada branca tem-se a chamada “zona de difusão”, nesta camada ocorre o endurecimento por solução sólida e endurecimento por precipitações. Quanto mais próxima a superfície maior a concentração de nitrogênio e com o limite de solubilidade do nitrogênio

no ferro sendo excedido tem-se a formação de precipitados nos contornos de grãos no interior dos grãos distorcendo o reticulado e aumentando a dureza na camada.

Figura 1 - Típica camada nitretada



Fonte: Adaptado de Pye (2005).

A zona de transição é a passagem entre a zona de difusão e o núcleo do material. Nesta zona ocorre apenas o endurecimento por solução sólida. E abaixo da zona de difusão está o núcleo do aço, que consiste em martensita revenida (PYE, 2006).

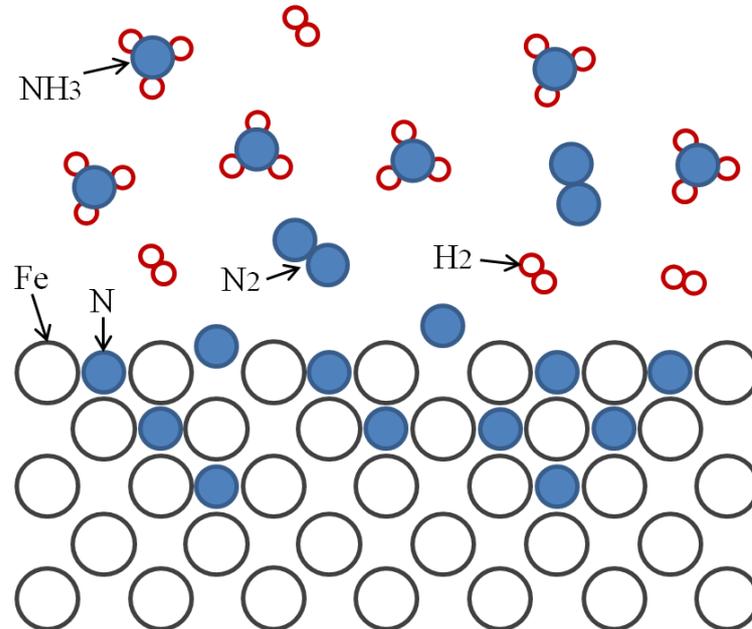
#### 2.1.4 Nitretação a gás

O processo de nitretação a gás baseia-se na afinidade de nitrogênio com o ferro e com outros elementos metálicos. A nitretação gasosa é realizada em temperaturas que variam de 495°C a 565°C, não sendo necessário resfriamento brusco, visto que o objetivo é a formação de nitretos e não de martensita. O nitrogênio é produzido pela dissociação da amônia quando entra em contato com as peças quentes de aço (KNERR; ROSE e FILKOWSKI, 2004).

A amônia se decompõe originando o nitrogênio pela seguinte reação:  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$  (CHIAVERINI, 2003). O nitrogênio e os componentes do hidrogênio na forma atômica são instáveis e se unem com outros átomos formando moléculas. Quando na forma monoatômica o hidrogênio e o nitrogênio são absorvidos pela superfície metálica, então o nitrogênio pode ser absorvido pelo volume metálico ou se ligar a outro átomo de hidrogênio e

voltar para a atmosfera (SANTOS, 2003). A Figura 2 esquematiza a dissociação da amônia e a difusão do nitrogênio.

Figura 2 - Dissociação da amônia e difusão do nitrogênio



Fonte: Adaptado de Pye (2003).

Para medir a concentração de nitrogênio durante o processo é usada a amônia não dissociada. A taxa de dissociação é usualmente mantida entre 10% e 35%, dependendo do aço a ser tratado e da espessura de camada branca desejada (DAVIS, 2002).

A camada branca normalmente apresenta espessuras de 20 a 25  $\mu\text{m}$ . Esta varia com o tempo, temperatura e composição do gás. Há processos de nitretação que visam reduzir a camada branca como no caso da nitretação de duplo estágio.

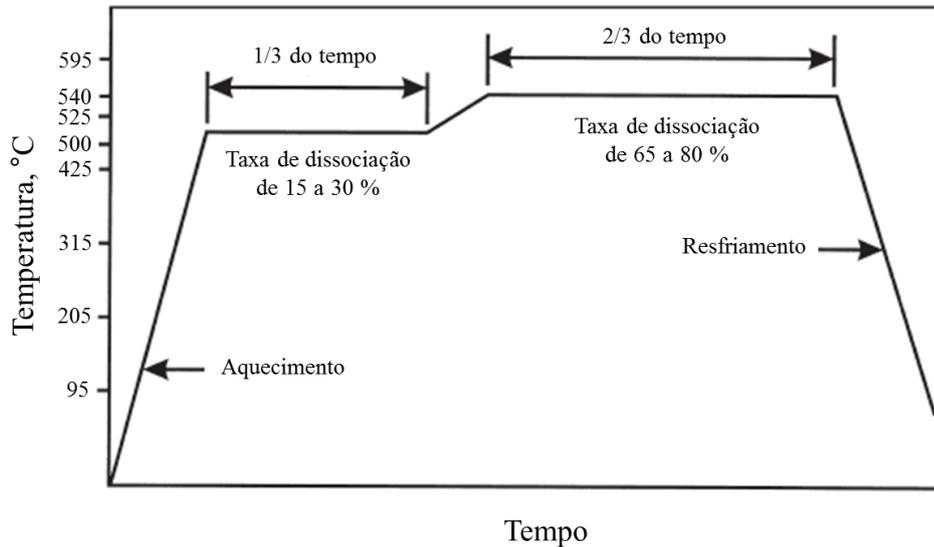
No processo de nitretação de simples estágio a temperatura fica na faixa de 495 a 525°C e é usada uma taxa de dissociação de 15 a 30 %, porém este processo produz a camada branca na superfície do metal que é frágil e rica em nitrogênio.

O processo de duplo estágio tem a vantagem de reduzir a espessura da camada branca. O primeiro estágio é semelhante à nitretação de simples estágio, com uma diminuição no tempo de tratamento. No segundo estágio a temperatura é elevada para 550-565°C e a taxa de dissociação de amônia é elevada para 65-80% (KNERR; ROSE e FILKOWSKI, 2004) (DAVIS, 2002). A Figura 3 ilustra o típico processo de dois estágios.

A quantidade de amônia consumida por hora é menor no processo de duplo estágio. Mas somente é vantajoso o uso do duplo estágio quando a quantidade de camada branca

formada no processo de simples estágio não possa ser tolerada na peça ou se o acabamento superficial após a nitretação é substancialmente reduzido (KNERR; ROSE e FILKOWSKI, 2004).

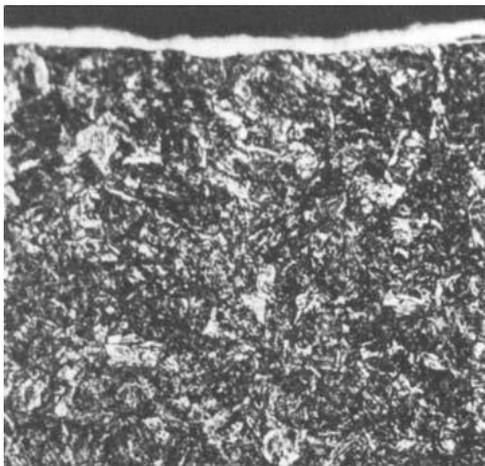
Figura 3 - Típico processo de dois estágios



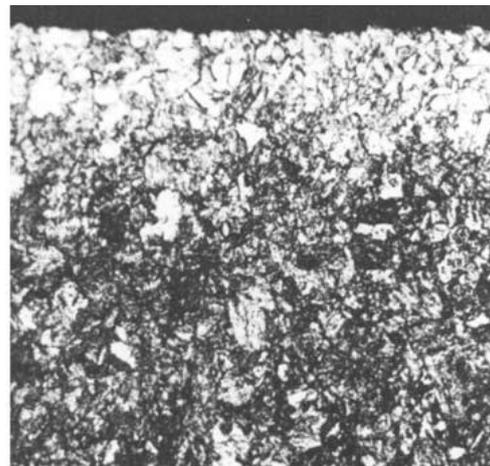
Fonte: Pye, 2003.

Na Figura 4 podem-se ver a microestrutura de um aço 4140 beneficiado, após nitretação de simples estágio e duplo estágio: (a) simples estágio: camada branca 0,005 até 0,0075mm. (b) duplo estágio: ausência de camada branca. Ataque nital à 400x.

Figura 4 - Microestrutura (a) simples estágio (b) duplo estágio



a) Nitretado a gás por 24 horas a 525 °C com 20 a 30% de dissociação.



b) Nitretado a gás por 5 horas a 525°C com 20 a 30 % de dissociação seguido por um segundo estágio de 20 horas a 565°C com 75 à 80% de dissociação.

Fonte: Adaptado de David, 2002.

### 2.1.5 Nitretação a plasma

A nitretação a plasma também chamada de nitretação iônica é um método de endurecimento superficial que utiliza uma tecnologia de descarga luminescente para introduzir o nitrogênio nascente na superfície da peça que difundirá para o interior do metal. É um processo utilizado em ligas ferrosas e não ferrosas (algumas ligas de Al e Ti também são nitretáveis). O processo é realizado normalmente em atmosferas contendo  $H_2$  e  $N_2$  a baixas pressões. O gás é ionizado através de uma diferença de potencial criado entre a peça (cátodo) e a própria carcaça do reator (ânodo) assim formando o plasma (RAMOS 2003).

As principais vantagens da nitretação plasma em relação aos outros métodos de nitretação convencional são:

(a) Temperaturas relativamente baixas: pode-se tratar as peças à partir de  $375^\circ C$ , enquanto na nitretação a gás não pode ser utilizada temperaturas inferiores a  $500^\circ C$  (KNERR; ROSE e FILKOWSKI, 2004). Temperaturas altas em longos períodos causam um indesejável revenimento e acabam por diminuir a dureza do núcleo (SKONIESKI, 2008).

(b) Tempo reduzido de tratamento: a criação de espécies ativas no plasma é o principal fator para o aumento da difusão do nitrogênio no aço. O nitrogênio nascente (N) formado na descarga se difunde através de difusão intersticial e difusão em contorno de grão (MARTINS, 2013).

(c) Possibilidade de se nitretar aços inoxidáveis: aços inoxidáveis são difíceis de serem nitretados a gás, pois a camada de óxido de cromo age como uma barreira para a difusão do nitrogênio. Na nitretação a plasma ocorre a remoção do filme de óxido em um pré-tratamento com plasma de hidrogênio ou argônio (TIER, 1998).

(d) Melhor controle da camada nitretada: devido o controle sobre a temperatura, pressão, composição atmosférica, tensão e corrente.

(e) Menos poluição: devido a fato de utilizar gases não poluentes.

#### 2.1.5.1 Formação e Sustentação do Plasma

O princípio da nitretação a plasma está na descarga elétrica entre dois eletrodos, onde um aumento da diferença de potencial entre os eletrodos é necessário para iniciar e manter uma descarga luminescente. O processo é realizado em um reator que é uma câmara preenchida por uma mistura de  $N_2$  e  $H_2$  em baixas pressões. A diferença de potencial depende

da distância entre os eletrodos, dos gases, e do tamanho e forma do cátodo (WOLFART 1996 apud SKONIESKI, 2008).

A descarga elétrica deve-se a presença de um campo elétrico suficientemente grande para produzir elétrons e íons livres no espaço entre os eletrodos. Nesta região os elétrons livres e íons ganham energia do campo elétrico entre os eletrodos, os íons positivos aceleram em direção à peça (cátodo) e os elétrons vão para a direção oposta.

Os íons se chocam com a superfície da peça ou colidem com as moléculas e átomos neutros do gás antes de chegar à peça. Ao colidir com as moléculas e átomos do gás ocorre à transferência de energia para as moléculas do gás levando a formação de uma variedade de novos espécimes, incluindo átomos neutros, radicais livres, átomos e moléculas ionizadas e excitadas (SKONIESKI, 2008). Com o bombardeamento da superfície ocorre um aumento da temperatura da peça, como resultado tem-se a adsorção de espécies ativadas que contem nitrogênio sobre o substrato. O bombardeio produz reações na superfície que dão a geração do nitrogênio atômico que se difunde no material em função da temperatura, permanecendo parte em solução sólida e parte formando precipitados com elementos do aço (RAMOS 2003).

Também ocorre a limpeza superficial da peça por remoção seletiva de material (*sputtering*) ou mesmo a reação de redução dos óxidos existentes com formação de vapor de água com a presença de hidrogênio na descarga, assim fazendo com que a adsorção de elementos químicos no material seja eficiente (PESSIN, 1999 apud RAMOS, 2003).

Na nitretação a plasma de aços inoxidáveis é muito comum realizar-se uma etapa anterior ao tratamento de nitretação que consiste em uma limpeza por *sputtering*, a qual objetiva a retirada da camada passiva, característica desses materiais. Para que ocorra o *sputtering* na superfície de um metal, é necessário que a espécie incidente possua uma energia maior ou igual à energia de ligação do átomo na superfície (Reis e Neidert, 2011). No entanto, na literatura, há divergências no que diz respeito aos parâmetros empregados e quanto à necessidade de realização da mesma. Testes realizados por Reis e Neidert (2011) mostraram que uma etapa prévia de limpeza por *sputtering*, no processamento por plasma de aços inoxidáveis, pode afetar significativamente os resultados obtidos na nitretação sendo o hidrogênio ineficiente como agente de *sputtering* por ter um peso molecular muito pequeno e o argônio mostrando-se eficiente devido ao seu maior peso molecular, provocando alterações significativas nos resultados alcançados.

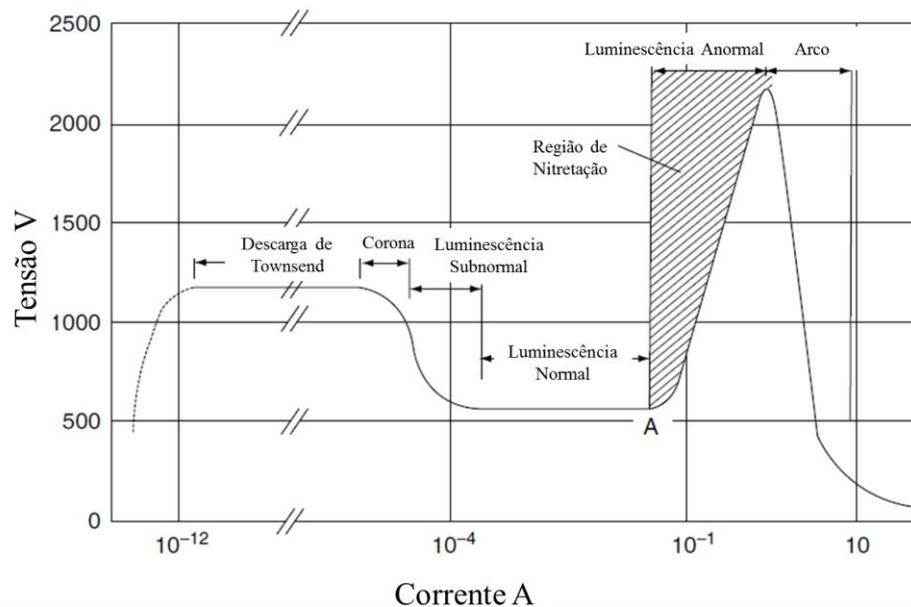
A Figura 5 mostra os mecanismos que explicam o comportamento típico da tensão em função da corrente de uma descarga elétrica.

As descargas de Townsend e Corona possuem correntes muito fracas sendo de pouco interesse na nitretação a plasma.

A região da luminescência normal possui uma densidade de corrente muito baixa para se efetuar nitretação, mesmo ela sendo estável e possuindo um aumento de corrente sem variação de tensão. Nesta região vê-se que a descarga reveste apenas uma parte do cátodo (peça).

Na região da luminescência anormal a descarga reveste todo o cátodo (peça). Nesta região a corrente e a tensão aumentam simultaneamente. A densidade da corrente é fator mais importante para caracterizar o meio nitretante (PYE, 2003).

Figura 5 - Tensão em função da corrente de uma descarga elétrica



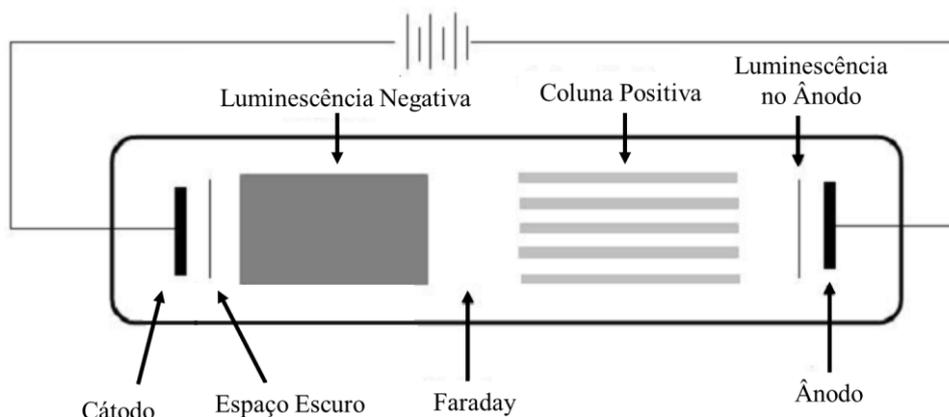
Fonte: Adaptado de Pye, 2003

#### 2.1.5.2 Regiões do plasma

As principais regiões constituintes do plasma são: a região do cátodo, a luminescência negativa, a coluna positiva e a região do ânodo, sendo as mais importantes a região do cátodo e da luminescência negativa, pois é onde ocorrem os fenômenos mais importantes do processo nitretante. Na Figura 6 podem ser observadas as regiões do plasma. No cátodo, ocorrem os fenômenos mais significativos para a manutenção da descarga e crescimento da camada nitretada, como a emissão de elétrons secundários e radiação

eletromagnética, dissipação de calor, *sputtering* na superfície, adsorção e difusão do nitrogênio. Na região do espaço escuro há um intenso campo elétrico no qual os elétrons e íons são acelerados, onde ocorrem trocas de cargas entre os átomos, ionização, excitação e retropulverização (SKONIESKI, 2008).

