

TIAGO CORRÊA SILVA

**TRATAMENTO TÉRMICO DE NORMALIZAÇÃO EM TAMPOS DE VASOS
DE PRESSÃO FABRICADOS DE MATERIAL P275NH**

Guaratinguetá

2015

TIAGO CORRÊA SILVA

TRATAMENTO TÉRMICO DE NORMALIZAÇÃO EM TAMPOS DE VASOS DE
PRESSÃO FABRICADOS DE MATERIAL P275NH

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães

Guaratinguetá

2015

S586t	Silva, Tiago Corrêa Tratamento térmico de normalização em tampos de vasos de pressão fabricados de material P275NH / Tiago Corrêa Silva – Guaratinguetá, 2015. 49 f. : il. Bibliografia : f. 48-49 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães 1. Metais - Tratamento térmico 2. Vasos de pressão 3. Normalização I. Título
	CDU 669-15

**TRATAMENTO TÉRMICO DE NORMALIZAÇÃO EM TAMPOS DE VASOS
DE PRESSÃO FABRICADOS DE MATERIAL P275NH**

TIAGO CORRÊA SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS

Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães

Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

UNESP-FEG


Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho

UNESP-FEG

Dezembro de 2015

DADOS CURRICULARES

TIAGO CORRÊA SILVA

NASCIMENTO	17.02.1986 – TAUBATÉ / SP
FILIAÇÃO	Luiz Antonio Marques Débora Clarice Corrêa
2002/2004	Escola Estadual “Prof. Bernardino Querido”
2009/2015	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”

Dedicatória

Em especial à minha família, Gabrielli, Luiz e Débora,
que sempre me apoiaram em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, *Luiz e Débora*, por me proporcionarem condições para que eu estudasse e me desenvolvesse.

À minha esposa *Gabrielli* que me apoiou nestes anos de graduação, passando as noites sozinha em casa.

Aos meus filhos, *Gabriel e Luiz Gustavo* que são motivo de inspiração de todos os dias.

Ao colega de trabalho e também amigo, *Marcos Figueira*, que me auxiliou no desenvolvimento deste trabalho, e me acompanhou durante esses anos de graduação.

Ao *Professor Valdir*, que me orientou brilhantemente na condução deste trabalho.

Epígrafe

“O insucesso é apenas uma oportunidade
para recomeçar de novo com mais
inteligência”

Henry Ford

SILVA, TIAGO CORRÊA. **Tratamento térmico de normalização em tampos de vasos de pressão fabricados de material P275NH**. 2015. 49 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Em um contexto de mercado cada vez mais competitivo, as empresas necessitam controlar seus processos de forma precisa para que não haja retrabalho ou rejeição de materiais durante industrialização. Isto pode ser alcançado através da definição de parâmetros que garantam a manutenção das características dos materiais, tais como especificadas inicialmente nos projetos. Esse trabalho de graduação tem o objetivo de definir o melhor parâmetro de tratamento térmico de normalização para tampos, componentes de um vaso de pressão, conformados em material P275NH. A metodologia aplicada está baseada na execução de uma sequência de tratamentos térmicos, utilizando-se diferentes parâmetros. As variáveis de processo foram a velocidade de resfriamento, o tempo de patamar e a variação da temperatura de patamar. Após cada tratamento térmico foram ensaiados corpos de prova mecanicamente e os resultados comparados entre si. Como resultado deste estudo, nota-se que as propriedades mecânicas dos materiais são fortemente influenciadas pela variação de temperatura de patamar e velocidade de resfriamento do tratamento térmico.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento Térmico.Normalização.Tampos.P275NH.

SILVA, TIAGO CORRÊA. **Normalized heat treatment of head end pressure vessels made of P275NH material.** 2015. 49 f. GraduateWork (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

In a market environment increasingly competitive, the companies need to control of this process accurately, avoiding rework or rejection of materials during industrialization. This can be achieved by defining procedure that assure the maintenance of the materials characteristics, as specified initially in the projects. This graduation work has the objective of defining the best heat treatment parameter of normalizing for Heads, part of a pressure vessel, formed in P275NH material. The methodology applied is based on the execution of a sequence of Heat Treatments, using different parameters. The process variables were the cooling velocity, the hold time and the hold temperature variation. As a result of this study, it is noticed that the mechanical properties of the materials are strongly influenced by the hold temperature variation and by the cooling velocity, both determined for the heat treatment cycle.

KEYWORDS: Heat treatment. Normalized.Head.P275NH.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação da tensão de compressão com a deformação em função da temperatura para um aço de baixo carbono	16
Figura 2 - Representação da temperatura homóloga e das faixas de temperatura.....	17
Figura 3 - Foto de prensagem de parte de um tampo	18
Figura 4 - Processo de rebordeamento de um tampo.....	19
Figura 5 - Tensões em um tampo pressurizado	20
Figura 6 - Diagrama de fases FeC	26
Figura 7 - Detalhe do projeto do tampo [mm].....	28
Figura 8 - Forno interno de combustão a diesel	30
Figura 9 - Carta gráfica do primeiro TT	31
Tabela 5 - Parâmetros do segundo TT	31
Figura 10 - Carta gráfica do segundo TT	32
Figura 11 - Registrador gráfico.....	33
Figura 12 - Carta gráfica do terceiro TT.....	34
Figura 13 - Comparativo dos ciclos de TT	38
Figura 14 - Micrografia da amostra da chapa conforme fornecida	39
Figura 15 - Micrografia na amostra após o primeiro TT	40
Figura 16 - Micrografia na amostra após o segundo TT	41
Figura 17 - Micrografia na amostra após o terceiro TT	42
Figura 18 - Comparativo das tensões de escoamento.....	43
Figura 19 – CPs de tração prismática ensaiados.....	44
Figura 20 - Fotos do CPs de impacto	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do P275NH	29
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do P275NH.....	29
Tabela 3 - Ensaio de impacto no P275NH.....	29
Tabela 4 - Parâmetros do primeiro TT.....	30
Tabela 5 - Parâmetros do segundo TT	31
Tabela 6 - Parâmetros do terceiro TT	33
Tabela 7 - Dados do primeiro TT	36
Tabela 8 - Dados do segundo TT.....	37
Tabela 9 - Dados do terceiro TT.....	37
Tabela 10 - Tração prismática da chapa conforme fornecida	42
Tabela 11 - Tração prismática primeiro TT	43
Tabela 12 - Tração prismática segundo TT.....	44
Tabela 13 - Tração prismática terceiro TT.....	44
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de impacto.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP = Corpo de prova

TT = Tratamento térmico

TF = Trabalho a frio

Tf = Temperatura de fusão

TM = Trabalho a morno

TQ = Trabalho a quente

ε_f = Deformação calculada

R_f = Raio médio final

R_o = Raio médio inicial, igual a infinito quando chapa plana

t = Espessura nominal antes da conformação

ε_f = Deformação calculada

D_b = Diâmetro do disco de chapa

D_o = Diâmetro externo final

t = Espessura nominal antes da conformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	13
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	13
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	VASOS DE PRESSÃO.....	15
2.2	CONFORMAÇÃO DE TAMPOS.....	15
2.3	CÁLCULO DE DEFORMAÇÃO	19
2.4	TRATAMENTO TÉRMICO.....	21
2.5	FATORES DE INFLUÊNCIA NOS TRATAMENTOS TÉRMICOS	23
2.6	NORMALIZAÇÃO	26
2.7	RECOZIMENTO TOTAL OU PLENO	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	MATERIAIS (AMOSTRAS)	28
3.2	PROCEDIMENTO	30
3.3	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	CICLOS DE TRATAMENTO TÉRMICO	36
4.2	ASPECTOS MICROESTRUTURAIS	38
4.3	ANÁLISE DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO	42
4.4	ANÁLISE DOS ENSAIOS DE IMPACTO DO TIPO CHARPY “V”	44
5	CONCLUSÕES.....	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Projetos de vasos de pressão, trocadores de calor, tanques entre outros equipamentos são regidos por códigos, como por exemplo, ASME, AD-MERKBLATT e API. Nestes códigos constam todas as considerações básicas necessárias para cada tipo de equipamento de acordo com sua aplicação e processo de fabricação.

O projeto e fabricação dos tampos são um dos vários itens inclusos nestes códigos. Vários requisitos são solicitados como, disposição da solda, forma do tampo em acordo com a fórmula a ser utilizado no memorial de cálculo e o tratamento térmico.

O tratamento térmico de tampos é solicitado de acordo com o material, aplicação e a deformação empregada no processo de fabricação. Por exemplo, no caso do material, cada um se comporta de uma maneira quando conformado, e pode ser mais indicados para cada tipo de aplicação. Para a maioria dos aços carbonos não ligados e de baixas ligas é solicitado um tratamento térmico quando a deformação empregada excede 5%, este tratamento pode ser um alívio de tensões ou uma normalização.(ASME, 2013)

O tratamento térmico também pode ser solicitado dependendo do tipo de aplicação do equipamento. Para equipamentos de aço carbono que trabalham com produtos tóxicos, como H_2S , o tratamento térmico é obrigatório independentemente da deformação da fabricação ou da solda.(ASME, 2013)

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo definir as rotas para a execução do tratamento térmico de normalização do material P275NH após conformação a frio de tampos para vasos de pressão, a fim de obter as propriedades mecânicas do material em acordo com o mínimo requisitado nas normas.

Através dos tratamentos térmicos, visa-se definir os parâmetros, para que se obtenham os resultados dos testes mecânicos e metalográficos que atendam a norma do material. As propriedades a serem verificadas após o tratamento térmico são o alongamento que deve ser de no mínimo 20%, tensão de escoamento de 275 MPa, energia absorvida no impacto a 0° de 31J no mínimo e um tamanho de grão 6 em sua micrografia.(TELLES, 2001)

Os parâmetros para tratamentos térmicos não são tabelados, e tampouco especificados em normas, pois dependem de muitas variáveis como, por exemplo, as condições de fornecimento do material, dentre outros fatores.

De maneira geral, os principais parâmetros são especificados pelo fornecedor do material, porém uma pequena variação nestes parâmetros leva a resultados completamente fora do esperado.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, explicitando as ideias principais deste trabalho e graduação de maneira resumida; no Capítulo 2 encontram-se as fundamentações teóricas em que foi baseado o trabalho. Já no Capítulo 3, são descritos os materiais e métodos utilizados na realização dos ensaios experimentais. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios mecânicos e comentários acerca de cada etapa do processo. Por fim, o Capítulo 5, onde são descritas as conclusões obtidas do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VASOS DE PRESSÃO

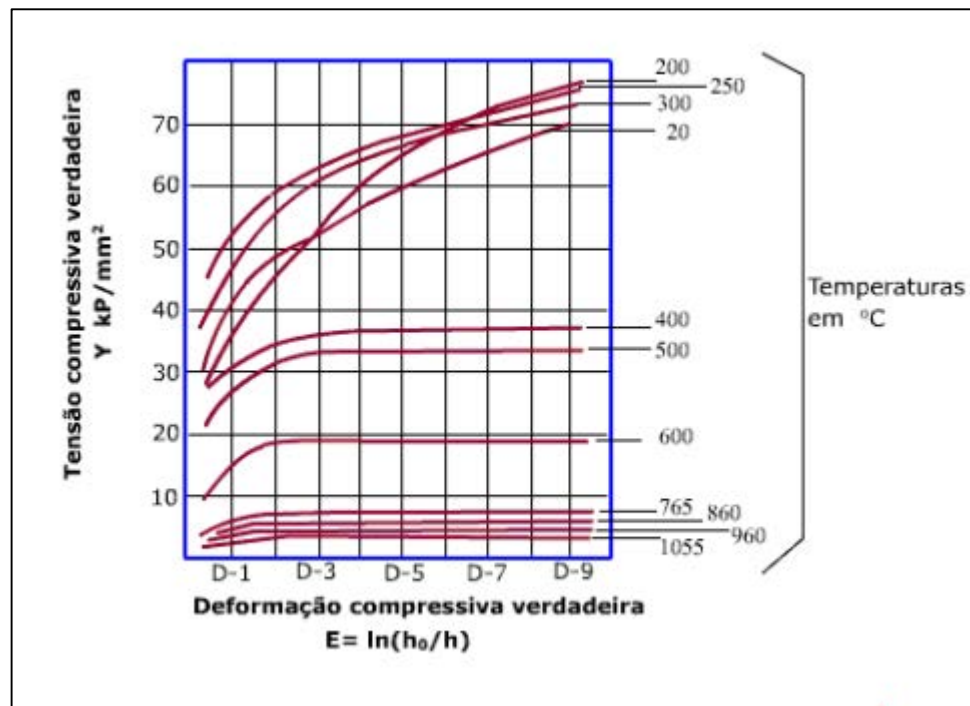
Os vasos de pressão são compostos basicamente pelo costado, tampos e conexões. O alvo do estudo serão os tampos, também conhecidos como cabeceiras. Existem diversos tipos de tampos para vasos de pressão, dentre eles, os mais comuns são os conformados em formatos Torisférico, Elipsoidal e Semisférico. Estes tampos apresentam uma suave transição na parte que será soldada ao corpo cilíndrico do vaso (costado). Portanto, quanto mais suave esta transição, melhores serão as condições de projeto, evitando momentos fletores no material.(TELLES, 2001)

2.2 CONFORMAÇÃO DE TAMPOS

Os processos de conformação são comumente classificados em operações de trabalho a quente, a morno e a frio. O trabalho a quente é definido como a deformação sob condições de temperatura e taxa de deformação, tais que, os processos de recuperação e recristalização ocorrem simultaneamente com a deformação. (BRESCIANI FILHO, 1997)

De outra forma, o trabalho a frio é a deformação realizada sob condições em que os processos de recuperação e recristalização não são efetivos. No trabalho a morno ocorre recuperação, mas não se formam novos grãos (não há recristalização). No trabalho a quente, devido à intensa vibração térmica – que facilita muito a difusão de átomos e a mobilidade e aniquilamento das discordâncias –o encruamento e a estrutura distorcida dos grãos produzida pela deformação, são rapidamente eliminados pela formação de novos grãos livres de deformação, como resultado da recristalização. É possível conseguir grandes níveis de deformação, uma vez que os processos de recuperação e recristalização acompanham a deformação, que ocorre a uma tensão constante. Como a tensão de escoamento plástico decresce com o aumento da temperatura (Figura 1), a energia necessária para a deformação é geralmente muito menor para o trabalho a quente do que para o trabalho a frio ou a morno.

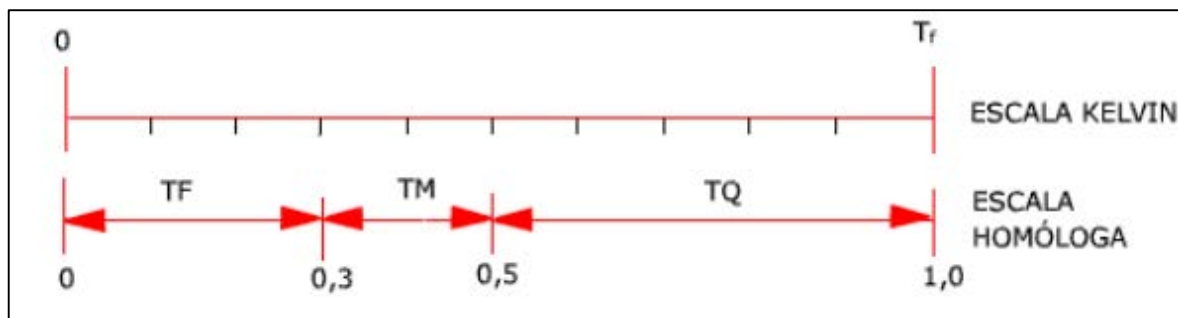
Figura 1 – Variação da tensão de compressão com a deformação em função da temperatura para um aço de baixo carbono



Fonte: (BRESCIANI FILHO, 1997).

No trabalho a frio, como o encruamento não é aliviado, a tensão aumenta com a deformação. Assim, a deformação total – que é possível de se obter sem causar fratura – é menor no trabalho a frio do que no trabalho a quente e a morno, exceto quando se realizam tratamentos térmicos de recozimento para aliviar os efeitos do encruamento. No trabalho a morno ocorre uma recuperação parcial da ductilidade do material e a tensão de conformação situa-se numa faixa intermediária entre o trabalho a frio e a quente. Costuma-se definir, para fins práticos, as faixas de temperaturas do trabalho a quente, a morno e a frio baseadas na temperatura homóloga, que permite a normalização do comportamento do metal (Figura 2). Em um metal puro, que não sofre transformação de fase no estado sólido, os pontos de referência em termos de temperatura são: o zero absoluto e o ponto de fusão. Estes pontos, traduzidos em graus Kelvin, estabelecem os extremos da escala homóloga de temperaturas. (HELMAN, 2005)

Figura 2 - Representação da temperatura homóloga e das faixas de temperatura



Fonte: (HELMAN, 2005).

Em termos de conformação mecânica, chama-se de trabalho a quente (TQ) aquele que é executado em temperaturas acima de $0,5T_f$ (Temperatura de fusão) trabalho a morno (TM), executado na faixa compreendida (grosseiramente) entre $0,3T_f$ e $0,5T_f$ e trabalho a frio (TF) aquele que é executado entre 0 e $0,3T_f$. É importante compreender que a distinção básica entre TQ e TF é, portanto, função da temperatura em que se dá a recristalização efetiva do material.