Figura 6 - Regiões do plasma



Fonte: Adaptado de Pizzolati (1988, apud SKONIESKI, 2008)

O campo elétrico decresce linearmente desde o cátodo até a região da luminescência negativa (região luminosa). A luminosidade é resultado da colisão elástica de elétrons, com átomos e moléculas do gás sofrendo excitação e ionização. Como o estado excitado é instável a molécula excitada tende a retornar ao seu estado fundamental, então ocorre o retorno dos elétrons a níveis inferiores de energia que resultam na emissão de fótons (luz). As taxas de ionização e excitação atingem seu valor máximo e decrescem até a margem do espaço escuro de Faraday devido a perda de energia dos elétrons na colisão (SKONIESKI, 2008).

## 2.2 DISTORÇÕES E ALTERAÇÕES DIMENSIONAIS

A distorção pode ser definida como uma mudança dimensional irreversível e normalmente imprevisível, devido ao processo de tratamento térmico ou variações de temperatura e carregamento em serviço. O termo “mudança dimensional” é usado para mudanças tanto de forma como tamanho (PYE, 2003).

Uma das principais causas de não-conformidade de peças em produção é a distorção dimensional. Ela é resultado das operações de manufatura e se manifesta durante o tratamento térmico. Embora a nitretação seja um processo de temperatura relativamente baixa, pode

produzir distorções dimensionais. A distorção geralmente ocorre como resultado direto de tensões residuais. As peças sofrem alterações de tamanho devido às mudanças de fase metalúrgicas, durante os processos de aquecimento e resfriamento e se deformam conforme as tensões são aliviadas pelo aquecimento. A distorção pode ser categorizada em dois grupos ou tipos:

(a) Distorção de tamanho: resulta da mudança de fase, a composição química do aço pode afetar a mudança de fase bem como a temperabilidade. Quando outro elemento ou elementos são difundidos na superfície do aço durante a nitretação, nitrocarbonetação, cementação, ou carbonitretação, uma variação de volume ocorre na superfície.

(b) Distorção de forma: geralmente ocorre como resultado de tensões provenientes do: resfriamento inadequado, forjamento, laminação, usinagem, aquecimento rápido, têmpera, fundição e geometria da peça. Todos estes fatores induzem tensões residuais que podem ser aliviadas pelo aquecimento, que naturalmente, ocorre durante o processo de nitretação (PYE, 2003).

Segundo Chiaverini (2003, p.132), um dos inconvenientes do tempo de duração de nitretação a gás está relacionado ao crescimento do material. Contudo, em função do tipo de aço, pode-se avaliar esse crescimento e desconta-lo na usinagem em que as peças são submetidas antes da nitretação. Eventualmente, esse crescimento pode ser removido pela retificação do material depois de nitretado.

A distorção pode ser gerenciada pelo controle da taxa de aquecimento, temperatura do processo, tempo na temperatura de tratamento, composição do gás para controle dos compostos da camada, uniformidade da camada formada, pré-tratamento correto (incluindo o alívio de tensões e estabilização), homogeneidade microestrutural e pelo resfriamento uniforme (PYE, 2006).

### **2.2.1 Distorções na Nitretação**

A distorção na nitretação pode resultar de:

(a) Alívio de tensões residuais provenientes de operações anteriores, tais como a soldagem, têmpera, usinagem, etc.

(b) Tensões introduzidas durante a nitretação devido ao apoio inadequado no forno, aquecimento rápido ou não uniforme e resfriamento rápido ou não uniforme.

(c) Tensões introduzidas pelo aumento do volume que ocorre na camada nitretada. Este aumento causa um alongamento do núcleo, resultando em tensões de tração no núcleo

que são equilibradas por tensões de compressão na camada nitretada. A deformação no núcleo é afetada pela tensão de escoamento do material, espessura da camada, e pela quantidade e tipo dos nitretos formados (DAVIS, 2002).

Quando as operações anteriores e o ciclo da nitretação são corretamente controlados, o crescimento se torna a principal causa da distorção. O crescimento depende da temperatura de têmpera, tempo e temperatura de nitretação, relação entre a camada nitretada e espessura do núcleo. O crescimento também é afetado quando algumas áreas da peça são mascaradas (protegidas a fim de se evitar a nitretação nelas) (DAVIS, 2002).

O crescimento é geralmente constante para peças idênticas nitretadas em diferentes lotes por um ciclo de processamento estabelecido. Desta forma, após o crescimento de determinada peça ser determinado experimentalmente, o desconto deste crescimento pode ser feito na usinagem final antes da nitretação. Antes do experimento para determinar o crescimento, deve ser feito um minucioso alívio de tensões (KNERR; ROSE e FILKOWSKI, 2004).

Um exemplo de distorção em um aço Nitralloy 135 é mostrado Figura 7. Os dados exibidos podem ser utilizados como uma aproximação para estimar o crescimento na nitretação a gás pelo processo de duplo estágio. Eles podem ser utilizados como um guia para determinar mudanças de tamanho somente em peças semelhantes a tubos, no entanto, o crescimento que ocorre em barras cilíndricas é da ordem de 0,4mm no diâmetro. Em algumas peças, as alterações dimensionais durante a nitretação envolvem superfícies internas e externas. Por exemplo, o diâmetro do furo de 300 mm de uma engrenagem diminuiu 0,025 mm, enquanto que diâmetro total da engrenagem aumenta 0,1 mm (DAVIS, 2002).

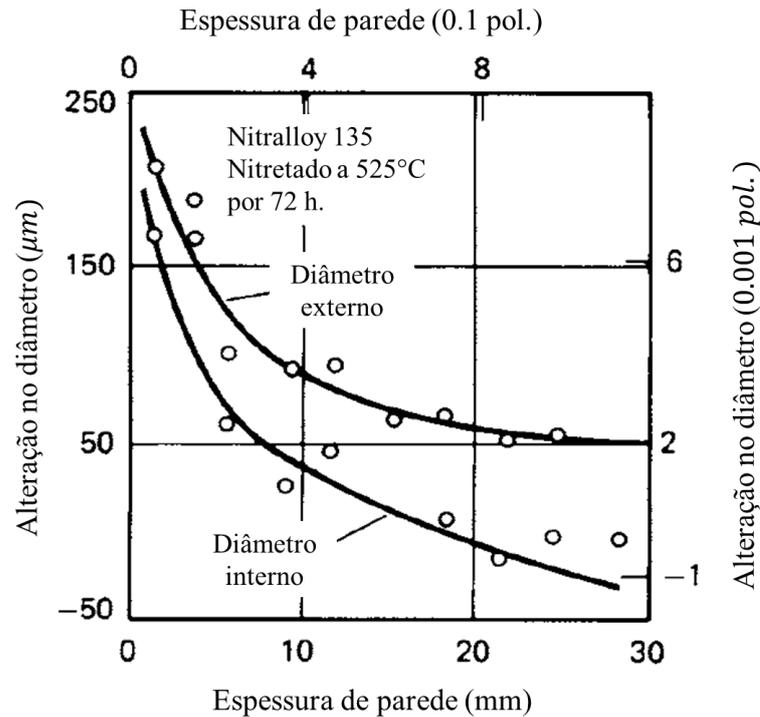
O gerenciamento da distorção pode ser dado pelo controle da taxa de aquecimento, temperatura do processo, tempo na temperatura de tratamento, composição do gás para controle dos compostos da camada, uniformidade da camada formada, pré-tratamento correto (incluindo o alívio de tensões e estabilização), homogeneidade microestrutural e pelo resfriamento uniforme (PYE, 2006).

Para evitar as distorções dimensionais alguns tratamentos podem ser executados como a estabilização e o alívio de tensões.

(a) Estabilização: em peças nitretadas, existe um equilíbrio entre tensões de compressão na superfície e tensões de tração no núcleo. Se este equilíbrio é perturbado pela remoção de parte da camada nitretada, lentas alterações dimensionais irão ocorrer até que seja alcançado o equilíbrio de tensões. Em alguns casos, as alterações dimensionais lentas resultantes da redistribuição de tensões durante a usinagem foram erroneamente atribuídas ao

desgaste. Para prevenir estas alterações, peças nitretadas são primeiramente usinadas próximo a dimensão final, então aquecidas a 565 °C por 1 hora, e depois feita a operação de acabamento. Peças nitretadas que não sofrem mais nenhuma remoção de material tem uma excelente estabilidade dimensional (KNERR; ROSE e FILKOWSKI, 2004).

Figura 7- Crescimento em função da espessura de parede



Fonte: Adaptado de Davis, 2002.

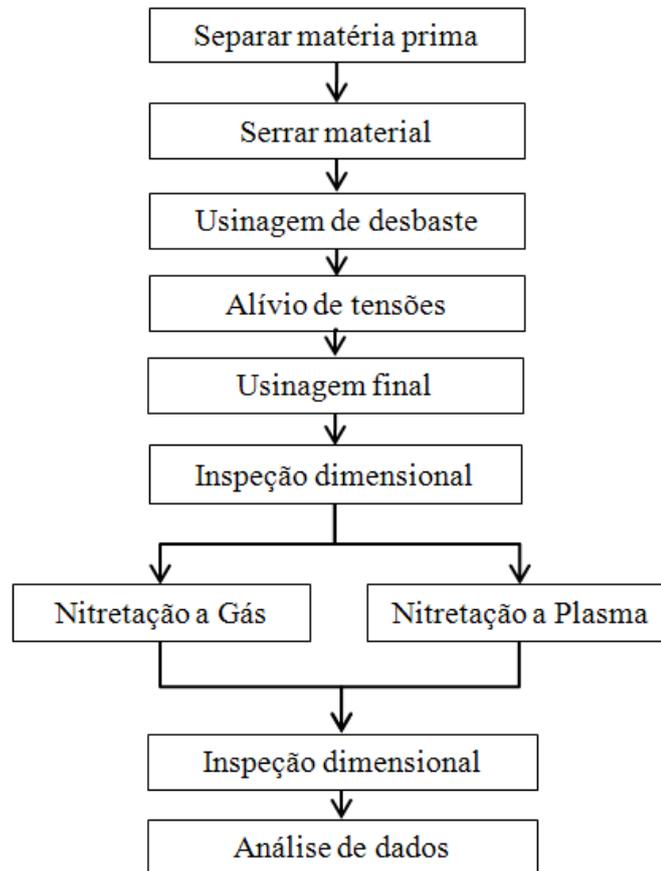
(b) Alívio de tensões: diversos processos requerem que as peças sejam desbastadas, seja realizado alívio de tensões e usinadas antes de serem nitretadas. Porém para muitas peças este processo não costuma ser exigido devido ao incremento de tempo no processo. Em geral, verificou-se que fazer alívio de tensões após a usinagem de desbaste só é necessário em peças esbeltas ou peças com seções de paredes finas, grandes ou complexas, tais como grandes montagens de engrenagens soldadas. Quando a distorção é causada pela remoção das tensões induzidas pela usinagem, o problema pode ser eliminado ou reduzido fazendo um alívio de tensões a 620 °C durante 4 horas antes da nitretação (DAVIS, 2002).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será abordada a proposta de trabalho, apresentando os materiais e equipamentos que foram utilizados, bem como os procedimentos experimentais.

Primeiramente, o material foi serrado em tubos que sofreram um desbaste e tratamento de alívio de tensões. Após foram usinados quatro modelos de corpos de prova em sua medida nominal. Cada modelo de corpo de prova foi analisado em dois tratamentos diferentes, nitretação a gás e nitretação a plasma, verificando as medidas do corpo de prova antes e após os tratamentos. O fluxograma pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma do processo



Fonte: O autor.

Após os procedimentos de fabricação, foram feitas análises metalográficas, o perfil de dureza e, por último, uma análise das variações dimensionais ocorridas.

### 3.1 MATERIAL

O material utilizado para fabricação dos corpos de prova foi um tubo laminado SAE 4130 temperado e revenido a 720°C, com diâmetro externo de 127mm e diâmetro interno de 70mm. O mesmo foi fornecido pela Vallourec & Mannesmann Tubes. A composição química pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do material SAE 4130 temperado e revenido

| <b>C</b> | <b>Mn</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Si</b> | <b>Ni</b> | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>Cu</b> |
|----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,29 %   | 0,91 %    | 0,010 %  | 0,001 %  | 0,22 %    | 0,02%     | 0,86 %    | 0,16 %    | 0,010 %   |

Fonte: Certificado de Inspeção: Vallourec & Mannesmann Tubes.

As propriedades mecânicas do material SAE 4130 temperado e revenido podem ser observadas através da Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do material SAE 4130 temperado e revenido

| <b>Limite de Escoamento (MPa)</b> | <b>Limite de Resistência a Tração (MPa)</b> | <b>Alongamento (%)</b> | <b>Redução de Área (%)</b> | <b>Dureza (HRc)</b> | <b>Impacto Charpy (-10°C) (J)</b> |
|-----------------------------------|---|------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 604                               | 727   | 27                     | 72                         | 22                  | 209                               |

Fonte: Certificado de Inspeção: Vallourec & Mannesmann Tubes.

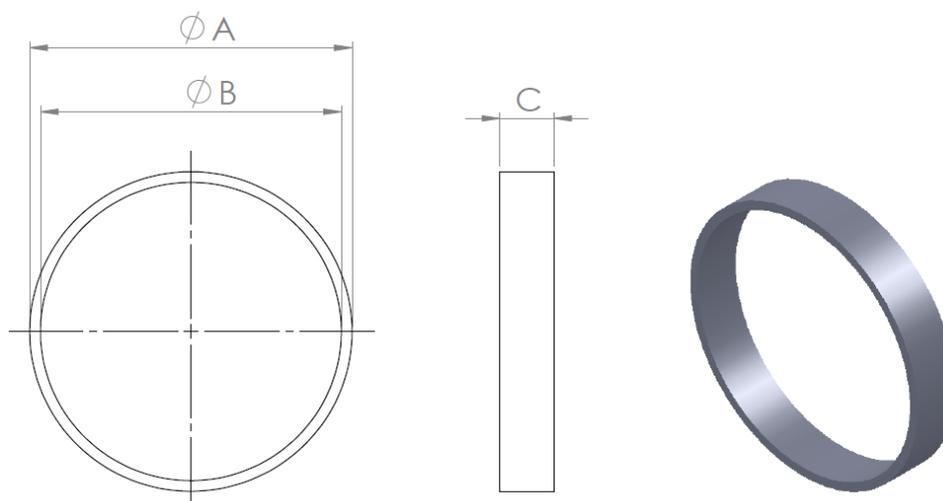
### 3.2 CORPOS DE PROVA

Foram fabricados quatro modelos de corpos de prova em formato de anéis variando entre dois diâmetros externos (120 e 110 mm) e duas espessuras de parede (4 e 8 mm) o comprimento foi mantido o mesmo para todos, sendo 20mm. O desenho esquemático pode ser observado na Figura 9 e suas dimensões na Tabela 3.

Variou-se o diâmetro e a parede para analisar as influências destas duas variáveis na distorção dimensional dos corpos de prova.

Todos os corpos de prova foram retirados do mesmo tubo através do processo de usinagem, utilizando-se os mesmo parâmetros para todos os corpos de prova.

Figura 9 - Desenho esquemático do corpo de prova



Fonte: O autor.

Tabela 3 - Dimensões dos corpos de prova

| <b>Modelo</b> | <b>Cota A (mm)</b> | <b>Cota B (mm)</b> | <b>Parede (mm)</b> | <b>Cota C (mm)</b> |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>A</b>      | 120                | 112                | 4                  | 20                 |
| <b>B</b>      | 120                | 104                | 8                  | 20                 |
| <b>C</b>      | 110                | 102                | 4                  | 20                 |
| <b>D</b>      | 110                | 94                 | 8                  | 20                 |

Fonte: O autor.

### 3.3 METODOLOGIA

O tubo do material fornecido foi serrado em 4 partes sendo duas delas com 265mm e as outras duas com 241mm, utilizando uma serra fita Franho SCF-360A (Brasil). Com cada parte foram feitos 8 corpos de prova com 20 mm de comprimento, totalizando 32 corpos de prova, também serrou-se um corpo de prova com 20mm de comprimento de um dos tubos de 265mm para análise por microscopia ótica.

Depois de serrados os tubos foram desbastados em um torno CNC Mazak Integrex 35 com dimensões conforme Tabela 4, também foi retirado um corpo de prova através do processo de sangramento para análise por microscopia ótica.

Os tubos foram desbastados fixando-os pelo externo na castanha e torneando o diâmetro externo e o diâmetro interno meio a meio. Os parâmetros de corte utilizados estão indicados na Tabela 5.

Tabela 4 - Dimensões de desbaste

| <b>Modelo de tubo</b> | <b>Diâmetro Externo<br/>(mm)</b> | <b>Diâmetro Interno<br/>(mm)</b> |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <b>A e B</b>          | 124                              | 100                              |
| <b>C e D</b>          | 114                              | 90                               |

Fonte: O autor.

Após o desbaste foi feito um alívio de tensões nos tubos, a uma temperatura média de 480°C por um período de 4 horas conforme Anexo H, Anexo I, Anexo J, Anexo L e Anexo M.

A usinagem final também foi feita no torno CNC Mazak Integrex 35 utilizando os parâmetros de corte conforme Tabela 5. O tubo foi fixado pelo diâmetro externo, faceando-se até limpar, após foi torneado o diâmetro externo e diâmetro interno nas medidas finais e por fim foi sangrado o corpo de prova. O processo foi repetido mais 7 vezes, fabricando-se assim 8 corpos de prova do tubo, para os outros três tubos a quantidade de peças fabricadas foi 9, sendo que as três peças extras foram utilizadas da seguinte forma: uma como corpo de prova para microscopia ótica, outra como corpo de prova pelo fornecedor da nitretação a gás e outra como corpo de prova pelo fornecedor da nitretação a plasma.

Tabela 5 - Parâmetros de corte

| <b>Usinagem</b>                 |                  | <b>Velocidade de<br/>corte (m/min)</b> | <b>Profundidade<br/>de corte (mm)</b> | <b>Avanço<br/>(mm/rot.)</b> |
|---------------------------------|------------------|--|---------------------------------------|-----------------------------|
| Usinagem do<br>tubo para alívio | Desbaste externo | 160                                    | 2                                     | 0,35                        |
|                                 | Desbaste interno | 140                                    | 2                                     | 0,32                        |
|                                 | Desbaste externo | 170                                    | 2                                     | 0,35                        |
| Usinagem final                  | Acabamento ext.  | 190                                    | 0,5                                   | 0,2                         |
|                                 | Desbaste interno | 160                                    | 2                                     | 0,32                        |
|                                 | Acabamento int.  | 190                                    | 0,5                                   | 0,2                         |
|                                 | Sangramento      | 120                                    | 0,12                                  | 0,12                        |

Fonte: O autor

Após a usinagem os corpos de prova foram identificados em sua lateral com uma caneta pneumática, que fez pequenos pontos com um punção na superfície do metal. Esta gravação serviu como identificação dos corpos de prova nas próximas etapas.

Os corpos de prova foram medidos em uma tridimensional da Zeiss modelo GageMax (Alemanha), obtendo os diâmetros internos, externos e suas circularidades, o diâmetro externo foi medido através de 250 pontos pelo seu perímetro, e o diâmetro interno foi medido através de 200 pontos pelo seu perímetro, ambas medições ocorreram na metade

do comprimento do corpo de prova ou seja a 10mm da face. Os comprimentos dos corpos de prova foram medidos com um micrômetro Mitutoyo (Japão) com escala de 0 a 25mm e resolução de 0,01mm em cinco pontos com aproximadamente 72° de distância entre as medições, tomando-se cuidado para não medir sobre o local onde foi gravado seu código.

Cada modelo de corpo de prova foi submetido a dois diferentes tratamentos que são a nitretação a gás e a nitretação a plasma. Planejava-se submeter os corpos de prova a quatro tratamentos sendo os outros dois tratamentos ciclos térmicos, onde um deles representaria o ciclo térmico da nitretação a gás sem ocorrer nitretação e o outro o ciclo térmico da nitretação a plasma sem ocorrer nitretação, porém problemas ocorridos na primeira nitretação a gás e na primeira nitretação a plasma inviabilizaram o uso destes corpos de prova no presente estudo, foi então necessário utilizar os demais corpos de prova para as nitretações. As temperaturas, tempos e atmosferas que foram utilizados nos tratamentos podem ser observados na Tabela 6.

O método para determinar a camada nitretada usado foi a dureza, sendo a camada efetiva considerada como a profundidade do perfil de dureza que atinge 50 HRc. Foi solicitado aos fornecedores para atender uma camada efetiva entre 0,20 e 0,25mm de profundidade.

Depois do tratamento os corpos de prova foram novamente medidos em máquina tridimensional utilizando os mesmos parâmetros, obtendo os novos diâmetros internos, externos e suas circularidades. O comprimento foi novamente medido da mesma forma e com o mesmo micrômetro.

O perfil de microdureza nos corpos de prova nitretados que foram realizados pelos fornecedores e enviados juntamente com os relatórios podem ser observados no Anexo F e Anexo G.

Tabela 6 - Tratamentos para os corpos de prova

| <b>Tratamento</b>   | <b>Temperatura média (°C)</b> | <b>Tempo (h)</b> | <b>Atmosfera</b>        |
|---------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------|
| Nitretação a gás    | 520                           | 45               | Amônia                  |
| Nitretação a plasma | 500                           | 50               | Nitrogênio e Hidrogênio |

Fonte: O autor.

Para a análise da microestrutura foi realizada a análise por microscopia ótica, retirando-se amostras do material nas condições: conforme fornecido, desbastado, tratado com alívio de tensões e também depois de usinado nas medidas finais. Estas amostras foram cortadas com disco de corte, após foram embutidas a quente em baquelite, lixadas, polidas e

atacadas com Nital 2%. Foi utilizado um microscópio Nikon para visualização da microestrutura e da camada nitretada.

O perfil de microdureza da camada nitretada foi realizado para verificar qual a camada efetiva que foi obtida e para comparar os perfis de microdureza da camada nitretada a gás com a camada nitretada a plasma. Este perfil de dureza foi realizado com as mesmas amostras dos corpos de prova que foram utilizados para as análises metalográficas. Foi utilizado um microdurometro da marca Shimadzu (Japão) utilizando-se a escala vickers com carga de 2.942N (HV0.3) com uma duração de aplicação de 15 segundos.

Após, foram feitas análises comparando as medidas antes da nitretação com as medidas após a nitretação, fazendo uso das médias das variações.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

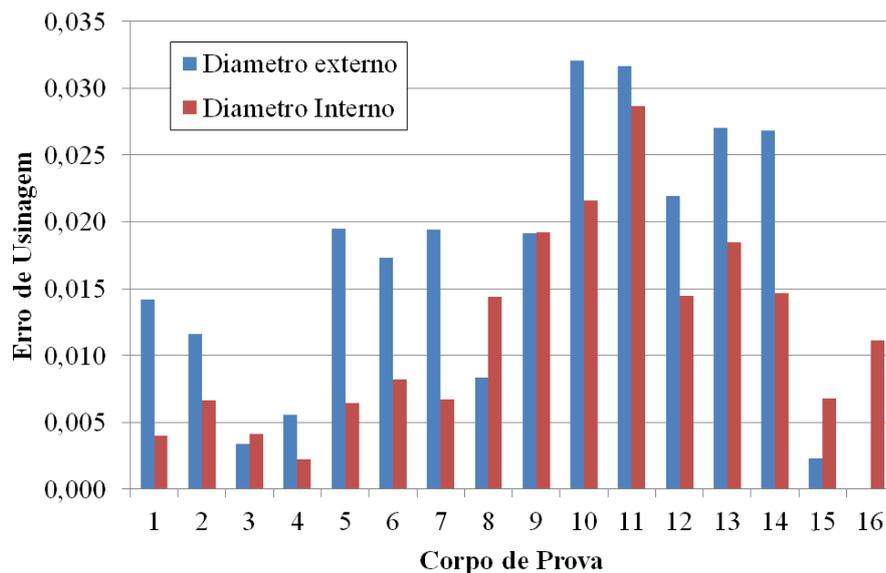
Este capítulo apresenta a aplicação da metodologia descrita para a avaliação da variação dimensional dos anéis nitretados a gás e nitretados a plasma, através das medições dimensionais, metalografias e perfis de dureza.

Inicialmente, serão apresentados os resultados das medições antes da nitretação, após os resultados das nitretações, seguido dos resultados das medições realizadas após a nitretação e depois os resultados da microscopia ótica. Por fim, são expostas as variações que ocorreram durante o processo de nitretação, sendo concluído o presente estudo com comentários e sugestões para futuros desenvolvimentos.

### 4.1 DIMENSÕES PRÉ-NITRETAÇÃO

Os valores obtidos com as medições realizadas com a máquina tridimensional antes da nitretação encontram-se no Apêndice F, a parede foi mensurada através da diferença entre o diâmetro interno e o diâmetro externo. O erro de usinagem entre o diâmetro nominal e o medido pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Erro de Usinagem



Fonte: O autor.

Também pode se observar que o desvio de circularidade é baixo o que demonstra a efetividade do alívio de tensões executado no material após o desbaste.

Os valores encontrados nas medições de largura com micrômetro estão exibidos no Apêndice G, bem com o valor médio da largura e o desvio padrão. Observa-se que a largura ficou acima do especificado, estando em média 0,27 mm maior com um desvio padrão de 0,038 indicando um erro sistemático.

## 4.2 NITRETAÇÃO

A princípio, além da nitretação seriam feitos dois ciclos térmicos distintos, onde um deles representaria o ciclo térmico da nitretação a gás mas sem ocorrer nitretação e o outro o ciclo térmico da nitretação a plasma sem ocorrer nitretação, porém o primeiro lote de corpos de prova nitretados tanto a gás como a plasma não atenderam a especificação solicitada de uma camada efetiva entre 0,20 à 0,25mm com dureza superior a 50 HRc. O primeiro lote da nitretação a gás obteve uma camada efetiva de 0,14mm devido a um problema com o fornecimento de amônia que causou o excesso de amônia no forno, gerando uma camada branca excessivamente grande (0,08mm) e porosa como pode ser observado nas imagens obtidas por microscopia ótica do Apêndice A. Já na nitretação a plasma os corpos de prova obtiveram uma camada efetiva de apenas 0,05mm, o fornecedor não soube informar qual foi o problema ocorrido. A camada branca foi quase nula com aproximadamente 1,2 $\mu$ m como pode ser observado nas imagens obtidas por microscopia ótica do Apêndice B.

O segundo lote da nitretação a gás e da nitretação plasma obtiveram a camada efetiva com dureza superior a 50HRc dentro de especificado (entre 0,20 e 0,25mm). A nitretação a plasma teve uma camada de 0,20mm e a nitretação a gás uma camada de 0,23mm. Os demais resultados da nitretação a gás encontram-se no item 4.2.1, e os resultados da nitretação a plasma no item 4.2.2.

### 4.2.1 Nitretação a gás

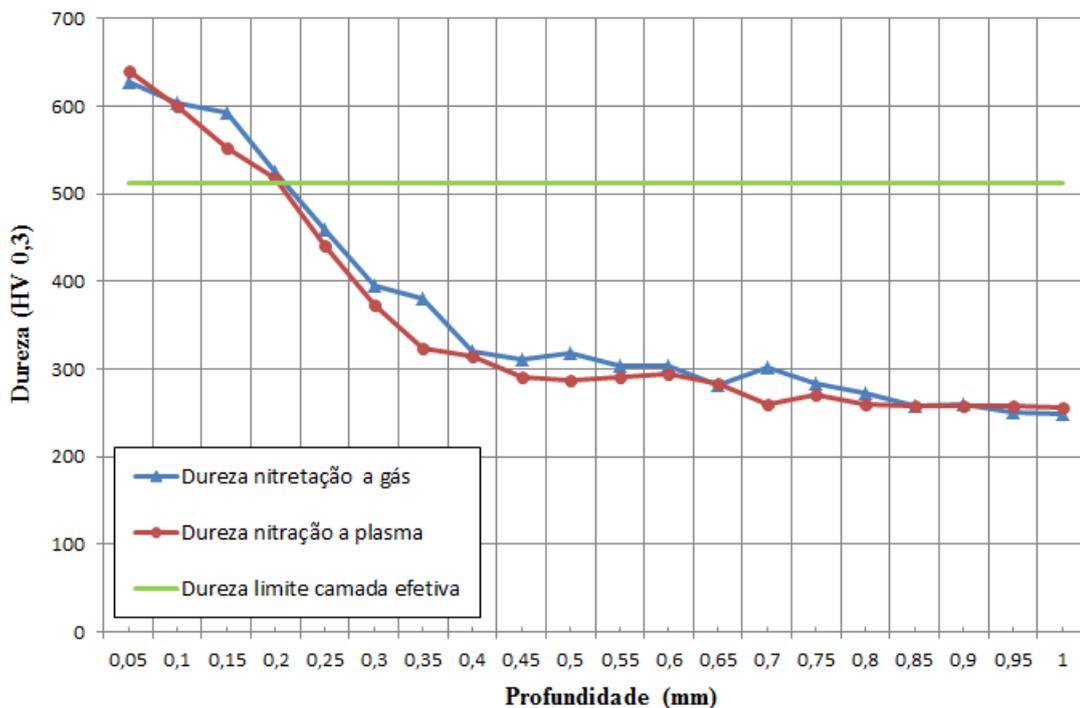
O segundo lote da nitretação a gás foi bem sucedido, obteve uma camada efetiva com dureza superior a 50 HRc de 0,23mm e uma dureza superficial de 59 HRc. O perfil de dureza pode ser observado na Figura 11. O certificado de qualidade do fornecedor pode ser observado nos Anexos A, B, C e D. Os corpos de prova foram nitretados durante 45h a uma temperatura média de 520°. O tempo e temperatura ficaram a critério do fornecedor para que atendesse a camada solicitada. O gráfico do forno pode ser observado no Anexo E, e o resultado do perfil de dureza realizado pelo fornecedor pode ser observado no Anexo F.

A camada branca formada foi em média de 0,028mm, medida a partir de imagens obtidas por microscopia ótica dos corpos de prova, as imagens podem ser observadas no Apêndice D. No certificado do fornecedor consta camada de 0,03mm, como pode ser visto no Anexo F.

#### 4.2.2 Nitretação a plasma

O segundo lote da nitretação a plasma também foi bem sucedido, obtendo uma camada efetiva de 0,20mm, uma diferença de 0,03mm para a nitretação a gás. A dureza superficial ficou em 59 HRc após a nitretação, a mesma dureza superficial obtida pela nitretação a gás. Os corpos de prova foram nitretados durante 50h a uma temperatura média de 500°C sendo que a temperatura inicial foi de 472°C e a temperatura final foi de 525°C. O tempo e temperatura ficaram a critério do fornecedor para que atendessem a camada efetiva solicitada. O perfil de dureza pode ser observado na Figura 11. O perfil de dureza gerado pela nitretação a plasma foi bem semelhante ao da nitretação a gás.

Figura 11 - Perfil de dureza das nitretações



Fonte: O autor.

O certificado da nitretação pode ser observado no Anexo G, onde também pode ser visto o gráfico do forno e o resultado do perfil de dureza realizado pelo fornecedor.

A camada branca formada média foi de 0,003mm, medida a partir de imagens obtidas por microscopia ótica dos corpos de prova, as mesmas podem ser observadas no Apêndice E.

O tempo de nitretação que o fornecedor da nitretação a plasma utilizou foi 5h superior ao tempo utilizado pelo fornecedor da nitretação gasosa e a temperatura média na nitretação a plasma foi 20°C menor do que a temperatura média na nitretação a gás.

Skonieski (2008) menciona que a nitretação a plasma é mais rápida do que a nitretação gasosa, porém, pode ser observado que a nitretação a gás foi mais rápida e obteve uma camada efetiva 0,03mm maior do que a nitretação a plasma.

### 4.3 ANÁLISES POR MICROSCOPIA ÓTICA

Pelas imagens obtidas por microscopia ótica dos corpos de prova verificou-se que a estrutura é basicamente martensita revenida, como pode ser observado no Apêndice E.

Não houve alterações significativas na estrutura durante o processo produtivo dos corpos de prova. No Apêndice E podem ser observadas as imagens obtidas por microscopia ótica dos corpos de prova no estado laminado (conforme fornecido), após o desbaste inicial, após o alívio de tensões realizado e após a usinagem.

Todas as imagens obtidas por microscopia ótica dos corpos de prova exibidas no Apêndice E são a meio raio e foram retiradas da seção longitudinal dos corpos de prova.

Foram feitas também imagens por microscopia ótica dos corpos de prova na superfície do diâmetro externo e interno e não apresentaram nenhuma diferença na estrutura quando comparadas com o núcleo (meio raio).

#### 4.3.1 Camadas brancas

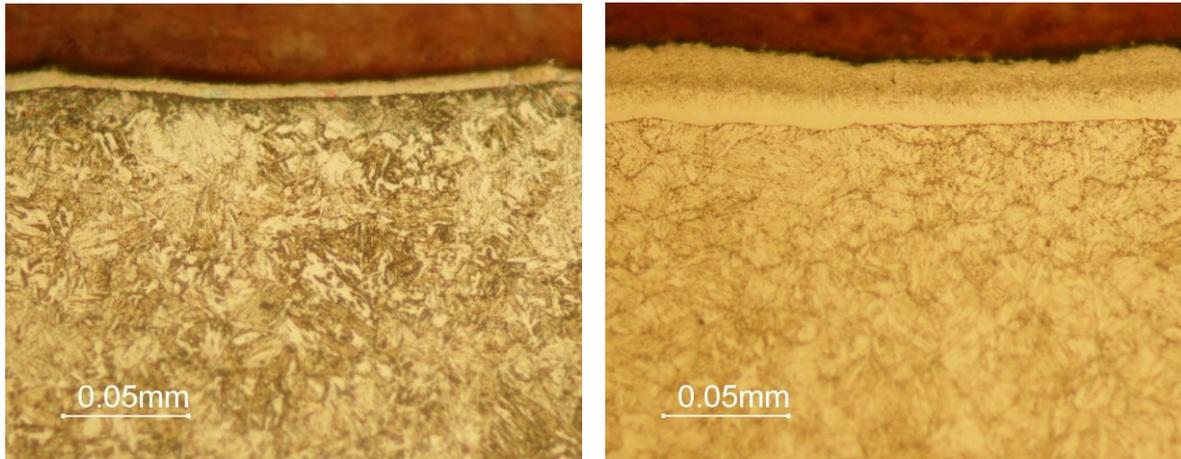
As imagens obtidas por microscopia ótica na superfície dos corpos de prova nitretados mostram que a camada branca criada pela nitretação a gás foi maior do que a camada branca criada na nitretação a plasma.

A Figura 12 apresenta as imagens obtidas por microscopia ótica da camada branca criada na nitretação a gás e na nitretação a plasma, a espessura média da camada na nitretação

a gás é de 28 $\mu$ m que pode ser considerada grande. Já a camada branca criada pela nitretação a plasma foi pequena, possuindo uma espessura média de 3 $\mu$ m.

Mais imagens da camada branca na nitretação a gás podem ser observadas no Apêndice D, e da nitretação a plasma no Apêndice C.

Figura 12 - Camadas brancas



Nitretação a plasma, 50h a 500°C  
Local: Superfície      Ataque: Nital 2%  
Ampliação: 500x  
Camada branca: 3  $\mu$ m

Nitretação a gás, 45h a 520°C  
Local: Superfície      Ataque: Nital 2%  
Ampliação: 500x  
Camada branca: 28  $\mu$ m

Fonte: O autor.

#### 4.4 VARIAÇÃO DIMENSIONAL

Os valores obtidos com as medições realizadas com a máquina tridimensional após a nitretação são exibidos no Apêndice G. A espessura de parede foi mensurada através da diferença entre o diâmetro interno e o diâmetro externo.