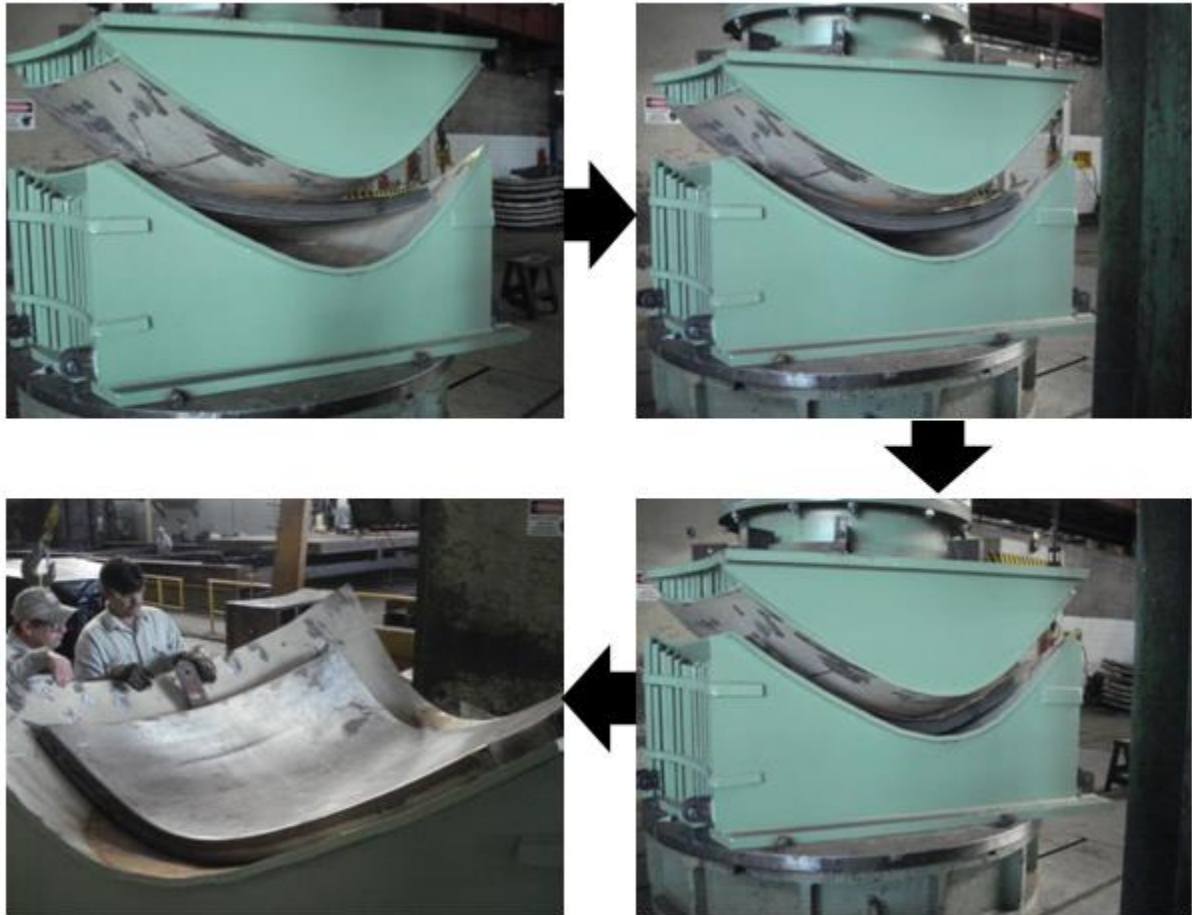
Como o estudo prevê somente trabalho de conformação a frio, vamos aprofundar os fundamentos somente neste tópico.

O trabalho a frio é acompanhado do encruamento (inglês "strainhardening") do metal, que é ocasionado pela interação das discordâncias entre si e com outras barreiras, tais como contornos de grão, que impedem o seu movimento através da rede cristalina. A deformação plástica produz também um aumento no número de discordâncias, as quais, em virtude de sua interação, resultam num elevado estado de tensão interna na rede cristalina. (HELMAN, 2005)

Um metal cristalino contém em média 10^6 a 10^8 cm de discordâncias por cm^3 , enquanto que um metal severamente encruado apresenta cerca de 10^{12} cm de discordâncias por cm^3 . A estrutura característica do estado encruado examinada ao microscópio eletrônico, apresenta dentro de cada grão, regiões pobres em discordâncias, cercadas por um emaranhado altamente denso de discordâncias nos planos de deslizamento. Tudo isto resulta macroscopicamente em um aumento da resistência e da dureza, e num decréscimo da ductilidade do material. (HELMAN, 2005)

O primeiro processo é o de prensagem (Figura 3), em que se utiliza uma ferramenta macho e outra fêmea, confeccionadas nas dimensões do tampo que se deseja obter. Estas ferramentas são instaladas em prensas hidráulicas. O material é pressionado entre as

ferramentas até que se atinja a forma desejada. Este processo é geralmente recomendado para prensagem de materiais com espessuras elevadas, e exige a utilização de prensas com elevada capacidade.



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Figura 3 - Foto de prensagem de parte de um tampo

O segundo processo é chamado rebordeamento (Figura 4), onde o disco é fixado a um eixo rotativo, que por meio de pistões e apoios hidráulicos conformam o material. Neste processo se exigem grande habilidade manual do operador, uma vez que não se trata de um processo automatizado.

Figura 4 - Processo de rebordeamento de um tampo



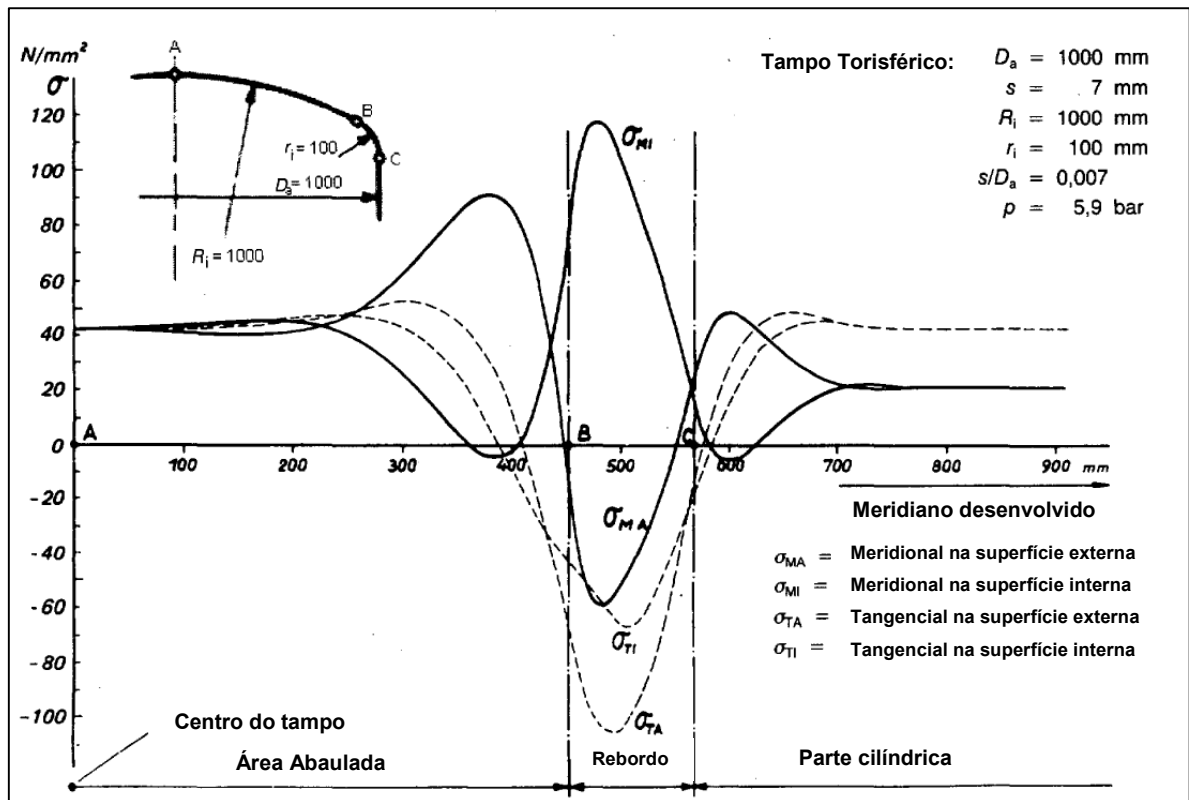
Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

2.3 CÁLCULO DE DEFORMAÇÃO

Conforme os códigos de referência de fabricação de vasos de pressão AD 2000-Merkblatt e ASME VIII Divisão 1 e Divisão 2, após determinado grau de deformação o material tem suas propriedades alteradas, e portanto é necessário que se faça um tratamento térmico para eliminar as tensões internas do material conformado.

A Figura 5, que demonstra as tensões em todo o perfil de um tampo Torisférico de 1000 mm de diâmetro interno (AD, 2000). Nesta figura podemos verificar as variações das tensões internas e externas impostas no material após sua conformação plástica, onde devemos atentar à região de rebordo “knuckle” representada na região entre os pontos B e C da Figura 5. Esta é uma região crítica tanto após a conformação do material como também é crítica ao equipamento, pois é a região de transição da parte cilíndrica do equipamento para o seu tampo, portanto é uma região estrutural muito crítica dos vasos de pressão.

Figura 5 - Tensões em um tampo pressurizado



Fonte: (AD, 2000).

Nos processos de conformação de cabeceiras, a maior preocupação é com relação ao encruamento do material. Tendo em conta o grau de deformação empregado, que pode ser calculado a partir das equações abaixo, são definidos os tipos de tratamentos térmicos necessários para restaurar as propriedades dos materiais.