Houve incremento dimensional em todos os corpos de prova nitretados, aumentando o diâmetro externo e também o diâmetro interno.

Nos corpos de prova com espessura de parede de 4mm houve um incremento dimensional médio no diâmetro externo de 0,131mm na nitretação a gás e um incremento médio de 0,122mm na nitretação a plasma. No diâmetro interno houve um aumento médio de 0,079mm na nitretação a gás e 0,106mm na nitretação a plasma.

Já para os corpos de prova com espessura de parede de 8mm houve um incremento dimensional médio no diâmetro externo de 0,082mm na nitretação a gás e um incremento

médio de 0,087mm na nitretação a plasma. No diâmetro interno houve um aumento médio de 0,029mm na nitretação a gás e 0,071mm na nitretação a plasma.

O desvio de circularidade aumentou em quase todos os corpos de prova. Na nitretação a plasma o desvio de circularidade aumentou em média 0,014mm no diâmetro externo e 0,011mm no diâmetro interno. Para a nitretação a gás o desvio de circularidade aumentou em média 0,011mm no diâmetro externo e 0,004mm no diâmetro interno.

Os valores das medições de largura são exibidos no Apêndice I bem com o valor médio da largura e o desvio padrão. Pode ser observado que a largura teve um incremento dimensional, aumentando em média 0,043mm na nitretação a gás e 0,016mm na nitretação a plasma.

A Tabela 7 apresenta a variação média do diâmetro externo, a variação média da circularidade do diâmetro externo, a variação média do diâmetro interno, a variação média da circularidade do diâmetro interno e a variação média da largura dos corpos de prova.

Tabela 7 - Variações dimensionais

| <b>Modelo</b> | <b>Nitretação</b> | <b>Média da<br/>Variação<br/>Diâmetro<br/>Externo<br/>(mm)</b> | <b>Média da<br/>Variação de<br/>Circularidade<br/>Diâmetro<br/>Externo<br/>(mm)</b> | <b>Média da<br/>Variação<br/>Diâmetro<br/>Interno<br/>(mm)</b> | <b>Média da<br/>Variação de<br/>Circularidade<br/>Diâmetro<br/>Interno<br/>(mm)</b> | <b>Média<br/>da<br/>Variação<br/>Largura<br/>(mm)</b> |
|---------------|-------------------|--|---|--|---|---|
| A             | Plasma            | + 0,131  | + 0,016   | + 0,117  | + 0,020   | + 0,017   |
|               | Gás               | + 0,136  | + 0,017   | + 0,083  | + 0,013   | + 0,047   |
| B             | Plasma            | + 0,091  | + 0,021   | + 0,077  | + 0,009   | + 0,015   |
|               | Gás               | + 0,086  | + 0,016   | + 0,034  | + 0,015   | + 0,040   |
| C             | Plasma            | + 0,114  | + 0,011   | + 0,095  | + 0,012   | + 0,015   |
|               | Gás               | + 0,125  | + 0,006   | + 0,074  | + 0,008   | + 0,047   |
| D             | Plasma            | + 0,084  | + 0,007   | + 0,064  | + 0,005   | + 0,018   |
|               | Gás               | + 0,079  | + 0,006   | + 0,025  | - 0,018   | + 0,037   |

Fonte: O autor.

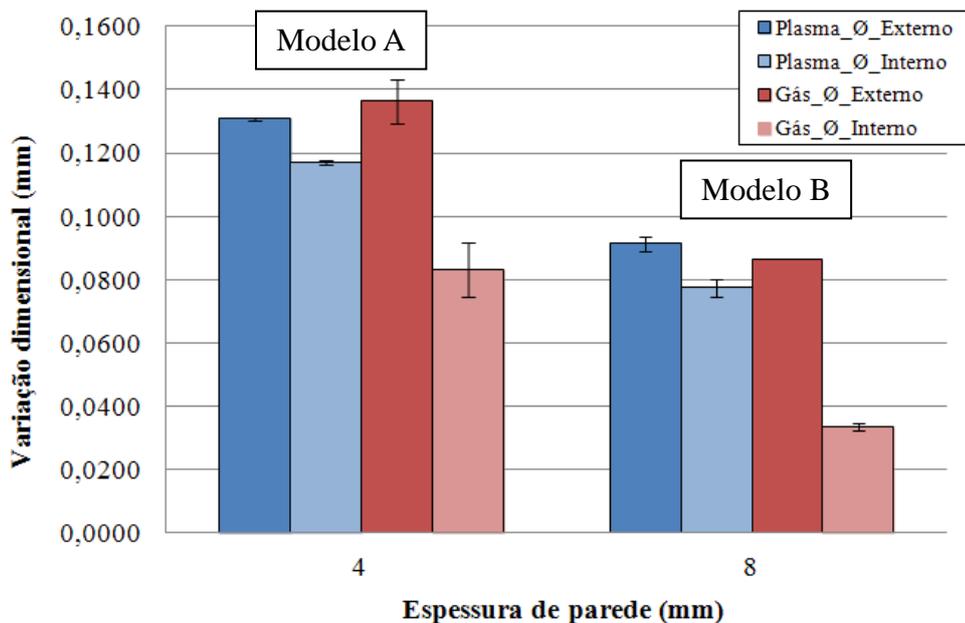
Houve incremento em todas as dimensões analisadas de todos os corpos de prova. O desvio de circularidade não teve um comportamento padrão, tanto na nitretação a gás como no plasma. Segundo Davis (2002), durante a nitretação ocorre um alívio de tensões residuais provenientes de operações anteriores, tal como a usinagem. Este alívio de tensões da usinagem é o provável causador das variações de circularidade.

A variação dimensional ocorrida no diâmetro interno e externo é discutida na seção 4.4.1, e a variação da largura é discutida na seção 4.4.2.

#### 4.4.1 Variação dimensional dos diâmetros

Na Figura 13 há o gráfico com a variação dimensional que ocorreu durante a nitretação nos corpos de prova que possuíam diâmetro externo de 120mm. Neste gráfico pode-se observar que o incremento dimensional foi maior para os corpos de prova com menor espessura de parede, tanto os nitretados pelo processo a gás quanto os nitretados pelo processo a plasma.

Figura 13 - Gráfico da variação dimensional CP com 120mm no diâmetro externo



Fonte: O autor.

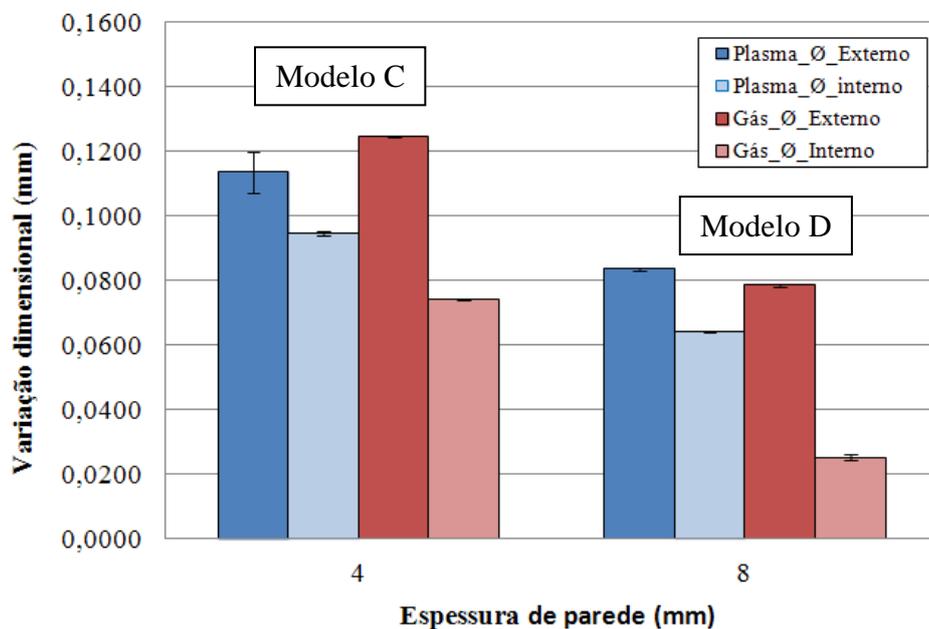
Também pode ser observado que com a parede de 4mm os corpos de prova que tiveram maior incremento dimensional do diâmetro externo foram os nitretados a gás, tendo aumentado em média 0,005mm a mais que os nitretados a plasma. Porém, os que mais aumentaram no diâmetro interno foram os nitretados a plasma, tendo crescido em média 0,039mm a mais que os nitretados a gás.

Nos corpos de prova com 8mm de parede, ocorreu maior incremento dimensional nos nitretados a plasma, tanto no diâmetro externo quanto no diâmetro interno, aumentando

em média 0,005mm a mais no diâmetro externo e em média 0,044mm a mais no diâmetro interno.

O gráfico com as variações dimensionais para os corpos de prova que possuem 110mm no diâmetro externo podem ser observados na Figura 14. O comportamento do crescimento nos corpos de prova foi semelhante aos corpos de prova com diâmetro externo de 120mm, porém o incremento dimensional foi menor no diâmetro interno e também no diâmetro externo.

Figura 14 - Gráfico da variação dimensional CP com 110mm no diâmetro externo



Fonte: O autor.

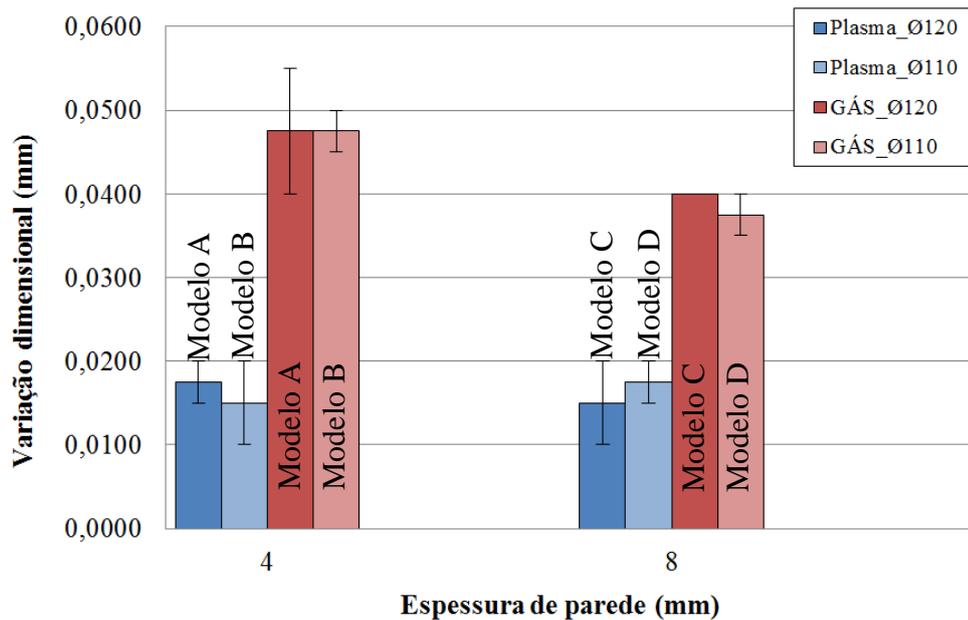
Dentre os corpos de prova com parede de 4mm, os que tiveram maior incremento dimensional no diâmetro externo foram os nitretados a gás, tendo aumentado em média 0,011mm a mais que os nitretados a plasma. Os que tiveram maior incremento dimensional no diâmetro interno foram os nitretados a plasma, tendo aumentado em média 0,021mm a mais que os nitretados a gás.

Nos corpos de prova com 8mm de parede, ocorreu maior incremento dimensional nos nitretados a plasma, tanto no diâmetro externo quanto no diâmetro interno. Aumentou em média 0,005mm a mais no diâmetro externo e em média 0,039 a mais no diâmetro interno.

#### 4.4.2 Variação dimensional da largura

A Figura 15 exibe o gráfico com as variações de largura dos corpos de prova. Neste gráfico pode-se observar que a variação de largura na nitretação a gás foi muito superior a variação da largura na nitretação a plasma tanto para os corpos de prova com parede de 4mm quanto para os de 8mm.

Figura 15 - Gráfico da variação da largura



Fonte: O autor.

Os diâmetros externos não tiveram influência na variação da largura. Os incrementos dimensionais mensurados nos corpos de prova com 120mm no diâmetro externo foram bastante similares aos corpos de prova com 110mm.

Não se pode notar uma influência clara da espessura de parede na variação da largura. A espessura de parede na nitretação a gás aparenta ser influente na variação de largura, tendo um incremento dimensional maior da largura nos corpos de prova com menor parede. Os corpos de prova nitretados pelo processo a plasma não mostraram nenhuma influência que pudesse ser identificada devido ao comportamento apresentado.

Os fatores responsáveis por não ter sido observado nenhuma influência da parede nos corpos de prova nitretados a plasma são:

- (a) Baixa quantidade de corpos de prova fabricados;
- (b) Alta variação de largura ao longo da circunferência em alguns corpos de prova aliado à baixa quantidade de medidas feitas pela circunferência.

(c) Como a diferença de valores é muito baixa, seria necessário um instrumento com maior precisão do que o micrômetro utilizado com escala de 0,01mm.

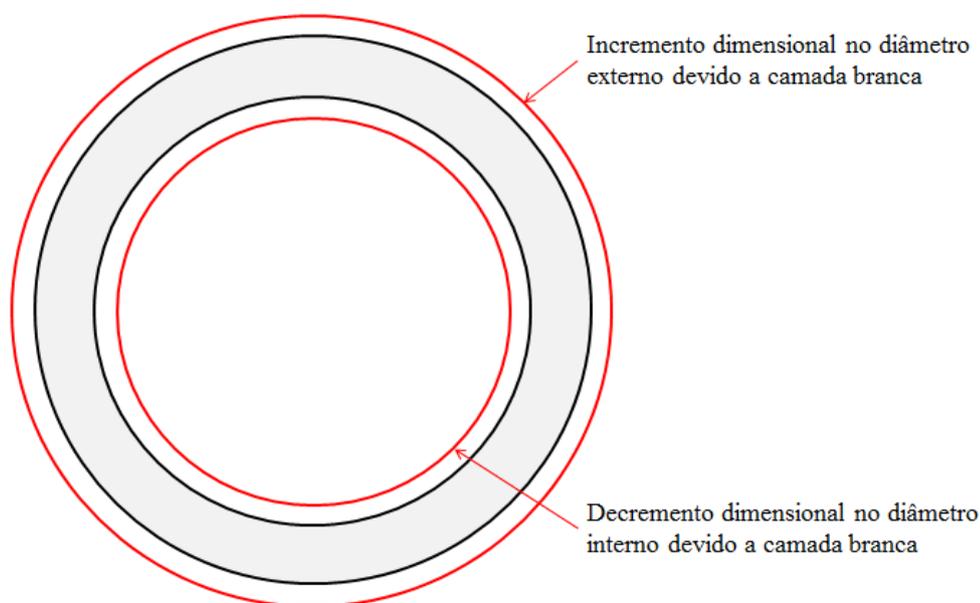
#### 4.4.3 Influência da Camada Branca

A nitretação a gás teve um incremento dimensional maior no diâmetro externo quando comparado a nitretação a plasma. Este comportamento é basicamente devido à camada branca, pois a mesma não se difunde no metal, ela cresce a partir da superfície do metal como mencionado por Pye (2003). O diâmetro externo é aumentado pelo crescimento da camada branca. Porém a nitretação a gás teve um menor incremento no diâmetro interno, também causado pela camada branca, que ao crescer, reduz o diâmetro.

A Figura 16 ilustra a influência da camada branca na variação dimensional dos diâmetros nos corpos de prova nitretados.

A espessura média da camada branca formada durante a nitretação a gás foi de  $28\mu\text{m}$  que pode ser considerada grande. Já a camada branca criada pela nitretação a plasma foi bem pequena, possuindo uma espessura média de  $3\mu\text{m}$ .

Figura 16 - Influência da camada branca nos diâmetros



Fonte: O autor.

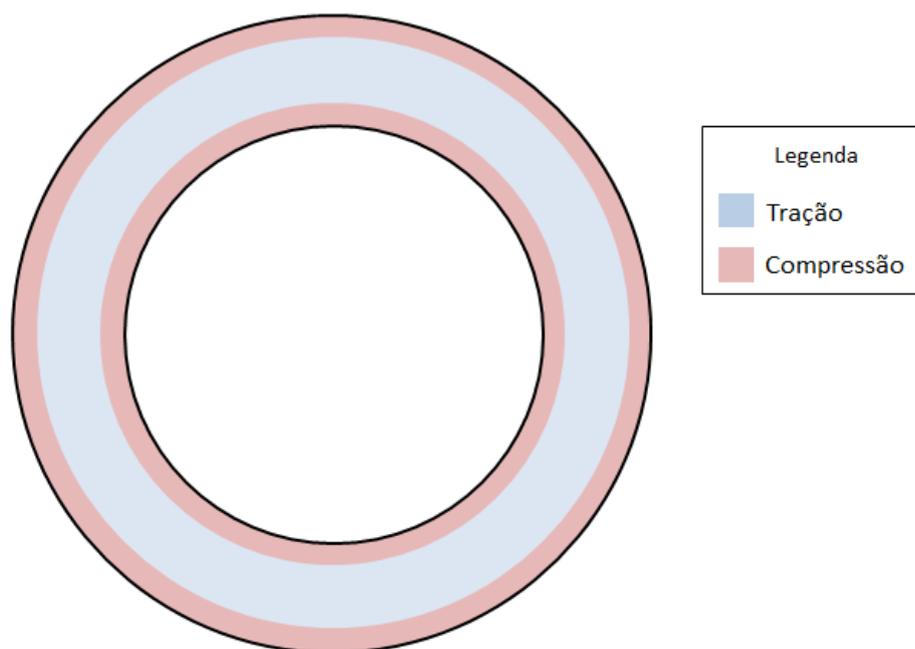
#### 4.4.4 Influência das tensões superficiais

Além das alterações dimensionais ocasionadas pela camada branca, houve um incremento dimensional provavelmente causado pelas tensões introduzidas pelo aumento do volume que ocorre na camada nitretada. Segundo Davis (2002), este aumento causa um alongamento do núcleo, resultando em tensões de tração no núcleo que são equilibradas por tensões de compressão na camada nitretada.

Com o aquecimento dos corpos de prova há um aumento dimensional devido ao aumento da agitação de seus átomos e conseqüentemente o aumento da distância média entre eles. A nitretação é realizada com a peça aquecida e durante a nitretação ocorre a inclusão de nitrogênio na superfície do metal, com isso, há um aumento de volume na superfície e ao resfriar novamente as peças a superfície resiste contra a retração ao volume anterior a nitretação e o núcleo tenta voltar ao volume inicial. Com isso a superfície fica com tensões internas compressivas enquanto o núcleo tem tensões trativas.

A Figura 17 ilustra as tensões no interior dos corpos de prova. Na superfície há tensões compressivas e quanto mais próximo a superfície maior a concentração de material adicionado e conseqüentemente maiores as tensões compressivas. No núcleo estão às tensões trativas.

Figura 17 - Tensões nos corpos de prova



Fonte: O autor.

A Tabela 8 mostra os valores dos diâmetros dilatados termicamente devido à temperatura de nitretação. Foi considerado um coeficiente de expansão linear do aço de  $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Pode ser observado que todos os diâmetros estavam maiores durante a nitretação (dilatados termicamente) se comparados com os diâmetros após a nitretação. Isto reforça que durante a nitretação os corpos de prova dilatados receberam material em sua superfície o que impediu o retorno a sua dimensão inicial após o resfriamento.

O aumento devido à dilatação térmica dos corpos de prova durante a nitretação foi em média 0,338mm no diâmetro externo e em média 0,302mm no diâmetro interno.

Tabela 8 - Dilatação térmica durante a nitretação

| Modelo | Nominal               |                       | Tratamento |                                  | Dilatado termicamente |                       |
|--------|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
|        | Diâmetro Externo (mm) | Diâmetro Interno (mm) | Nitretação | Temperatura ( $^\circ\text{C}$ ) | Diâmetro Externo (mm) | Diâmetro Interno (mm) |
| A      | 120                   | 112                   | Plasma     | 500                              | 120,345               | 112,322               |
|        |                       |                       | Gás        | 520                              | 120,359               | 112,335               |
| B      | 120                   | 104                   | Plasma     | 500                              | 120,345               | 104,299               |
|        |                       |                       | Gás        | 520                              | 120,359               | 104,312               |
| C      | 110                   | 102                   | Plasma     | 500                              | 110,31                | 102,293               |
|        |                       |                       | Gás        | 520                              | 110,330               | 102,306               |
| D      | 110                   | 94                    | Plasma     | 500                              | 110,316               | 94,270                |
|        |                       |                       | Gás        | 520                              | 110,330               | 94,282                |

Fonte: O autor.

## CONCLUSÃO

O presente estudo proporcionou a compreensão de muitos conceitos acerca da nitretação como seus mecanismos de endurecimento, estrutura da camada nitretada e suas variações dimensionais.

Através da realização de ensaios experimentais e de uma avaliação sistemática e apurada das variações dimensionais dos corpos de prova, chegou-se às seguintes considerações:

(a) A camada branca criada pela nitretação a gás de simples estágio é maior que a camada branca formada pela nitretação a plasma nas condições em que foram feitos os experimentos.

(b) O incremento dimensional nos diâmetros de peças em formato de anel depende da espessura da parede, ocorrendo um maior incremento dimensional nas paredes mais finas.

(c) O tamanho do diâmetro influencia no incremento dimensional dos diâmetros de peças em forma de anel, sendo que, quanto maior o diâmetro, maior o aumento, tanto do diâmetro externo quanto interno considerando uma mesma espessura de parede para ambos os diâmetros analisados.

(d) A camada branca contribui para o aumento dimensional no diâmetro externo, mas causa uma redução dimensional no diâmetro interno, pois a camada branca cresce a partir da superfície do metal.

(e) O aumento da largura na nitretação a gás é maior do que na nitretação a plasma, principalmente devido a maior camada branca formada na nitretação a gás de simples estágio.

(f) O alívio de tensões ajudou no controle dimensional, havendo pouco desvio de circularidade tanto nas medições antes da nitretação como nas após a nitretação.

(g) Com a camada efetiva sendo similar tanto no processo de nitretação a gás quanto no a plasma, todo o perfil de dureza se mostrou semelhante até a profundidade com dureza de núcleo.

(h) A nitretação a gás foi mais rápida e obteve uma camada efetiva um pouco superior do que a nitretação a plasma.

As principais causas das variações dimensionais ocorridas durante a nitretação dos corpos de prova do presente trabalho foram:

- O crescimento devido às tensões induzidas pelo aumento de volume na camada nitretada, causando um alongamento no núcleo. Gerando assim tensões compressivas na camada nitretada e tensões de tração no núcleo.

- O crescimento devido à camada branca criada, principalmente no processo de nitretação a gás.

Com base nos resultados obtidos, podem ser abordados os seguintes trabalhos futuros:

(a) Analisar a variação dimensional com mais de duas espessuras de paredes para levantar uma curva de comportamento, comparando as curvas formadas pela nitretação a gás e a plasma a fim de determinar a influência da espessura em cada processo.

(b) Analisar a influência do método de resfriamento na variação dimensional.

(c) Verificar a influência dos nitretos formados na variação dimensional.

(d) Gerar a equação do comportamento em função da espessura de parede ao ser analisadas diversas espessuras.

## REFERÊNCIAS

- BASU, A. et al. **Corrosion resistance improvement of high carbon low alloy steel by plasma nitriding**. Materials Letters. Vol. 62, ed. 17–18, 30 jun. 2008, p. 3117–3120
- CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo: ABM, 2003. 272 p.
- DAVIS, J. R. **Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics**. ASM – American Society for Metals, 2003. 364 p.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1988. 653 p.
- HERRING, Dan. Princípios do processo de nitretação a gás - Parte II. **Industrial Heating**. 30 out. 2012. Disponível em <http://www.revistaih.com.br/artigo/principios-do-processo-de-nitretacao-a-gas-parte-ii/?conteudo=1> >. Acesso em: 14 abr. 2013.
- KNERR, C. H.; ROSE, T. C.; FILKOWSKI, J. H. Gas nitriding – In: **ASM Handbook Vol 4. Heat Treating**. USA ASM International. 6ª ed, 2004. p. 387-409.
- KRAUSS, G., **STEELS: Processing, Structure, and Performance**. ASM – American Society for Metals, 2005. 559 p.
- LAMPMAN, S. Introduction to Surface Hardening of Steels– In: **ASM Handbook Vol 4. Heat Treating**. USA ASM International. 6ª ed, 2004. p.259-267.
- MARTINS, Sandro Tomaz. **Comunicação privada**. UCS, 2013.
- OLIVEIRA JR. Reinaldo Borges de. **Avaliação do Efeito de Modificações Superficiais a Plasma no Desempenho do Aço AISI 316 Frente ao Desgaste e Corrosão**. 2011. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-93CHDX>>. Acesso em: 24 mar. 2013.
- PINEDO, Carlos Eduardo. Nitretação sob plasma - Fundamentos e aplicações - Parte I. **Industrial Heating**. 15 jan. 2013. Disponível em: < <http://www.revistaih.com.br/artigo/nitretacao-sob-plasma-fundamentos-e-aplicacoes-parte-i/?conteudo=1> >. Acesso em: 19 mar. 2013.
- PYE, David. **Practical NITRIDING and Ferritic Nitrocarburizing**. ASM – American Society for Metals, 2003. 257 p.
- PYE, David. Nitriding Techniques, Ferritic Nitrocarburizing, and Austenitic Nitrocarburizing Techniques and Methods. In: **Steel Heat Treatment - Metallurgy and Technologies**. Boca Raton: CRC - Taylor e Francis Group, 2006. p. 487-550.

RAMOS, Fabiano Dorneles. **A Influência das Tensões Sobre a Difusão de Nitrogênio no Processo de Nitretação a Plasma**. 2003 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Apud PESSIN M. A. **Caracterização de Camadas Nitretadas a Plasma Com Uso de Uma Fonte de Potencia Pulsada**. 1999. Dissertação (Mestre em engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1999

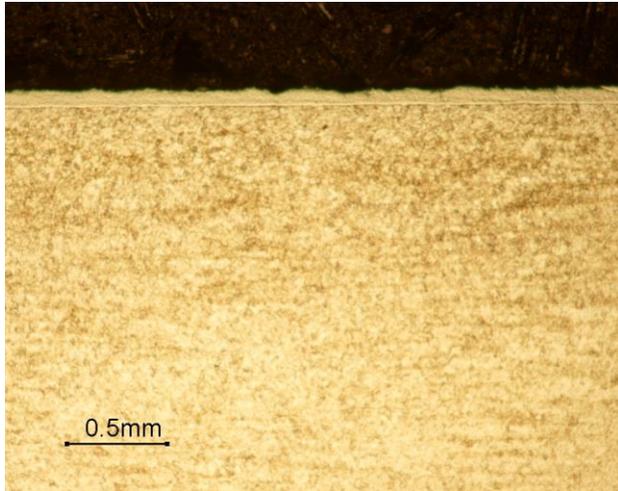
RANALLI, G. A. et al. Efeitos da nitretação por plasma com pós-oxidação e por banho de sal na resistência à corrosão de um aço ferramenta. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, Ago. 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762009000200005&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762009000200005&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 16 jun. 2013.

REIS, R. F. dos; NEIDERT, R.. Influência da limpeza prévia por sputtering na nitretação por plasma de aços inoxidáveis. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762011000200004&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762011000200004&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 16 jun. 2013.

SIRIN, Sule Yildiz et al. **Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel**. Materials Characterization. Vol. 59, Edição 4, abr. 2008, p. 351–358.

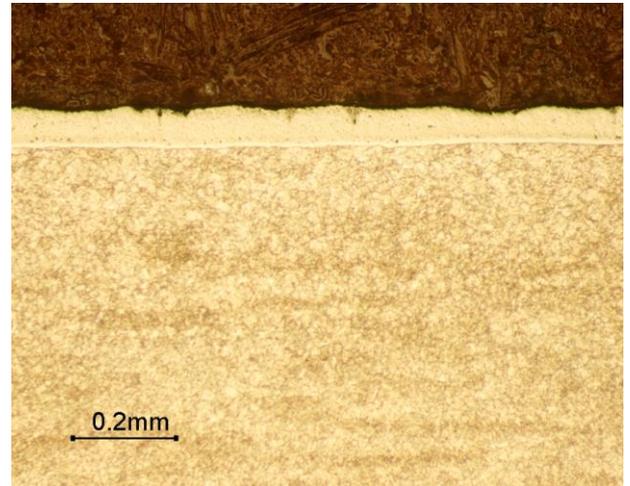
SKONIESKI, Adão Felipe Oliveira. **INFLUÊNCIA DA MISTURA GASOSA NOS PROCESSO D NITRETAÇÃO E NITROCARBONETAÇÃO A PLASMA DO AÇO AISI 4140**. 2008. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Apud WOLFART JR. **Nitretação Iônica de Aço Ferramenta para Trabalho a Frio – ABNT D6**, Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, 1996, p. 1-68.

TIER, M. D. **Avaliação da Resistência ao Desgaste do Aço AISI M2 Nitretado a Plasma**. 1988. 138 f. Tese de Doutorado, Porto Alegre, 1998, p. 138. (SKONIESKI, 2008)