- **ASME VIII Div. 1 Ed. 2013 – Tabela UG-79-1 (Equação para cálculo de deformação)**

Para dupla curvatura (Tampos)(ASME, 2013)

$$\varepsilon_f = \left(\frac{75t}{R_f} \right) \left(1 - \frac{R_f}{R_o} \right)$$

I

ε_f = Deformação calculada

R_f = Raio médio final

R_o = Raio médio inicial, igual a infinito quando chapa plana

t = Espessura nominal antes da conformação

- **ASME VIII Div. 2 Ed. 2013 – Tabela 6.1 (Equação para cálculo de deformação)**

Para dupla curvatura formada a partir de uma única peça. (Tampos rebordeados)

$$\varepsilon_f = 100 \ln \left(\frac{D_b}{D_o - 2t} \right) \quad \text{II}$$

ε_f = Deformação calculada

D_b = Diâmetro do disco de chapa

D_o = Diâmetro externo final

t = Espessura nominal antes da conformação

- **AD 2000-Merkblatt – HP 7/2Ed. Out/2000 – Heat treatment Ferritic steels**

$$t > 0,05 D_m \quad \text{III}$$

D_m = Diâmetro médio

t = Espessura nominal antes da conformação

2.4 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas. As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. (CALLISTER JUNIOR, 2007)

Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando na alteração mais ou menos pronunciada de suas propriedades. Cada uma das estruturas obtidas apresenta características próprias, que se transferem ao aço, conforme a estrutura ou combinação de estrutura presentes. Pelo exposto, pode-se avaliar a importância dos tratamentos térmicos, sobretudo nos aços de alto carbono e nos que apresentam também elementos de liga. De fato, se geralmente muitos aços de baixo e médio carbono são usados nas condições típicas do trabalho a quente, isto é, nos estados forjados e laminado, quase

todos os aços de alto carbono ou com elementos de liga, são obrigatoriamente submetidos a tratamentos térmicos antes de serem colocados em serviço.

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes:

- Remoção de tensões internas (oriundas de resfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa);
- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora da ductilidade;
- Melhora da usinabilidade;
- Melhora da resistência ao desgaste;
- Melhora das propriedades de corte;
- Melhora da resistência à corrosão;
- Melhora da resistência ao calor;
- Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

A simples enumeração dos objetivos acima evidencia claramente a importância e a necessidade do tratamento térmico no aço. Em geral, a melhora de uma ou mais propriedades, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outras. Por exemplo, o aumento da ductilidade provoca simultaneamente queda nos valores de dureza e resistência à tração. É necessário, pois, que o tratamento térmico seja escolhido e aplicado criteriosamente, para que os inconvenientes apontados sejam reduzidos ao mínimo. Não se verifica, pela simples aplicação de um tratamento térmico, qualquer alteração da composição química do aço.

Há casos, entretanto, em que interessa somente uma modificação parcial de certas propriedades mecânicas, como por exemplo, melhorar superficialmente a dureza do aço. Este efeito é conseguido pela alteração parcial da sua composição química. Os tratamentos em que a combinação de operações de aquecimento e resfriamento é realizada em condições tais que conduzem a uma mudança parcial da sua composição química da liga e, conseqüentemente, uma modificação parcial de suas propriedades mecânicas, serão chamados de “tratamentos termoquímicos”.

Embora os tratamentos térmicos adequados aos processos já sejam definidos nos códigos de referência, estes não fornecem os parâmetros necessários para a execução dos

ciclos. Normalmente os fornecedores executam um simulado de tratamento nos materiais, mas por ser executado de forma genérica, não representa fielmente as condições de fabricação das cabeceiras, tais como encruamento e forma.

2.5 FATORES DE INFLUÊNCIA NOS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Tendo em conta um ciclo de tratamento térmico “tempo x temperatura”, os fatores a serem inicialmente considerados são: aquecimento, tempo de permanência na temperatura e resfriamento. Além desses fatores, outro de grande importância é a atmosfera do recinto de aquecimento, visto que a sua qualidade tem grande influência sobre os resultados finais dos tratamentos térmicos.

Taxa de aquecimento: O caso mais frequente de tratamento térmico do aço é alterar uma ou diversas de suas propriedades mecânicas, mediante uma determinada modificação que se processa na sua estrutura. Assim sendo, o aquecimento é geralmente realizado a uma temperatura acima da crítica, porque então se tem a completa austenitização do aço, ou seja, total dissolução do carboneto de ferro gama. A austenitização é o ponto de partida para as transformações posteriores desejadas, as quais se processarão em função da velocidade de esfriamento adotada. Na fase de aquecimento, dentro do processo de tratamento térmico, devem ser apropriadamente consideradas a velocidade de aquecimento e a temperatura máxima de aquecimento.

A velocidade de aquecimento, embora na maioria dos casos seja um fator secundário, apresenta certa importância, principalmente quando os aços estão em estado de tensão interna ou possuem tensões residuais devidas ao encruamento prévio ou ao estado inteiramente martensíticos, visto que nessas condições, um aquecimento muito rápido pode provocar empenamento ou mesmo aparecimento de fissuras. Há casos, contudo, de aços fortemente encruados que apresentam uma tendência para excessivo crescimento de grão quando aquecidos lentamente dentro da zona crítica, sendo então conveniente realizar um aquecimento mais rápido através dessa zona de transformação. Nas mesmas condições estão, certos aços especiais que exigem temperatura final de austenitização muito elevada. Nesses casos em que no aquecimento é atingida a zona crítica, é necessário que a mesma seja ultrapassada mais ou menos rapidamente para evitar excessivo crescimento de grão de austenita.

A temperatura de aquecimento é considerada um fator fixo, determinado pela natureza do processo, e dependente das propriedades e das estruturas finais desejadas, tais como a composição química do aço e principalmente o seu teor de carbono.

Quanto mais alta essa temperatura, acima da zona crítica, maior segurança se tem da completa dissolução das fases no ferro gama; por outro lado, maior será o tamanho de grão da austenita. As desvantagens de um tamanho de grão excessivo são maiores que as desvantagens de não ser ter total dissolução das fases no ferro gama, de modo que se deve procurar evitar temperaturas muito acima de linha superior (A3) da zona crítica. (CALLISTER JUNIOR, 2007)

Na prática, o máximo que se admite é 50° C acima de A3, e assim mesmo, para os aços hipoeutetóides. Para os hipereutetóides, a temperatura recomendada é inferior à da linha Acm da Figura 6, visto que esta linha sobe muito rapidamente em temperatura com o aumento do teor de carbono. Para que haja, portanto, completa dissolução do carboneto de ferro no ferro gama, são necessárias temperaturas muito altas com conseqüente e excessivo crescimento de grão de austenita, condição essa mais prejudicial que a presença de certa quantidade de carboneto não dissolvido.

Tempo de permanência à temperatura de patamar: A influência do tempo de permanência do aço na temperatura de aquecimento é mais ou menos idêntica à da máxima temperatura de aquecimento, isto é, quanto mais longo o tempo na temperatura considerada de austenização, tanto mais completa a dissolução do carboneto de ferro ou outras fases presentes (elemento de liga) no ferro gama; entretanto maior o tamanho de grão resultante.

Procura-se evitar, pois, permanência na temperatura do estritamente necessário para que se obtenha uma temperatura uniforme através de toda a seção do aço e para que se consiga as modificações estruturais mais convenientes. Tempo muito longo pode também aumentar a oxidação ou descarbonetação do material. Sob o ponto de vista de modificação estrutural, admite-se que uma temperatura ligeiramente mais elevada seja mais vantajosa que um tempo mais longo a uma temperatura inferior, devido à maior mobilidade atômica. De qualquer modo, o tempo à temperatura deve ser pelo menos o suficiente a se ter sua uniformização através de toda a seção.

Taxa de Resfriamento: Este é o fator mais importante, pois é ele que determinará efetivamente a estrutura e, em conseqüência, as propriedades finais dos aços. Como pela variação da velocidade de resfriamento pode-se obter desde a perlita grosseira de baixa resistência mecânica e baixa dureza até a martensita que é o constituinte mais duro resultante

dos tratamentos térmicos. Por outro lado, a obtenção desses constituintes não é só função da velocidade de resfriamento, dependendo também como se sabe, da composição do aço (teor em elemento de liga, deslocando a posição das curvas em C), das dimensões (seção) das peças, etc.