**APÊNDICE A – METALOGRAFIA NITRETAÇÃO A PLASMA 1º LOTE**

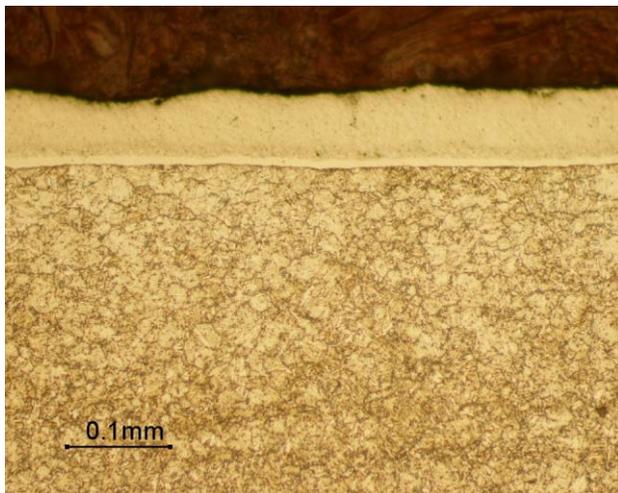
Local: Superfície  
Ampliação: 50x

Ataque: Nital 2%



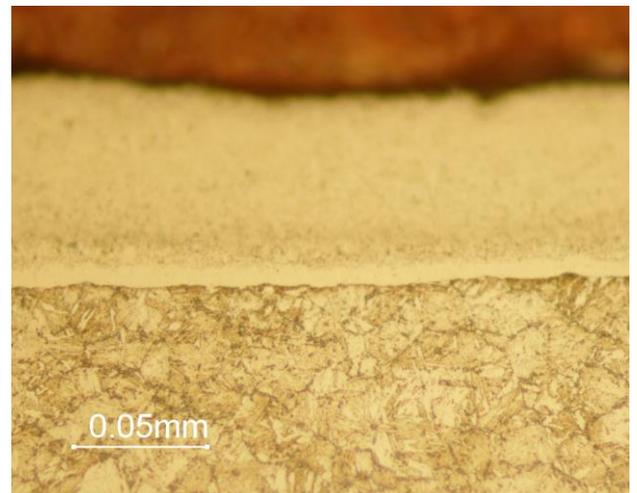
Local: Superfície  
Ampliação: 100x

Ataque: Nital 2%



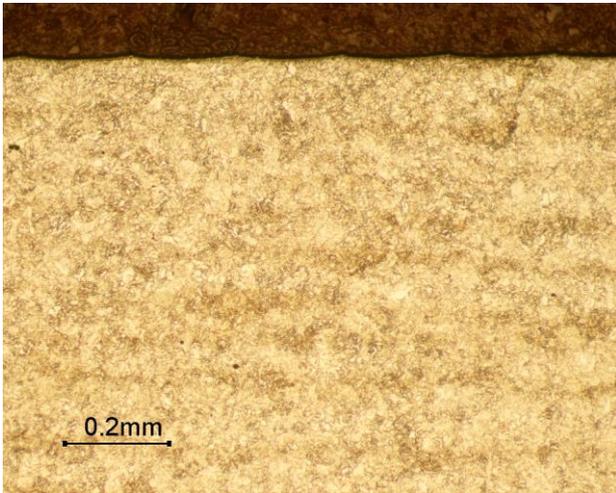
Local: Superfície  
Ampliação: 200x

Ataque: Nital 2%



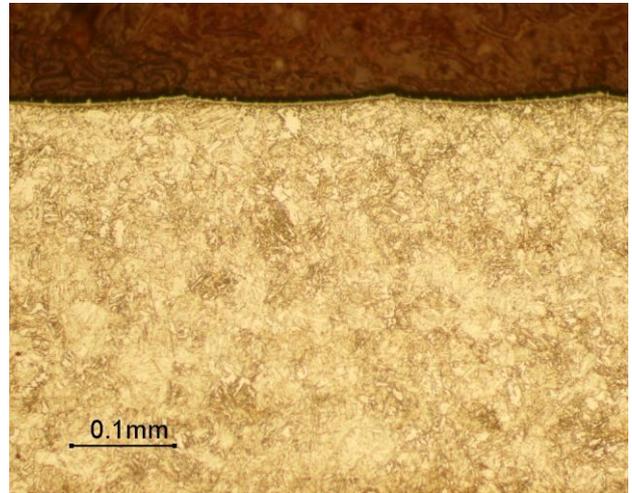
Local: Superfície  
Ampliação: 500x

Ataque: Nital 2%

**APÊNDICE B – METALOGRAFIA NITRETAÇÃO A GÁS 1° LOTE**

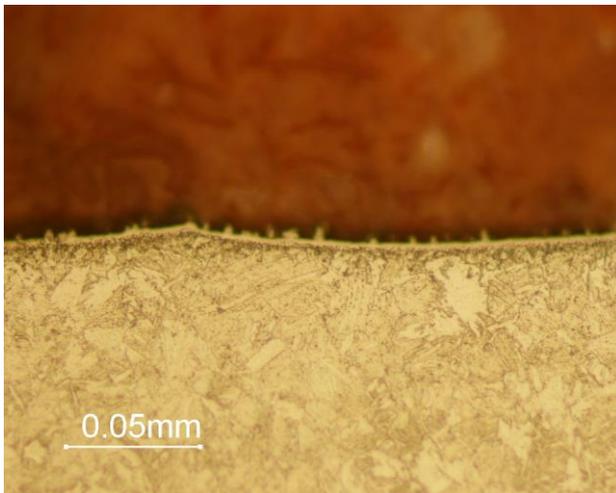
Local: Superfície  
Ampliação: 100x

Ataque: Nital 2%



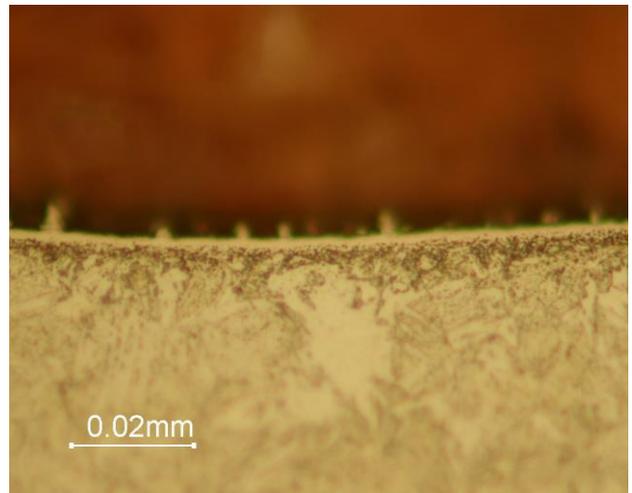
Local: Superfície  
Ampliação: 200x

Ataque: Nital 2%



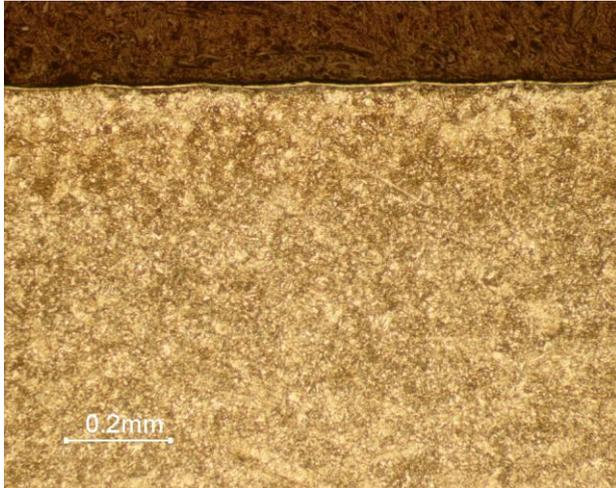
Local: Superfície  
Ampliação: 500x

Ataque: Nital 2%



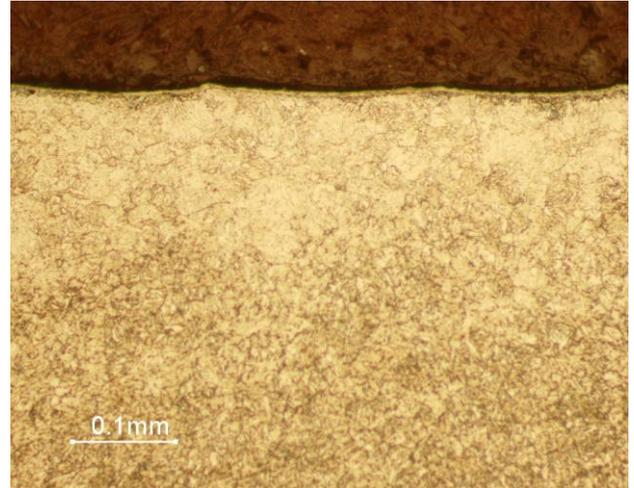
Local: Superfície  
Ampliação: 1000x

Ataque: Nital 2%

**APÊNDICE C – METALOGRAFIAS NITRATAÇÃO A PLASMA 2º LOTE**

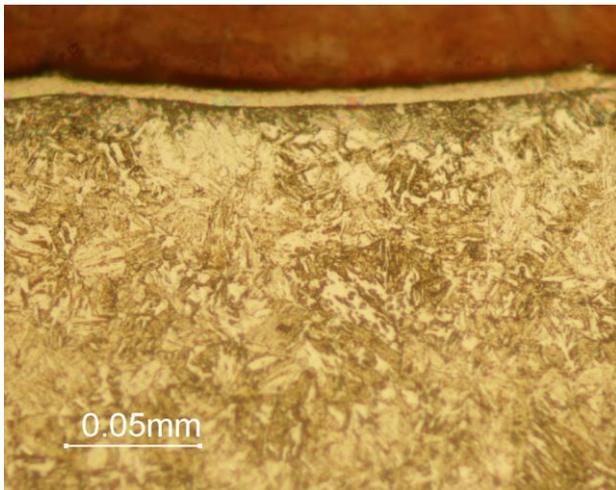
Local: Superfície  
Ampliação: 100x

Ataque: Nital 2%



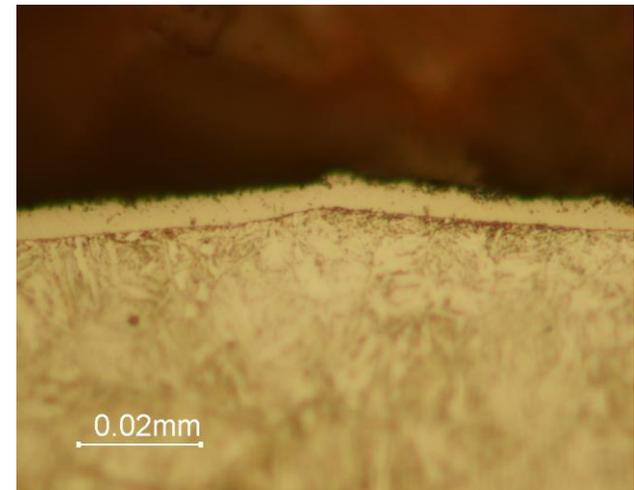
Local: Superfície  
Ampliação: 200x

Ataque: Nital 2%



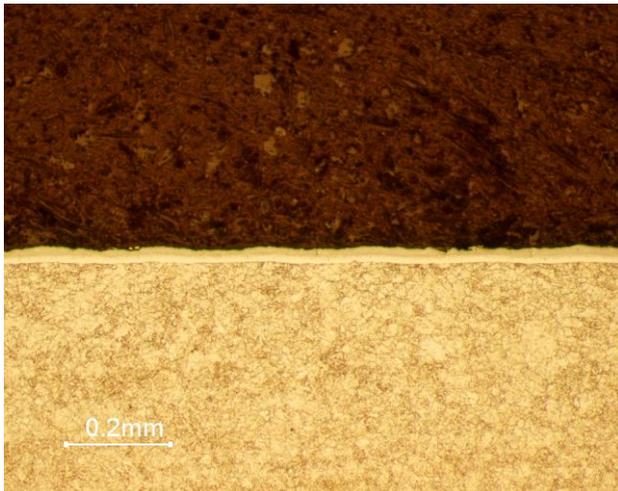
Local: Superfície  
Ampliação: 500x

Ataque: Nital 2%



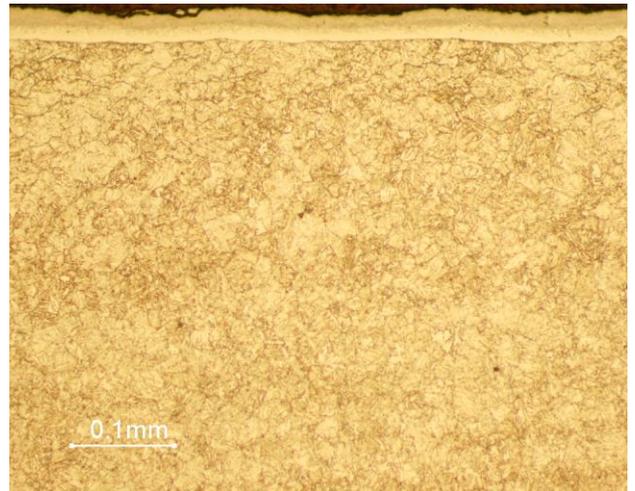
Local: Superfície  
Ampliação: 1000x

Ataque: Nital 2%

**APÊNDICE D – METALOGRAFIAS NITRATAÇÃO A GÁS 2º LOTE**

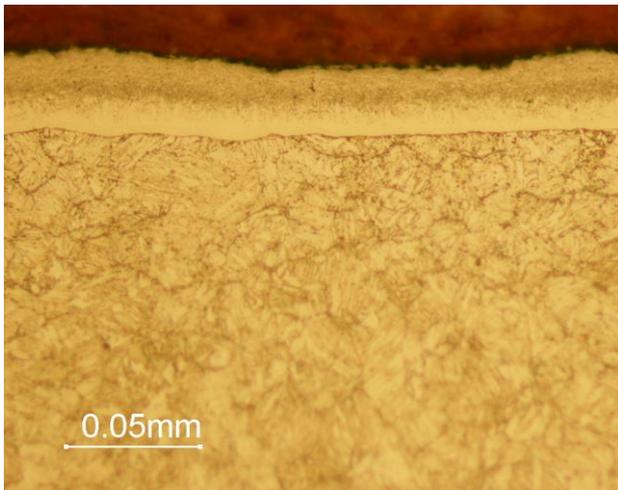
Local: Superfície  
Ampliação: 100x

Ataque: Nital 2%



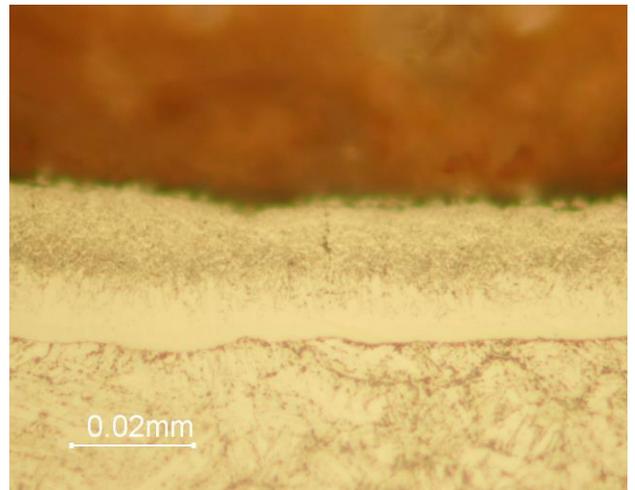
Local: Superfície  
Ampliação: 200x

Ataque: Nital 2%



Local: Superfície  
Ampliação: 500x

Ataque: Nital 2%



Local: Superfície  
Ampliação: 1000x

Ataque: Nital 2%



**APÊNDICE F – DIMENSÕES DOS DIÂMETROS PRÉ NITRETAÇÃO**

| <b>Modelo</b> | <b>Nitretação</b> | <b>Rastreabilidade</b> | <b>Diâmetro Externo</b> | <b>Circularidade Diâmetro Externo</b> | <b>Diâmetro Interno</b> | <b>Circularidade Diâmetro Interno</b> | <b>Parede</b> |
|---------------|-------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------|
| <b>A</b>      | <b>Plasma</b>     | <b>1</b>               | 120,006                 | 0,027                                 | 112,014                 | 0,029                                 | 3,996         |
|               |                   | <b>2</b>               | 119,975                 | 0,026                                 | 111,988                 | 0,018                                 | 3,993         |
|               | <b>Gás</b>        | <b>3</b>               | 119,995                 | 0,017                                 | 112,003                 | 0,024                                 | 3,996         |
|               |                   | <b>4</b>               | 119,990                 | 0,026                                 | 111,994                 | 0,023                                 | 3,998         |
| <b>B</b>      | <b>Plasma</b>     | <b>5</b>               | 119,993                 | 0,011                                 | 103,981                 | 0,013                                 | 8,006         |
|               |                   | <b>6</b>               | 119,999                 | 0,014                                 | 103,983                 | 0,034                                 | 8,008         |
|               | <b>Gás</b>        | <b>7</b>               | 119,994                 | 0,013                                 | 103,981                 | 0,013                                 | 8,007         |
|               |                   | <b>8</b>               | 119,980                 | 0,025                                 | 104,008                 | 0,028                                 | 7,986         |
| <b>C</b>      | <b>Plasma</b>     | <b>9</b>               | 110,019                 | 0,013                                 | 101,981                 | 0,019                                 | 4,019         |
|               |                   | <b>10</b>              | 110,011                 | 0,008                                 | 101,968                 | 0,011                                 | 4,022         |
|               | <b>Gás</b>        | <b>11</b>              | 110,026                 | 0,007                                 | 101,968                 | 0,007                                 | 4,029         |
|               |                   | <b>12</b>              | 110,007                 | 0,008                                 | 101,978                 | 0,008                                 | 4,014         |
| <b>D</b>      | <b>Plasma</b>     | <b>13</b>              | 110,010                 | 0,007                                 | 93,973                  | 0,008                                 | 8,018         |
|               |                   | <b>14</b>              | 110,002                 | 0,005                                 | 93,973                  | 0,006                                 | 8,015         |
|               | <b>Gás</b>        | <b>15</b>              | 110,016                 | 0,005                                 | 94,002                  | 0,007                                 | 8,007         |
|               |                   | <b>16</b>              | 110,022                 | 0,006                                 | 94,000                  | 0,054                                 | 8,011         |

Fonte: O autor.

**APÊNDICE G – DIMENSÕES DOS DIÂMETROS PÓS NITRETAÇÃO**

| <b>Modelo</b> | <b>Nitretação</b> | <b>Rastreabilidade</b> | <b>Diâmetro Externo</b> | <b>Circularidade Diâmetro Externo</b> | <b>Diâmetro Interno</b> | <b>Circularidade Diâmetro Interno</b> | <b>Parede</b> |
|---------------|-------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------|
| <b>A</b>      | <b>Plasma</b>     | <b>1</b>               | 120,137                 | 0,044                                 | 112,132                 | 0,050                                 | 4,003         |
|               |                   | <b>2</b>               | 120,105                 | 0,042                                 | 112,105                 | 0,037                                 | 4,000         |
|               | <b>Gás</b>        | <b>3</b>               | 120,124                 | 0,046                                 | 112,078                 | 0,043                                 | 4,023         |
|               |                   | <b>4</b>               | 120,133                 | 0,030                                 | 112,086                 | 0,030                                 | 4,024         |
| <b>B</b>      | <b>Plasma</b>     | <b>5</b>               | 120,082                 | 0,031                                 | 104,055                 | 0,031                                 | 8,014         |
|               |                   | <b>6</b>               | 120,093                 | 0,036                                 | 104,063                 | 0,034                                 | 8,015         |
|               | <b>Gás</b>        | <b>7</b>               | 120,080                 | 0,032                                 | 104,015                 | 0,030                                 | 8,033         |
|               |                   | <b>8</b>               | 120,066                 | 0,037                                 | 104,041                 | 0,040                                 | 8,013         |
| <b>C</b>      | <b>Plasma</b>     | <b>9</b>               | 110,139                 | 0,026                                 | 102,083                 | 0,031                                 | 4,028         |
|               |                   | <b>10</b>              | 110,118                 | 0,017                                 | 102,055                 | 0,021                                 | 4,032         |
|               | <b>Gás</b>        | <b>11</b>              | 110,150                 | 0,016                                 | 102,042                 | 0,017                                 | 4,054         |
|               |                   | <b>12</b>              | 110,132                 | 0,012                                 | 102,052                 | 0,013                                 | 4,040         |
| <b>D</b>      | <b>Plasma</b>     | <b>13</b>              | 110,093                 | 0,013                                 | 94,037                  | 0,009                                 | 8,028         |
|               |                   | <b>14</b>              | 110,087                 | 0,014                                 | 94,038                  | 0,013                                 | 8,024         |
|               | <b>Gás</b>        | <b>15</b>              | 110,095                 | 0,012                                 | 94,026                  | 0,013                                 | 8,034         |
|               |                   | <b>16</b>              | 110,100                 | 0,011                                 | 94,027                  | 0,013                                 | 8,037         |

Fonte: O autor.

**APÊNDICE H – DIMENSÕES DA LARGURA PRÉ NITRETAÇÃO**

| Modelo | Nitreção | Rastreabilidade | Largura 1 (mm) | Largura 2 (mm) | Largura 3 (mm) | Largura 4 (mm) | Largura 5 (mm) | Largura Média (mm) | Desvio Padrão Da Largura |
|--------|----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------------|
| A      | Plasma   | 1               | 20,265         | 20,175         | 20,140         | 20,250         | 20,300         | 20,250             | 0,066                    |
|        |          | 2               | 20,295         | 20,290         | 20,290         | 20,300         | 20,300         | 20,295             | 0,005                    |
|        | Gás      | 3               | 20,290         | 20,290         | 20,300         | 20,290         | 20,290         | 20,290             | 0,004                    |
|        |          | 4               | 20,280         | 20,280         | 20,285         | 20,290         | 20,300         | 20,285             | 0,008                    |
| B      | Plasma   | 5               | 20,280         | 20,280         | 20,280         | 20,275         | 20,280         | 20,280             | 0,002                    |
|        |          | 6               | 20,285         | 20,280         | 20,280         | 20,280         | 20,280         | 20,280             | 0,002                    |
|        | Gás      | 7               | 20,280         | 20,290         | 20,280         | 20,265         | 20,270         | 20,270             | 0,010                    |
|        |          | 8               | 20,287         | 20,275         | 20,275         | 20,270         | 20,200         | 20,275             | 0,035                    |
| C      | Plasma   | 9               | 20,100         | 20,120         | 20,160         | 20,160         | 20,130         | 20,130             | 0,026                    |
|        |          | 10              | 20,285         | 20,275         | 20,270         | 20,270         | 20,290         | 20,275             | 0,009                    |
|        | Gás      | 11              | 20,280         | 20,280         | 20,275         | 20,275         | 20,280         | 20,280             | 0,003                    |
|        |          | 12              | 20,280         | 20,280         | 20,280         | 20,280         | 20,280         | 20,280             | 0,000                    |
| D      | Plasma   | 13              | 20,270         | 20,270         | 20,270         | 20,275         | 20,270         | 20,270             | 0,002                    |
|        |          | 14              | 20,270         | 20,270         | 20,265         | 20,265         | 20,270         | 20,270             | 0,003                    |
|        | Gás      | 15              | 20,290         | 20,280         | 20,290         | 20,285         | 20,290         | 20,290             | 0,004                    |
|        |          | 16              | 20,270         | 20,270         | 20,270         | 20,270         | 20,270         | 20,270             | 0,000                    |

Fonte: O autor.