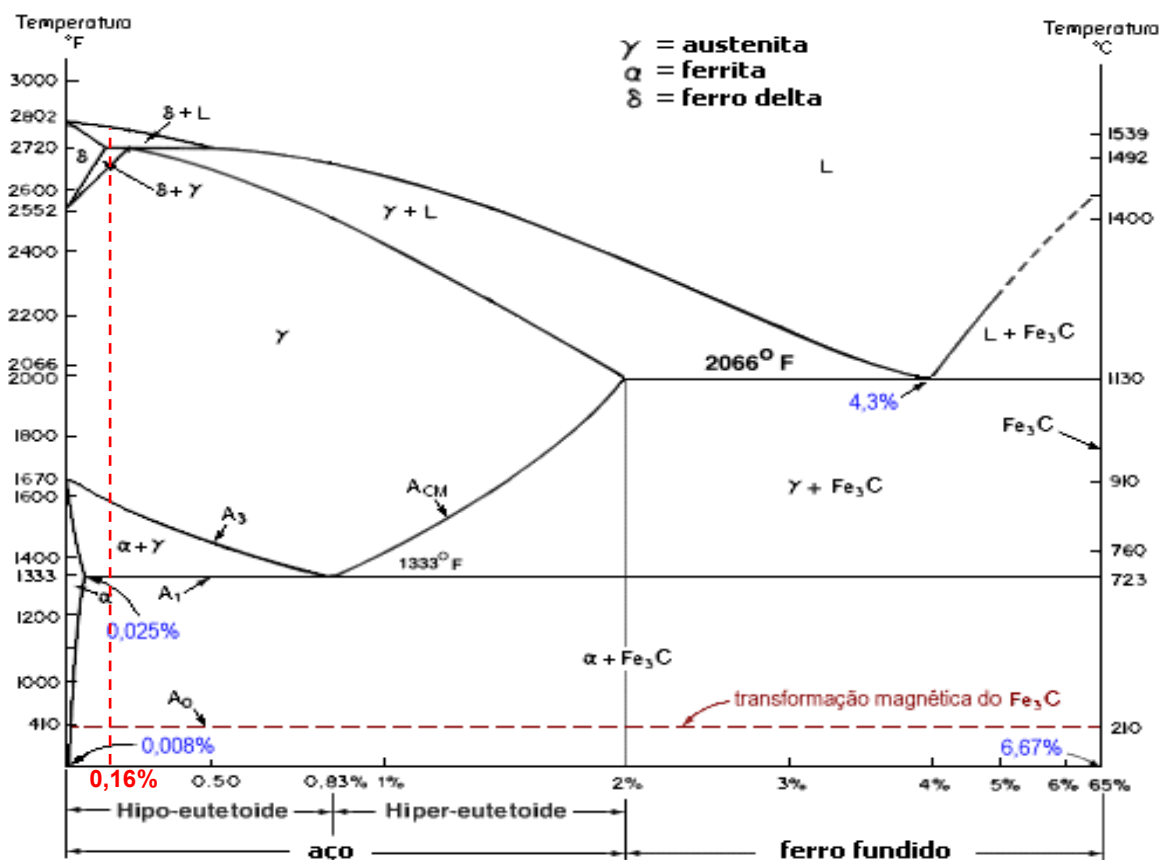
Os meios de esfriamento usuais são: ambiente do forno, ar e meios líquidos. O resfriamento mais brando é, evidentemente, o realizado no próprio interior do forno e ele se torna mais severo à medida que se passa para o ar ou para um meio líquido, onde a extrema agitação dá origem aos meios de esfriamento mais drásticos ou violentos.

Na escolha do meio de esfriamento, o fator inicial a ser considerado é o tipo de estrutura final desejada a uma determinada profundidade. De fato, a seção e a forma da peça influem consideravelmente na escolha daquele meio. Muitas vezes, por exemplo, a seção da peça é tal que a alteração estrutural projetada não ocorre à profundidade esperada. Algumas vezes a forma da peça é tal que um resfriamento mais drástico, como em água, pode provocar consequências inesperadas e resultados indesejáveis tais como empenamento e até mesmo ruptura da peça.

Um meio de resfriamento menos drástico, como óleo, seria o indicado sob o ponto de vista de empenamento ou ruptura, porque reduz o gradiente de temperatura apreciavelmente durante o resfriamento, mas não pode satisfazer sob o ponto de vista de profundidade de endurecimento. É preciso, então, conciliar as duas coisas: resfriar adequadamente para obtenção da estrutura e das propriedades desejadas à profundidade prevista e, ao mesmo tempo, evitar empenamento distorção ou mesmo ruptura da peça quando submetida ao resfriamento. Tal condição se consegue com a escolha apropriada do aço. De qualquer modo, o meio de resfriamento é fator básico no que se refere à reação da austenita e em consequência, aos produtos finais de transformação.

Os meios de resfriamento mais utilizados são: soluções aquosas, águas, óleo e ar. Outro fator que deve ser levado em conta é o da circulação do meio de resfriamento ou agitação da peça no interior, pois pode ocorrer o empenamento das peças e até mesmo fissuras para isso temos que usar meios menos drásticos como óleo, água aquecida ou ar, banhos de sal ou banho de metal fundido.

Figura 6 - Diagrama de fases FeC



Fonte: (ASM, 1991).

2.6 NORMALIZAÇÃO

Consiste no aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguindo de resfriamento no ar. Para os aços hipoeutetóides, pode-se admitir que a temperatura de aquecimento ultrapasse a linha A3, e para os hipereutetóides a linha Acm, sem os inconvenientes, neste último caso, do esfriamento ao ar que se seguem da formação do invólucro frágil de carbonetos. (ASM, 1991)

A normalização visa refinar a granulação grosseira de peças de aço fundido, principalmente. Frequentemente, e com o mesmo objetivo, a normalização é aplicada em peças depois de laminadas, conformadas ou forjadas. A normalização é ainda usada como tratamento preliminar à têmpera e ao revenido, justamente para produzir estrutura mais uniforme do que a obtida por laminação. Os constituintes que se obtêm na normalização são ferrita e perlita fina ou cementita e perlita fina. Eventualmente, dependendo do tipo de aço, pode-se obter a bainita.

2.7 RECOZIMENTO TOTAL OU PLENO

Este tratamento térmico se constitui no aquecimento do aço acima da zona crítica, durante o tempo necessário e suficiente para se ter solução do carbono ou dos elementos de liga no ferro gama, seguindo de um resfriamento lento, realizado ou mediante o controle da velocidade de resfriamento do forno ou desligando-se o mesmo e deixando que o aço resfrie ao mesmo tempo em que ele.

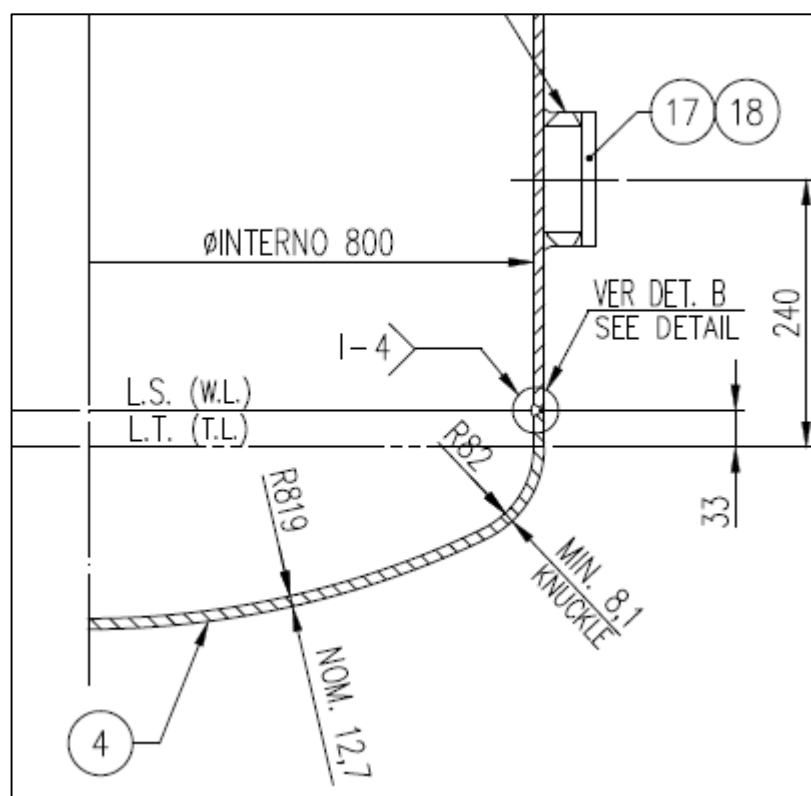
A temperatura para recozimento pleno é de mais ou menos 50°C acima do limite superior da zona crítica - linha A3 - para aços hipoeutetóides e acima do limite inferior - linha A1 - para os hipereutetóides. Para estes aços, não se deve ultrapassar a linha superior Acm porque, no resfriamento lento posterior, a ser atravessada novamente essa linha, formar-se-ia nos contornos dos grãos de ausência um invólucro contínuo e frágil de carboneto. Os microconstituintes que resultam do recozimento pleno são: perlita e ferrita para aços hipoeutetóides, cementita e perlita para aços hipereutetóides e perlita para os aços eutetóides. (ASM, 1991)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS (AMOSTRAS)

As amostras utilizadas foram escolhidas de acordo com a disponibilidade nos projetos realizados. Desta forma, foi selecionado um tampo (Figura 7) que representará todo o lote de tratamento térmico. O material utilizado na fabricação dos tampos testes foi o EN 10028 P275NH com 12,5 mm de espessura, tipo torisférico com diâmetro interno de 800mm, sua composição química, propriedades mecânicas foram são demonstrados nas Tabelas 1, 2 e 3. Este aço possui uma similaridade em suas propriedades e composição química com o aço ASTM A-516 Gr 70 comumente utilizado na fabricação de vasos de pressão.(EN, 2009)

Figura 7 - Detalhe do projeto do tampo [mm]



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Este é um material utilizado em projetos de caldeiras e vasos de pressão, e padronizado pela norma europeia EN 10028-3, a qual é específica para aços soldáveis de granulação fina não ligado; as letras iniciais e finais (P...NH) identificam o material como aço de qualidade

para elevadas temperaturas de projeto. Atualmente o material é aceito também pelo código ASME SA/EN 10028-3.