**APÊNDICE I – DIMENSÕES DA LARGURA PÓS NITRETAÇÃO**

| Modelo | Nitreção | Rastreabilidade | Largura 1 (mm) | Largura 2 (mm) | Largura 3 (mm) | Largura 4 (mm) | Largura 5 (mm) | Largura Média (mm) | Desvio Padrão Da Largura |
|--------|----------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------------|
| A      | Plasma   | 1               | 20,290         | 20,240         | 20,270         | 20,250         | 20,345         | 20,270             | 0,042                    |
|        |          | 2               | 20,320         | 20,310         | 20,310         | 20,300         | 20,320         | 20,310             | 0,008                    |
|        | Gás      | 3               | 20,330         | 20,330         | 20,340         | 20,340         | 20,330         | 20,330             | 0,005                    |
|        |          | 4               | 20,325         | 20,320         | 20,340         | 20,350         | 20,340         | 20,340             | 0,012                    |
| B      | Plasma   | 5               | 20,290         | 20,290         | 20,290         | 20,300         | 20,300         | 20,290             | 0,005                    |
|        |          | 6               | 20,300         | 20,300         | 20,295         | 20,295         | 20,305         | 20,300             | 0,004                    |
|        | Gás      | 7               | 20,320         | 20,325         | 20,320         | 20,310         | 20,310         | 20,310             | 0,007                    |
|        |          | 8               | 20,320         | 20,315         | 20,315         | 20,310         | 20,315         | 20,315             | 0,004                    |
| C      | Plasma   | 9               | 20,130         | 20,140         | 20,140         | 20,140         | 20,150         | 20,140             | 0,007                    |
|        |          | 10              | 20,295         | 20,300         | 20,290         | 20,290         | 20,310         | 20,295             | 0,008                    |
|        | Gás      | 11              | 20,325         | 20,325         | 20,325         | 20,325         | 20,325         | 20,325             | 0,000                    |
|        |          | 12              | 20,325         | 20,330         | 20,330         | 20,350         | 20,325         | 20,330             | 0,010                    |
| D      | Plasma   | 13              | 20,290         | 20,285         | 20,295         | 20,290         | 20,295         | 20,290             | 0,004                    |
|        |          | 14              | 20,285         | 20,280         | 20,290         | 20,285         | 20,285         | 20,285             | 0,004                    |
|        | Gás      | 15              | 20,325         | 20,325         | 20,325         | 20,320         | 20,325         | 20,325             | 0,002                    |
|        |          | 16              | 20,305         | 20,310         | 20,310         | 20,310         | 20,310         | 20,310             | 0,002                    |

Fonte: O autor.

**ANEXO A – CERTIFICADO QUALIDADE NITRETAÇÃO A GÁS “A”****CERTIFICADO DE QUALIDADE**

|                                     |                          |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Número do Certificado:352181        | Data:22/10/2013          |
| NF de Entrada:18075                 | Nome da Peça:CP MODELO A |
| NF de Saída:111824                  | Material:0               |
| Nº OS: 516689                       | Quantidade:2,00 PC       |
| Cliente:WEATHERFORD IND. COM. LTDA. |                          |

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| <b>Especificações</b>                           |                                   |
| Tratamento Térmico: <b>NITRETAÇÃO GAS CURTA</b> |                                   |
| Dureza Solicitada: <b>58/65 HRC</b>             | Dureza Verificada: <b>59 HRC</b>  |
| Camada Solicitada: <b>0,18/0,3MM</b>            | Camada Verificada: <b>0,23 MM</b> |

|   |
|---|
| <b>Observações</b>  |
| Referência da Peça:5090005176<br>Tamanho do Grão:<br>OP: 56829<br>TRATAMENTO CFE WH 425 |

Fonte: Certificado de qualidade da Metaltécnica.

**ANEXO B – CERTIFICADO QUALIDADE NITRETAÇÃO A GÁS “B”****CERTIFICADO DE QUALIDADE**Número do Certificado: **352182**Data: **22/10/2013**NF de Entrada: **18075**Nome da Peça: **CP MODELO B**NF de Saída: **111824**Material: **0**Nº OS: **516690**Quantidade: **2,00 PC**Cliente: **WEATHERFORD IND. COM. LTDA.****Especificações**Tratamento Térmico: **NITRETAÇÃO GAS CURTA**Dureza Solicitada: **58/65 HRC**Dureza Verificada: **59 HRC**Camada Solicitada: **0,18/0,3MM**Camada Verificada: **0,23 MM****Observações**Referência da Peça: **5090005179**

Tamanho do Grão:

*OP: 56828**TRATAMENTO CFE NORMA WH 425.*

**ANEXO C – CERTIFICADO QUALIDADE NITRETAÇÃO A GÁS “C”****CERTIFICADO DE QUALIDADE**

Número do Certificado:352183

Data:22/10/2013

NF de Entrada:18075

Nome da Peça:CO MODELO C

NF de Saída:111824

Material:0

Nº OS: 516691

Quantidade:2,00 PC

Cliente:WEATHERFORD IND. COM. LTDA.

**Especificações**

Tratamento Térmico: NITRETAÇÃO GAS CURTA

Dureza Solicitada: 58/65 HRC

Dureza Verificada: 59 HRC

Camada Solicitada: 0,18/0,3MM

Camada Verificada: 0,23 MM

**Observações**

Referência da Peça:5090005182

Tamanho do Grão:

OP: 56827

TRATAMENTO CFE NORMA WH 425.

**ANEXO D – CERTIFICADO QUALIDADE NITRETAÇÃO A GÁS “D”****CERTIFICADO DE QUALIDADE**

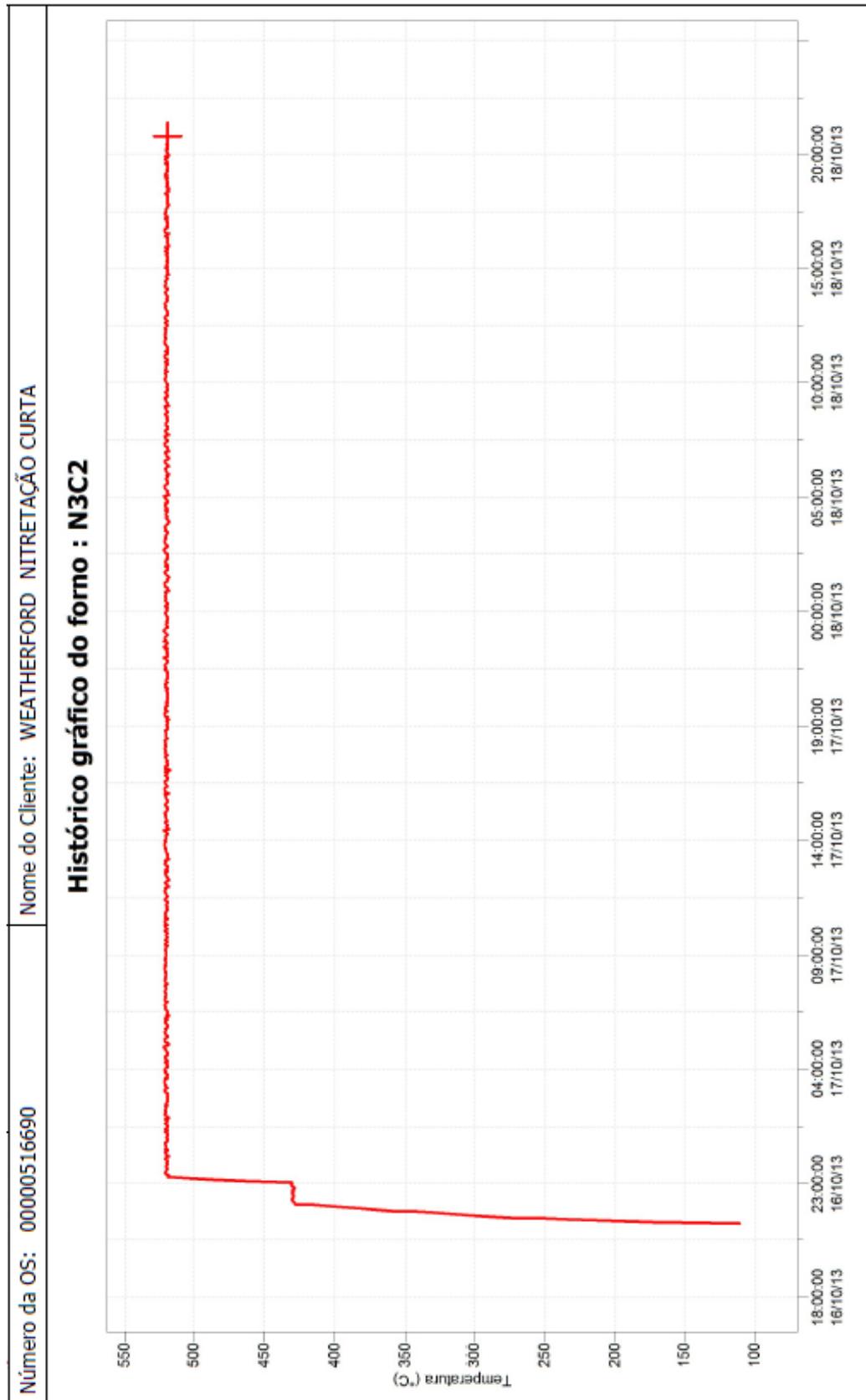
|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Número do Certificado: <b>352184</b>        | Data: <b>22/10/2013</b>          |
| NF de Entrada: <b>18075</b>                 | Nome da Peça: <b>CP MODELO D</b> |
| NF de Saída: <b>111824</b>                  | Material: <b>0</b>               |
| Nº OS: <b>516692</b>                        | Quantidade: <b>2,00 PC</b>       |
| Cliente: <b>WEATHERFORD IND. COM. LTDA.</b> |                                  |

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| <b>Especificações</b>                           |                                   |
| Tratamento Térmico: <b>NITRETAÇÃO GAS CURTA</b> |                                   |
| Dureza Solicitada: <b>58/65 HRC</b>             | Dureza Verificada: <b>59 HRC</b>  |
| Camada Solicitada: <b>0,18/0,30MM</b>           | Camada Verificada: <b>0,23 MM</b> |

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>Observações</b>                    |  |
| Referência da Peça: <b>5090005185</b> |  |
| Tamanho do Grão:                      |  |
| OP: <b>56826</b>                      |  |
| TRATAMENTO CFE NORMA WH 425           |  |

Fonte: Certificado de qualidade da Metaltécnica.

## ANEXO E – NITRETAÇÃO A GÁS - HISTÓRICO GRÁFICO DO FORNO



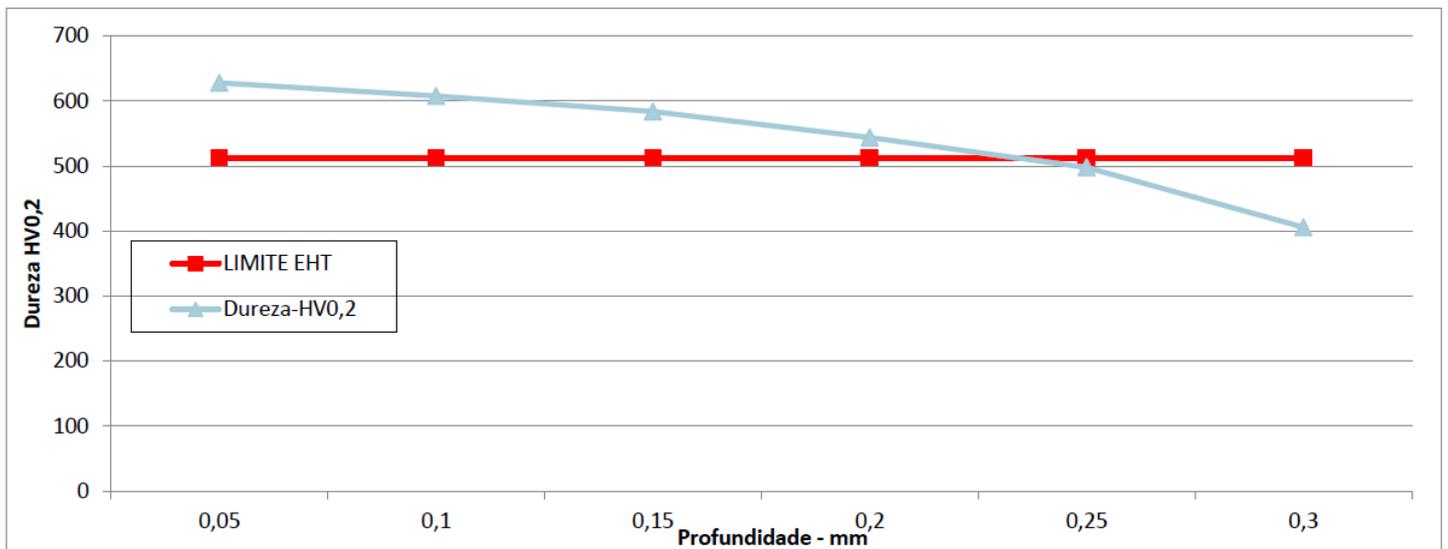
Fonte: Certificado de qualidade da Metaltécnica.

## ANEXO F – NITRETAÇÃO A GÁS – PERFIL DE DUREZA

### CURVA DE DUREZA - NITRETAÇÃO (Weatherford)

| Profundidade - mm | LIMITE EHT | Dureza-HV0,2 |
|-------------------|------------|--------------|
| 0,05              | 513        | 628          |
| 0,1               | 513        | 608          |
| 0,15              | 513        | 584          |
| 0,2               | 513        | 544          |
| 0,25              | 513        | 498          |
| 0,3               | 513        | 406          |

Dureza de núcleo: 243 HV  
Camada branca: 0,030 mm



Fonte: Certificado de qualidade da Metaltécnica.

## ANEXO G – RELATÓRIO DA NITRETAÇÃO A PLASMA

## RELATÓRIO DE ANÁLISE DE MATERIAL

|  |   |  |
|--|---|--|
| <b>Empresa/Cliente</b><br>Weatherford<br>Industria e Comercio LTDA | <b>Solicitante/Contato</b><br>Francis Dalmás          | <b>Nº OP (Nitrion):</b><br>11452       |
| <b>Data de entrada</b><br>04/10/2013                               | <b>Prazo de entrega:</b><br>16/10/2013                | <b>Protocolo de Carga</b><br>1020      |
| <b>Descrição da peça</b><br>Corpo de Prova                         | <b>Material</b><br>SAE 4130M (RIMP 08/13)             | <b>Quantidade peça analisada</b><br>01 |
| <b>Dureza Especificada</b><br>58-65 HRC (650-830 HV)               | <b>Camada Especificada</b><br>0,20 - 0,25 mm (50 HRC) |  |

## 1. Objetivo

Reportar os resultados obtidos através dos ensaios de Dureza Superficial (Vickers), Perfil de Microdureza (Vickers), seguindo especificações da norma do cliente (WH-425).

## 2. Gráfico do Tratamento

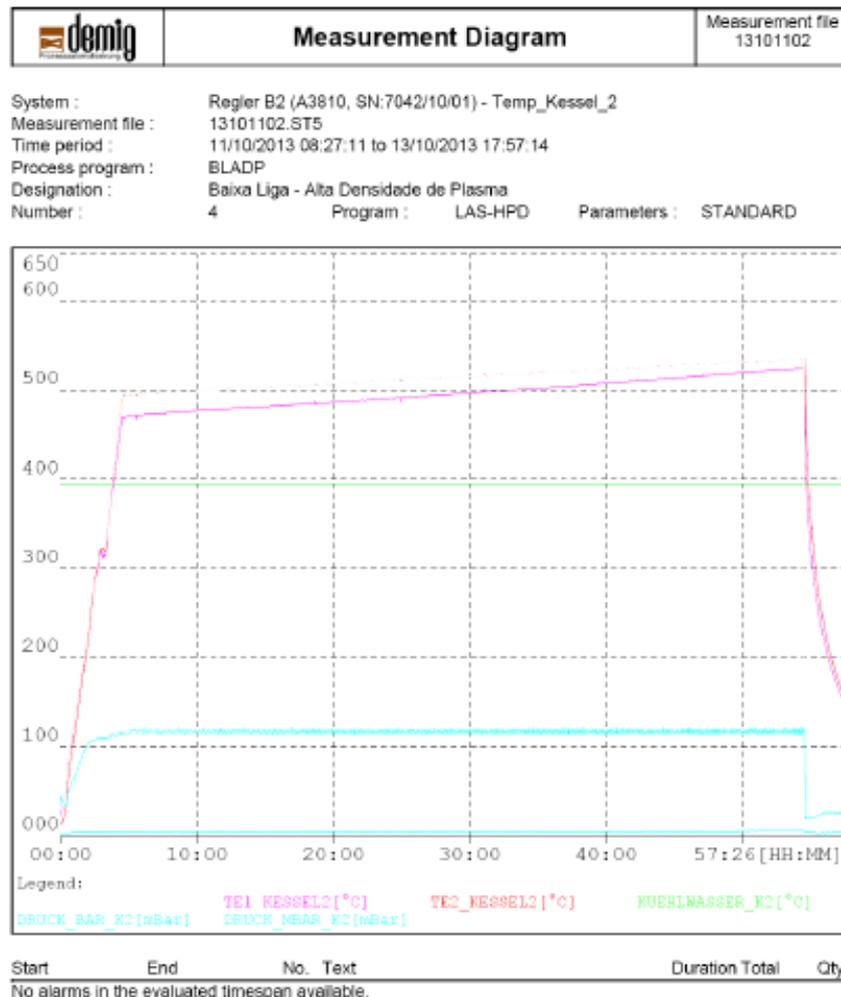


Figura 1: Gráfico Tratamento

### 3. Resultados

A espessura da camada niretada deve estar entre 58 – 65 HRC, as medições de dureza superficial foram realizadas em Vickers e convertidas para HRC conforme ASTM E140.

A espessura de Camada Nitretada deve ser de 0,18-0,30 mm, e definida pelo ponto onde a dureza é de 50 HRC (513 HV convertendo para Vickers).

**\*OBS:** Neste caso em específico o cliente solicitou camada entre 0,20 -0,25mm.

#### 3.1 Perfil de Dureza

| Profundidade de camada (mm) | Dureza Obtida (HV 0,3) |
|-----------------------------|------------------------|
| 0,00                        | -                      |
| 0,05                        | 598                    |
| 0,10                        | 561                    |
| 0,15                        | 546                    |
| 0,20                        | 511                    |
| 0,25                        | 454                    |
| 0,30                        | 385                    |
| 0,35                        | 348                    |
| 0,40                        | 331                    |
| 0,45                        | 323                    |
| 0,50                        | 315                    |
| 0,55                        | 315                    |
| 0,60                        | 287                    |
| 0,65                        | 287                    |
| 0,70                        | 275                    |
| 0,75                        | 275                    |

| Camada Efetiva (mm) |                       |
|---------------------|-----------------------|
| Especificada        | <b>0,20 - 0,25 mm</b> |
| Obtida              | <b>0,20</b>           |

| Dureza Superficial (HRC) |                      |
|--------------------------|----------------------|
| Especificada             | <b>58 - 65 (HRC)</b> |
| Obtida                   | <b>59 (HRC)</b>      |

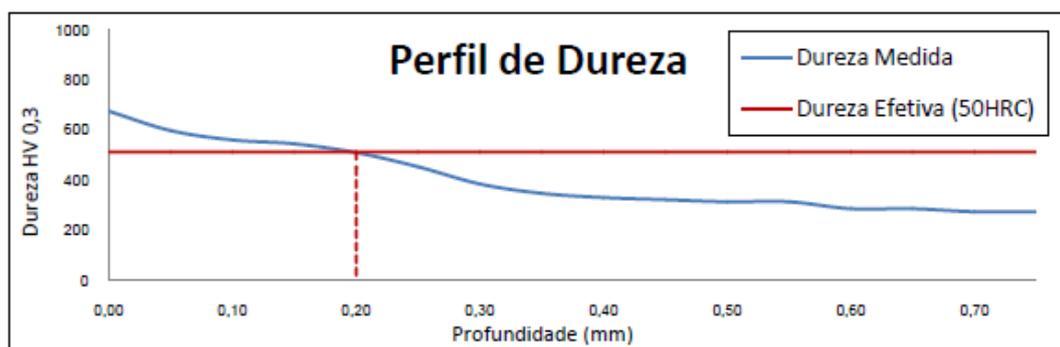


Figura 2: Perfil de dureza

### 4. Considerações finais

Conforme demonstrado nos resultados, as especificações do Cliente foram atendidas.

Os mesmo resultados também fazem referencia as seguintes OP's:

**OP 56826; OP 56827; OP 56828; e OP 56829 da corrida RIMP 082/13 (SAE 4130M).**

**ANEXO H – CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES “A”****CERTIFICADO DE QUALIDADE**

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Número do Certificado: <b>347660</b>        | Data: <b>22/08/2013</b>          |
| NF de Entrada: <b>17402</b>                 | Nome da Peça: <b>CP MODELO A</b> |
| NF de Saída: <b>107507</b>                  | Material: <b>SAE 4130M</b>       |
| Nº OS: <b>511175</b>                        | Quantidade: <b>1,00 PC</b>       |
| Cliente: <b>WEATHERFORD IND. COM. LTDA.</b> |                                  |

|  |                    |
|--|--------------------|
| <b>Especificações</b>                        |                    |
| Tratamento Térmico: <b>ALÍVIO DE TENSÕES</b> |                    |
| Dureza Solicitada: <b>0</b>                  | Dureza Verificada: |
| Camada Solicitada: <b>0</b>                  | Camada Verificada: |

|   |
|---|
| <b>Observações</b>  |
| Referência da Peça: <b>5090005176</b><br>Tamanho do Grão:<br><i>RIM: 082/13 - OP: 56826</i><br><i>INSPEÇÃO E LIBERAÇÃO DE ACORDO COM A NORMA WH 141</i> |

Fonte: Certificado de qualidade da Metaltécnica.

## ANEXO I – CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES “B”

### CERTIFICADO DE QUALIDADE

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Número do Certificado: <b>347659</b>        | Data: <b>22/08/2013</b>          |
| NF de Entrada: <b>17402</b>                 | Nome da Peça: <b>CP MODELO B</b> |
| NF de Saída: <b>107507</b>                  | Material: <b>SAE 4130M</b>       |
| Nº OS: <b>511177</b>                        | Quantidade: <b>1,00 PC</b>       |
| Cliente: <b>WEATHERFORD IND. COM. LTDA.</b> |                                  |

|  |                    |
|--|--------------------|
| <b>Especificações</b>                        |                    |
| Tratamento Térmico: <b>ALÍVIO DE TENSÕES</b> |                    |
| Dureza Solicitada: <b>0</b>                  | Dureza Verificada: |
| Camada Solicitada: <b>0</b>                  | Camada Verificada: |

|  |
|--|
| <b>Observações</b>   |
| <p style="text-align: center;">Referência da Peça: <b>5090005179</b></p> <p style="text-align: center;">Tamanho do Grão:</p> <p><i>RIM: 082/13 - OP: 56827</i></p> <p><i>INSPEÇÃO E LIBERAÇÃO DE ACORDO COM A NORMA WH-141</i></p> |

Fonte: Certificado de qualidade da Metaltécnica.

**ANEXO J – CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES “C”****CERTIFICADO DE QUALIDADE**Número do Certificado: **347658**Data: **22/08/2013**NF de Entrada: **17402**Nome da Peça: **CO MODELO C**NF de Saída: **107507**Material: **SAE 4130M**Nº OS: **511176**Quantidade: **1,00 PC**Cliente: **WEATHERFORD IND. COM. LTDA.****Especificações**Tratamento Térmico: **ALÍVIO DE TENSÕES**Dureza Solicitada: **0**

Dureza Verificada:

Camada Solicitada: **0**

Camada Verificada:

**Observações**Referência da Peça: **5090005182**

Tamanho do Grão:

*RIM: 082/13 - OP: 56828**INSPEÇÃO E LIBERAÇÃO DE ACORDO COM A NORMA WH-141*

**ANEXO L – CERTIFICADO DO ALÍVIO DE TENSÕES “D”****CERTIFICADO DE QUALIDADE**

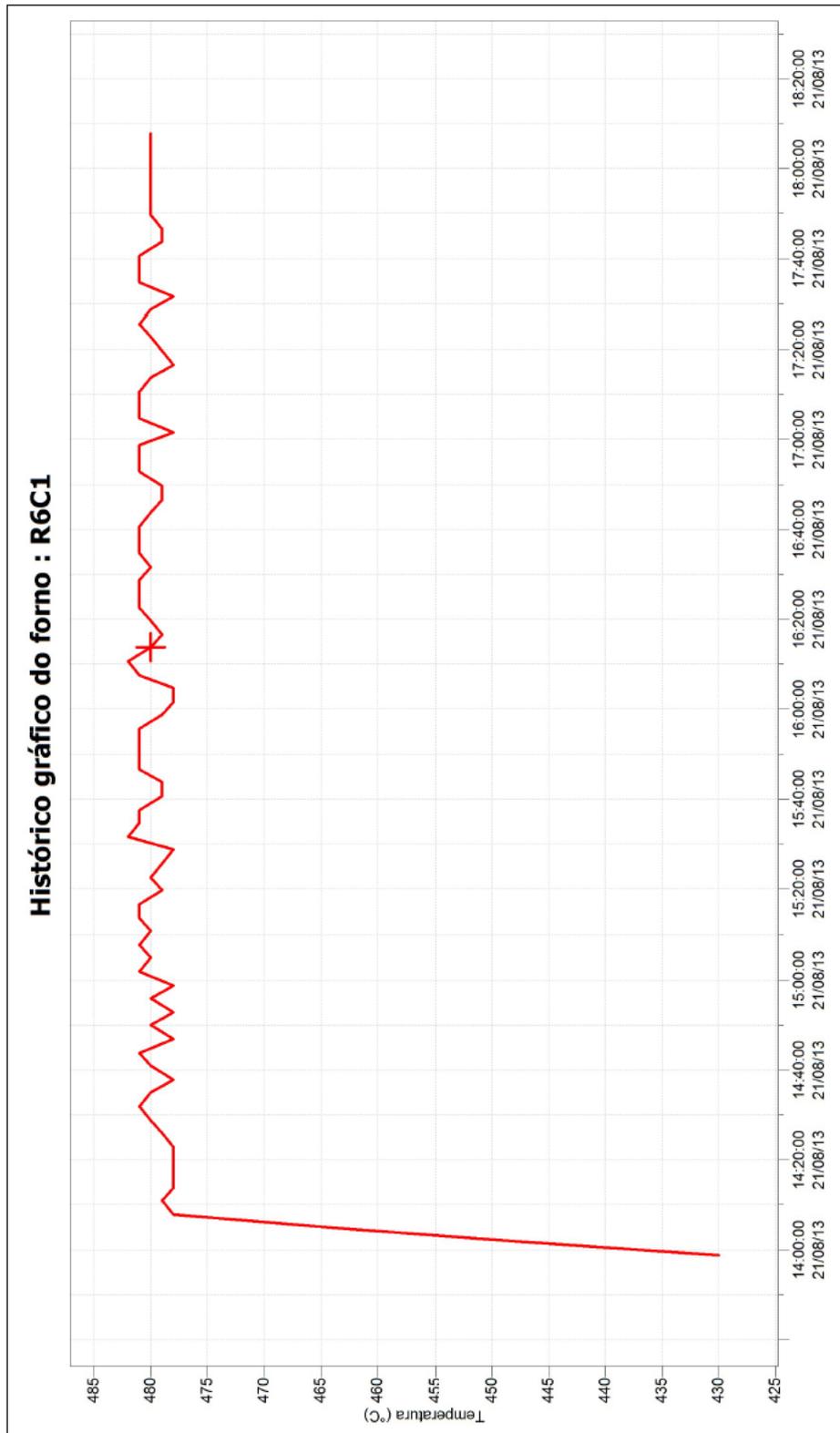
|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Número do Certificado: <b>347657</b>        | Data: <b>22/08/2013</b>          |
| NF de Entrada: <b>17402</b>                 | Nome da Peça: <b>CP MODELO D</b> |
| NF de Saída: <b>107506</b>                  | Material: <b>SAE 4130M</b>       |
| Nº OS: <b>511178</b>                        | Quantidade: <b>1,00 PC</b>       |
| Cliente: <b>WEATHERFORD IND. COM. LTDA.</b> |                                  |

|  |                    |
|--|--------------------|
| <b>Especificações</b>                        |                    |
| Tratamento Térmico: <b>ALÍVIO DE TENSÕES</b> |                    |
| Dureza Solicitada: <b>0</b>                  | Dureza Verificada: |
| Camada Solicitada: <b>0</b>                  | Camada Verificada: |

|   |
|---|
| <b>Observações</b>  |
| Referência da Peça: <b>5090005185</b><br>Tamanho do Grão:<br><i>RIM: 082/13 - OP: 56829</i><br><i>INSPEÇÃO E LIBERAÇÃO DE ACORDO COM A NORMA WH 141</i> |

Fonte: Certificado de qualidade da Metaltécnica.

## ANEXO M – ALÍVIO DE TENSÕES - HISTÓRICO GRÁFICO DO FORNO



Fonte: Certificado de qualidade da Metaltécnica.

ANEXO N – CERTIFICADO DO MATERIAL

**Certificado de Inspeção**  
(De acordo com DIN EN 10204.3.1)  
Folhas: 1 / 3

**Nº.: 0050574919 / A**



**VAM** VALLOUREC & HANNSMANN TUBES  
V & M do BRASIL S.A.  
USINA BARREIRO - Belo Horizonte - MG - Brasil  
CEP: 30161-970 - Caixa Postal: 1453

Cliente: WEATHERFORD INDUSTRIA E COMÉRCIO LTDA

País: Brasil  
Cod. Material: 389072  
Pedido Usina: 328833 / 10  
Pedido Cliente: P12-141158

Num. Material Cliente (NCM): 1990000411

Inspeção: V & M do BRASIL S.A.

**Material: 1990000411** *IMP 082/13*  
**TUBO LAMINADO S/COSTURA**  
**5,000" X 2,756" 4130-45 WS410 S1S2S8S9**  
Cod: 8002440074130101 Us: 2096395  
End.: MFR-12 NE 86710 Item: 1 Esp. Téc.:  
Data: 18/03/2013 Cide: 205,08 MT  
Doc.: PC 141156 NF: 310769 11/03/2013  
Fornec.: 1668 V&M DO BRASIL SA  
Qualificação: 0  
Requisitante: 683 ESTEVAN DO BONATTO Setor: 300 DIRECT  
COST:  Em Inspeção  Aprovado  
Visto:

| Corrida | Amarrado     | Peças     | Comprimento(m) | Peso (kgf)   |
|---------|--------------|-----------|----------------|--------------|
| 120912  | 0012693274   | 5         | 51,54          | 3452         |
|         | 0012693276   | 5         | 51,67          | 3456         |
|         | 0012693277   | 5         | 56,12          | 3770         |
|         | 0012693278   | 4         | 45,75          | 3074         |
|         | <b>Total</b> | <b>19</b> | <b>205,08</b>  | <b>13752</b> |

PRODUTO: TUBO DE AÇO SEM COSTURA, LAMINADO Á QUENTE, PONTA LISA, TEMPER+ REVENIDO  
DIMENSÕES: 127,00 mm X 28,00 mm GRAU DO AÇO: SAE 4130M(WS410)  
ESPECIFICAÇÃO DE CLIENTE: WS-410, 10.08.2011  
PROTEÇÃO SUPERFICIAL: EXTERNA: SEM PROTECAO PROTEÇÃO DE PONTAS: S/ PROTECAO  
TOLERÂNCIAS: DIÂMETRO EXTERNO(CORPO TUBO): -1,000 mm / + 1,000 mm PAREDE: -2,240 mm / + 2,240 mm  
COMPRIMENTO: FAIXA 6000,00 mm - 12000,00 mm  
MARCAÇÃO DE NORMA: Estancilado no corpo do tubo: VMB SAE4130M(WS410) 127,00 X 28,00 NÚMERO DA CORRIDA

O PRODUTO FOI APROVADO NOS SEGUINTES TESTES/INSPEÇÕES: DIMENSIONAL # VISUAL # TESTE DE ULTRA-SOM : ULTRA-SOM CONFORME API, SR2 #

Composição Química (%) Processo: Forno básico a oxigênio, aço acalmado

|                    | C   | Mn    | P     | S     | Si    | Ni    | Cr    | Mo    | Cu    |
|--------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Análise de Corrida | Min | 0,230 | 0,400 |       |       |       | 0,800 | 0,150 |       |
|                    | Max | 0,320 | 1,000 | 0,025 | 0,020 | 0,350 | 0,250 | 1,200 | 0,750 |

| Corrida | Lote         | Controle |
|---------|--------------|----------|
| 120912  | 030002203417 | 0,29     |
|         |              | 0,91     |
|         |              | 0,010    |
|         |              | 0,001    |
|         |              | 0,22     |
|         |              | 0,02     |
|         |              | 0,86     |
|         |              | 0,16     |
|         |              | 0,010    |

**Ensaio de Tração**

| Direção do Corpo Prova: Longitudinal | Temperatura: Ambiente |                                | Medida L0: L0= 2" |          | Método LE: 0,65 % |       |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------|----------|-------------------|-------|
|                                      | Corpo de Prova        | Área (MM2)                     | LE (MPA)          | RT (MPA) | ES (%)            | LE/RT |
|                                      |                       | 552                            | 655               | 793      | 20                | 45    |
| Corrida Lote Controle                |                       |                                |                   |          |                   |       |
| 120912                               | 030002203417          |                                |                   |          |                   |       |
|                                      | B                     | 18                             | 604               | 727      | 27                | 72    |
|                                      | Pé                    | BARRA USINADA DIÂMETRO 12,7 MM | 126,7             |          |                   | 0,83  |

LE-Limite de escoamento; RT-Resistência a Tração; AL-Alongamento; ES-Estricção;

**Ensaio de Dureza**

Escala: HRC

Especificado: Min

Max 22,0

Corrida Lote Controle Lote Trat. Nº Tubo Posição

120912 030002203417 B 18 Pê 17,0 17,0 17,0

**Ensaio de Impacto**

Corpo de Prova: CHARPY 10X55X10 ENTALHE EM V Direção do Corpo de Prova: Transversal Temperatura: -10°C

Relo do Corte: 8 mm

EA1 EA2 EA3 EA4 EA5 EA Med

(J) (J) (J) (J) (J) (J)

Especificado: Min 20 20 20 20 27

Max

Corrida Lote Controle Lote Trat. Nº Tubo Posição

120912 030002203417 B 18 Pê 204 216 208 209

EA-energia absorvida:

Observações:

NOTA FISCAL: 000310769

"A V< (> &< > M do Brasil atesta que o material foi inspecionado e um equipamento de ultrassom automático conforme API 5CT/ISO 11960-SR2 e ASTM E 213 e os tubos foram aprovados nesta inspeção. O nível de calibração utilizado foi entalhe conforme figura 3b da ASTM E 213/figura D17 a e b da API 5CT com profundidade de 5% da espessura de parede nominal do tubo para a superfície externa".

"V< (> &< > M do Brasil informs that the materials were inspected by UT equipment and approved according to API 5CT/ISO 11960-SR2 and ASTM E 213 criteria. The calibration of the UT equipment for the inspection was performed using a reference NDT standard as Figure 3b of ASTM E 213/Figure D17 a and b of API 5CT, with OD longitudinal/transversal notches with depth of 5% of the nominal wall thickness of the pipe".



VALLOUREC & MANNESMANN TUBES



**Certificado de Inspeção**  
(De acordo com DIN EN 10204.3.1)

Nº: 0050574919 / A

Folha:3 / 3

Certificamos que este material foi produzido e inspecionado de acordo com todas as exigências destas normas e especificações, e todos os resultados considerados satisfatórios. Este Certificado é processado por sistema informatizado e é válido sem assinatura.

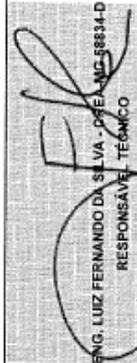
DEPARTAMENTO DE CONTROLE DE QUALIDADE

FAX: (31) 3328-2587

e-mail:cont.qualidade@vmtubes.com.br

DATA

05.04.2013

  
ENG. LUIZ FERNANDO DA SILVA - CREA-MG-58834-D  
RESPONSÁVEL TÉCNICO

TUBOS VERDES: Os tubos da V&M do Brasil são fabricados com aço, cujo processo de produção utiliza o curvão vegetal como fonte de energia. Este curvão é oriundo de mais de 100.000 ha de florestas plantadas pela V&M Florestal. Com a aquisição de 13,8 toneladas(s) de tubo de aço da V&M do Brasil, sua empresa contribuiu para a redução do efeito estufa, ao evitar o acúmulo de 24,8 toneladas(s) de CO2 na atmosfera.