Outra diferenciação relativa aos materiais foi a retirada de corpos de provas nas etapas anteriores ao processo de conformação.

Todos os materiais possuem certificados de garantia da qualidade, cujas especificações estão detalhadas na tabela abaixo. Este certificado será comentado mais detalhadamente no item 3.2.

Tabela 1 - Composição química do P275NH

Elemento	Max %	Elemento	Max %
C	0.16	Cu	0.30
Si	0.40	Mo	0.08
Mn	0.80-1.50	N	0.012
P	0.025	Nb	0.05
S	0.01	Ni	0.50
AL	0.020	Ti	0.03
Cr	0.30	V	0.05
Nb+Ti+V	0.05		

Fonte: (EN, 2009).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do P275NH

Grau	Espessura	Limite de escoamento	Tração de Ruptura	Alongamento
	(mm)	MPa (min)	MPa	% (min)
P275NH	≤ 16	275	390 - 510	24
	16 < t ≤ 40	265		
	40 < t ≤ 60	255		
	60 < to ≤ 100	235	370 - 490	23
	100 < to ≤ 150	225	360 - 480	
	150 < to ≤ 550	215	350 - 470	

Fonte: (EN, 2009).

Tabela 3 - Ensaio de impacto no P275NH

Tipo	Espessura	Energia de Impacto KV min[J] a temperatura [°C]									
	Nominal	Transversal					Longitudinal				
	(mm)	-50	-40	-20	0	20	-50	-40	-20	0	20
P275NH	≤250	-	-	30	40	50	-	-	45	65	75

Fonte: (EN, 2009).

3.2 PROCEDIMENTO

Após a conformação do tampo, foi executado o tratamento térmico conforme especificação inicial do projeto (Tabela 4), que determina os principais parâmetros a serem aplicados. Devido ao grau de deformação, o tratamento térmico executado foi a normalização, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do primeiro TT

Material	Normalização		
	Temperatura [°C]	Tempo de patamar [min]	Velocidade de Resfriamento
P275NH	890 - 950	>15	Ar calmo

Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Este tratamento foi executado em um forno, Figura 8, com queimadores a diesel e dimensões internas de 5 m x 7 m x 9 m.

Figura 8 - Forno interno de combustão a diesel

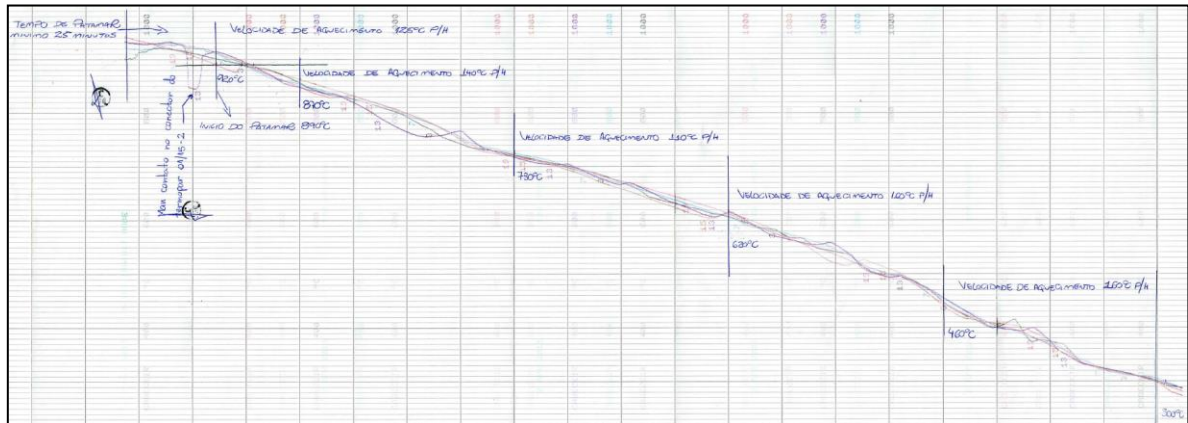


Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Foram tratadas termicamente diversas outras cabeceiras neste mesmo lote.

Os termopares utilizados são do tipo “K” (cromel-alumel) blindados em tubo de aço inox e “cabeça quente” protegido por “PAD” de inox, ou tipo fio fixado na superfície metálica por meio de descarga capacitiva.

Figura 9 - Carta gráfica do primeiro TT



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

O tratamento térmico foi registrado em carta gráfica (Figura 9). Os registros gráficos das temperaturas do ciclo térmico dos Tratamentos Térmicos foram feitos através de Registradores Microprocessado. No gráfico constam todos os dados informativos do Tratamento Térmico como a velocidade do avanço da carta, data, horário, e escala de temperatura; os termopares são identificados por cores individuais e distintas.

Foi executado um segundo tratamento térmico de normalização com uma taxa de resfriamento maior, visando garantir um maior limite de escoamento. Os dados podem ser vistos na Tabela 5.

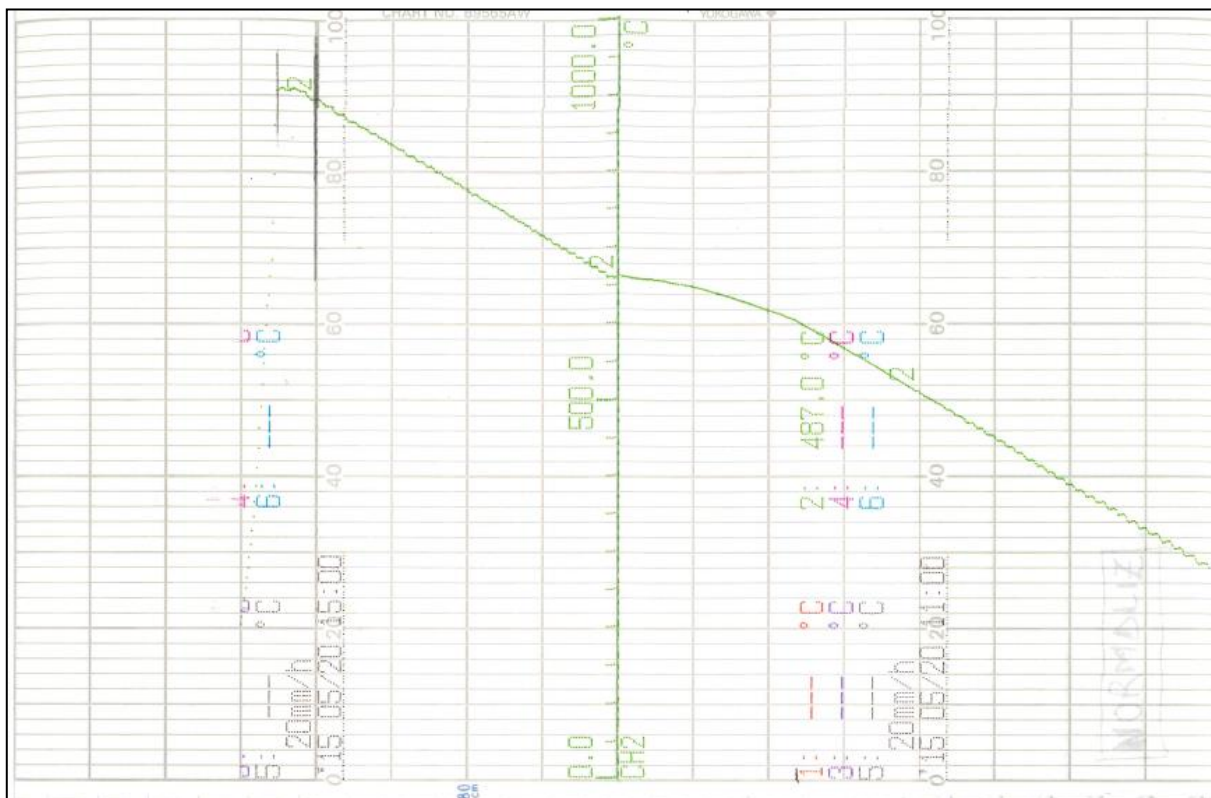
Tabela 5 - Parâmetros do segundo TT

Material	Normalização		
	Temperatura [°C]	Tempo de Patamar [min]	Velocidade de Resfriamento
P275NH	890 - 950	> 15 mínimo	Ar forçado

Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Este segundo tratamento foi executado em uma estufa montada com tijolos refratários e controlado através do registrador gráfico (Figura 11). O resfriamento foi auxiliado com a utilização de um ventilador. Neste mesmo ciclo (Figura 10) foram tratados os CPs que já foram tratados no ciclo anterior.

Figura 10 - Carta gráfica do segundo TT



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Figura 11 - Registrador gráfico



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

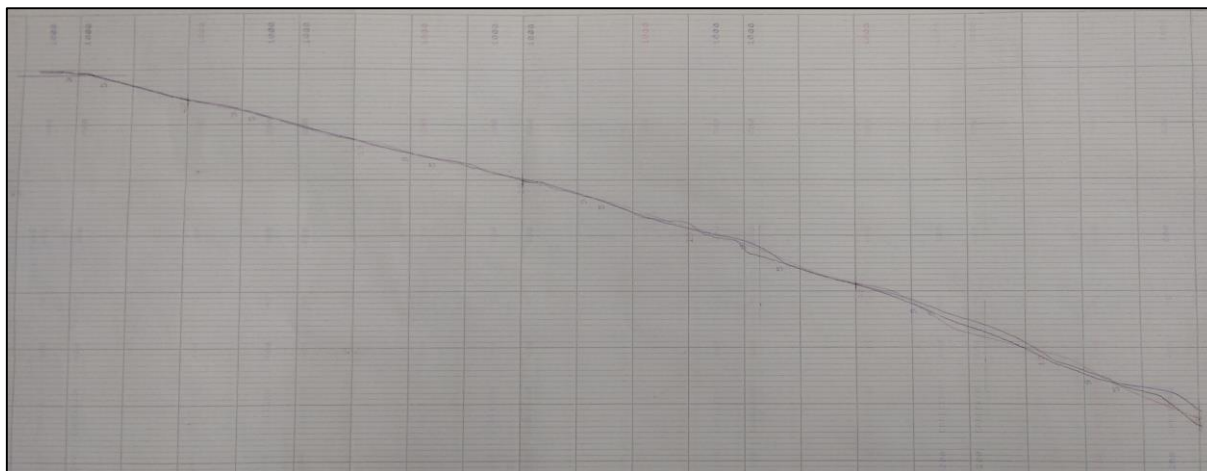
O terceiro tratamento térmico foi executado novamente no forno de combustão a diesel em conjunto novamente com o lote de tampos inicial, porém utilizando-se de uma velocidade de resfriamento a ar forçado através de exaustores industriais e temperatura máxima de patamar menor conforme Tabela 6, (Figura 12)

Tabela 6 - Parâmetros do terceiro TT

Material	Normalização		
	Temperatura [°C]	Tempo de Patamar [min]	Velocidade de Resfriamento
P275NH	890 - 930	> 15 mínimo	Ar forçado

Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Figura 12 - Carta gráfica do terceiro TT



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

3.3 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Todos os corpos de provas foram preparados de acordo com as normas de referência, sempre mantendo o mesmo método de ensaio de um lote para o outro, afim de que a comparação entre os valores encontrados sejam os mais confiáveis possíveis.

Ensaio de tração prismática

- Preparação do CP: Conforme norma DIN EN ISO 6892 Parte 1
- Método de Ensaio: Conforme norma DIN EN ISO 6892 Parte 1
- Orientação do Corpo de Prova: Transversal ao sentido de laminação do material
- Ensaio realizado a temperatura de 20°C
- Máquina de Tração: WPM – HERCKERT Modelo: ZD 100
- Alongamento verificado em 50 mm
- Orientação do CP: Transversal ao sentido de laminação
- Incerteza de medição: $\pm 1\%$

Ensaio de impacto - Charpy

- Preparação do CP: Conforme norma DIN EN 10028-1
- Dimensões do CP: 10 x 8 x 55mm – Entalhe V – NOTCH 2
- Método de Ensaio: Conforme DIN EN ISO 148 Parte 1

- Máquina de ensaio de impacto: Zwick / Roell – RKP 450
- Incerteza de medição: $\pm 1,4J$
- Orientação do CP: Transversal ao sentido de laminação

Micrografia do tamanho de grão

- Preparação do CP: Conforme Norma ASTM E 3/2011
- Método de Ensaio: Conforme Norma ASTM E 112/2013 PLATE I
- Ataque: Nital 2%
- Exame: 100x
- Secção: Longitudinal
- Ensaio realizado no microscópio Olympus GX 51

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CICLOS DE TRATAMENTO TÉRMICO

Neste trabalho foram executados três ciclos de tratamentos térmicos conforme os parâmetros descritos nas tabelas 7, 8 e 9. Verificou-se que no primeiro ciclo de TT, apesar de estar dentro das especificações, a temperatura de patamar oscilou próxima do máximo e mínimo, com uma duração de 25 minutos. Este tempo extrapola o mínimo especificado para o resfriamento ao ar calmo, sem o auxílio de ventiladores (Tabela 7). O tempo excessivo de patamar e o resfriamento demasiadamente lento podem ter aproximado o ciclo de TT ao de um recozimento pleno do tampo. (ASM, 1991)

Tabela 7 - Dados do primeiro TT

Resultados do Tratamento Térmico			
		Real	Unid.
Temperatura de Início de Controle		300	°C
Velocidade de Aquecimento		160	°C/h
Temperatura do Patamar	Máx.	940	°C
	Mín.	890	°C
Duração de Patamar		25	Minutos
Velocidade de Resfriamento		-	°C/h
Temperatura Final de Controle		-	°C

Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

No segundo TT os parâmetros foram controlados com maior eficácia, evitando grandes variações, diminuindo o tempo de patamar, e com um resfriamento ao ar forçado para um melhor refino de grão, recompondo assim as propriedades necessárias aos tampos. Como o TT foi executado em uma estufa e controlado eletronicamente, foi possível registrar a taxa de resfriamento com pode ser observado na Tabela 8. Conforme verificado, conseguiu-se uma variação de somente 20° C na temperatura de patamar, em um tempo de 20 minutos; a velocidade de resfriamento foi de 42°C/min.

Tabela 8 - Dados do segundo TT

Resultados do Tratamento Térmico			
		Real	Unid.
Temperatura de Início de Controle		300	°C
Velocidade de Aquecimento		119	°C/h
Temperatura do Patamar	Máx.	910	°C
	Mín.	890	°C
Duração de Patamar		20	Minutos
Velocidade de Resfriamento		42	°C/min
Temperatura Final de Controle		150	°C

Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

O terceiro TT (Tabela 9) foi executado novamente no forno descrito anteriormente, buscando aproximá-lo das condições do TT executado na estufa, ou seja, uma menor variação na temperatura de patamar, buscando mantê-la próxima da mínima e com uma velocidade de resfriamento ao ar com auxílio de ventiladores.

Tabela 9 - Dados do terceiro TT

Resultados do Tratamento Térmico			
		Real	Unid.
Temperatura de Início de Controle		300	°C
Velocidade de Aquecimento		154	°C/h
Temperatura do Patamar	Máx.	899	°C
	Mín.	890	°C
Duração de Patamar		15	Minutos
Velocidade de Resfriamento		-	°C/h
Temperatura Final de Controle		-	°C

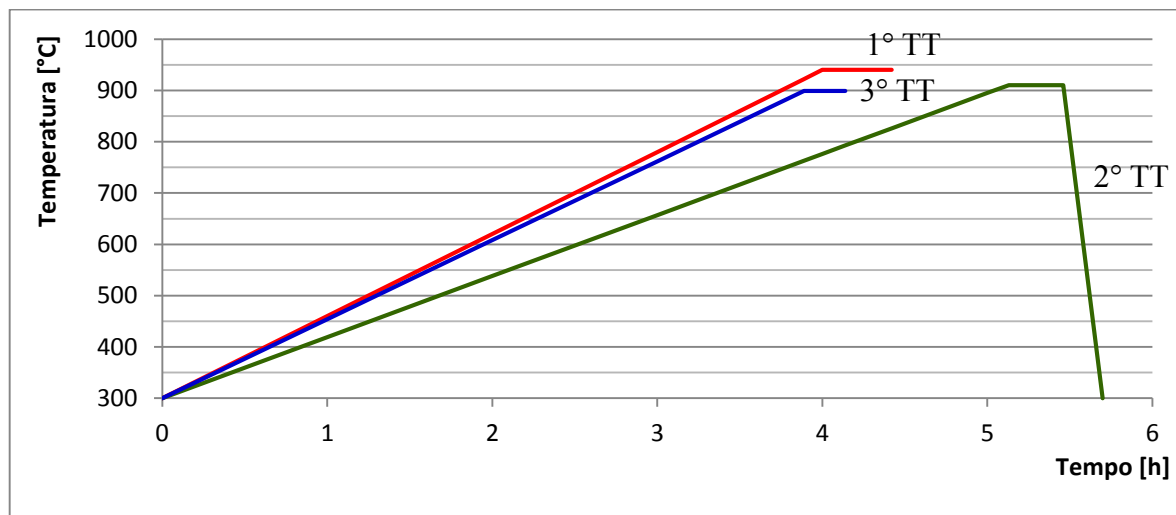
Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Neste TT obtivemos resultados ainda melhores com relação ao patamar, com uma variação observada de 9° C, bem próximos da temperatura mínima de patamar, em um tempo de 15 minutos. Porém não foi possível registrar a velocidade de resfriamento devido ao sistema de termopares não serem móveis; ao retirar o carro do forno, os cabos se rompem, perdendo-se o registro do resfriamento.

Comparando-se os ciclos (Figura 13), podemos verificar que o segundo e terceiro ciclos apresentaram menores variações e ficou numa temperatura mais próxima da mínima, afastando desta forma a possibilidade do ciclo entrar numa condição de recozimento pleno,

assim como a introdução dos ventiladores no resfriamento eliminou a possibilidade da velocidade de resfriamento se aproximar de um resfriamento de recozimento pleno.

Figura 13 - Comparativo dos ciclos de TT



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

4.2 ASPECTOS MICROESTRUTURAIS

As figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam as microestruturas dos 3 ciclos de TT estudados neste trabalho, e uma condição a mais, que seria o material antes da formação do tampo (chapa conforme fornecida).

Na micrografia da chapa nas condições de fornecimento, verificou-se o tamanho de grão 9 (Figura 14) ou seja, um material com tamanhos de grãos pequenos, que favorece a obtenção de uma boa tensão de escoamento devido ao escorregamento ou o deslocamento das discordâncias que devem ocorrer no contorno de grão. (CALLISTER JUNIOR, 2007)

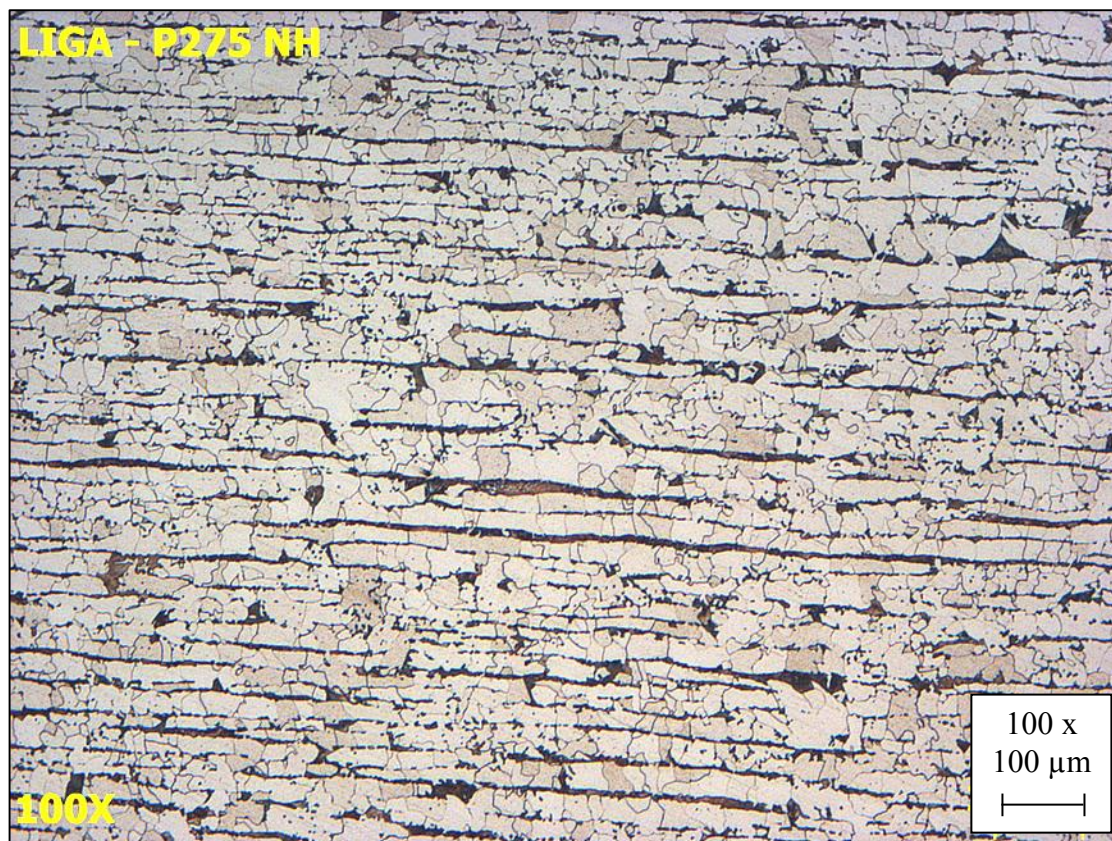
Figura 14 - Micrografia da amostra da chapa conforme fornecida



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

No primeiro TT, a taxa de resfriamento lenta e a variação da temperatura de patamar próximo do máximo especificado contribuíram para o TT se aproximar de um recozimento pleno, que pode ser evidenciado pelo tamanho de grão 4 (Figura 15) encontrado na amostra deste TT.

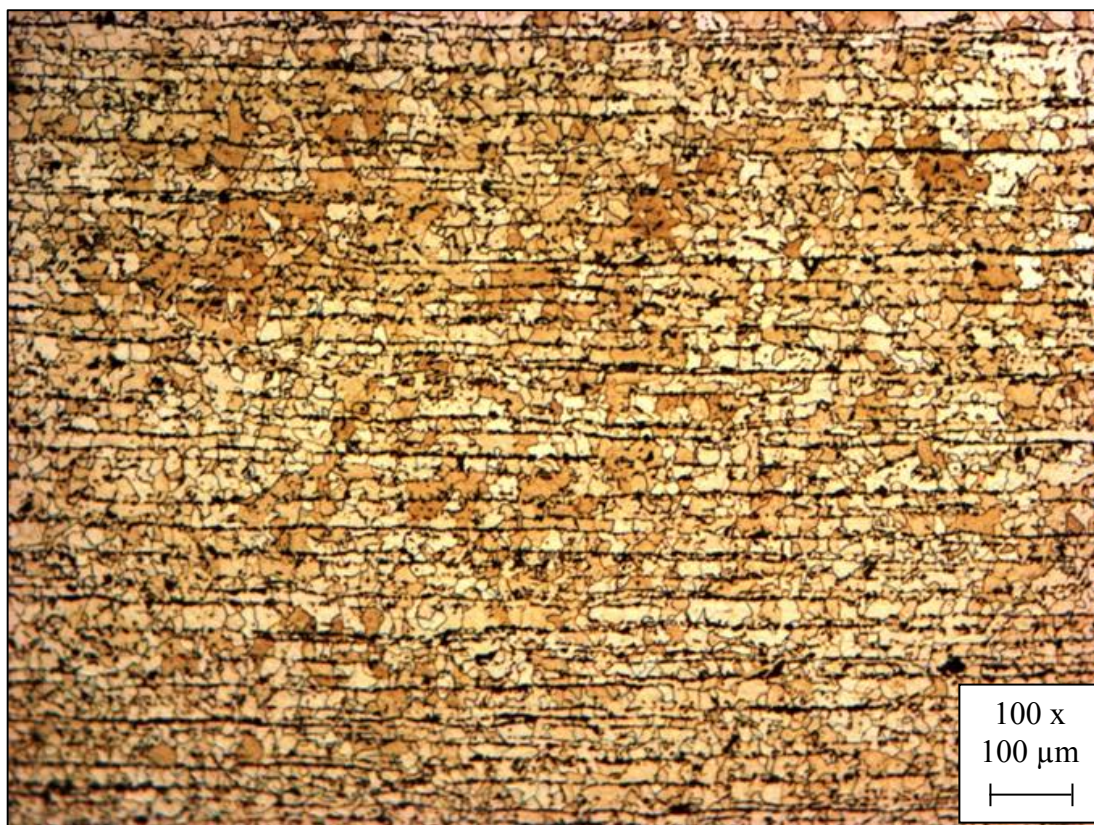
Figura 15 - Micrografia na amostra após o primeiro TT



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

No segundo TT, com um maior controle das temperaturas de patamar e uma velocidade de resfriamento maior, obteve-se um tamanho de grão 8,5 (Figura 16), estando bem próximo ao tamanho verificado na chapa nas condições de fornecimento. Este resultado é considerado satisfatório, visto que o principal é restaurar as propriedades do material.

Figura 16 - Micrografia na amostra após o segundo TT



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Por fim, analisando a amostra do terceiro tratamento térmico fica comprovada a influência da variação da temperatura/tempo de patamar, e da velocidade de resfriamento na obtenção de tamanhos de grão mais refinado tamanho 9 (Figura 17), que garantem a restauração das condições de fornecimento do material, dentro do especificado.

Figura 17 - Micrografia na amostra após o terceiro TT



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

4.3 ANÁLISE DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

Para iniciar os estudos dos ensaios de tração executou-se um ensaio na amostra do material bruto para ser utilizada como referência para os demais ensaios, Figura 19. Neste, verificou-se que o material possui uma boa tensão de escoamento e ruptura, propriedades estas que são importantes para determinar a tensão admissível a ser empregada nos memoriais de cálculo dos tampos, documento em que se define a espessura mínima a ser empregada em cada caso. Uma vez que as especificações mínimas das normas são atendidas, o material pode ser empregado na fabricação dos tampos de acordo com o projeto.

Tabela 10 - Tração prismática da chapa conforme fornecida

Tensão de escoamento [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Alongamento [%]
319	460	24

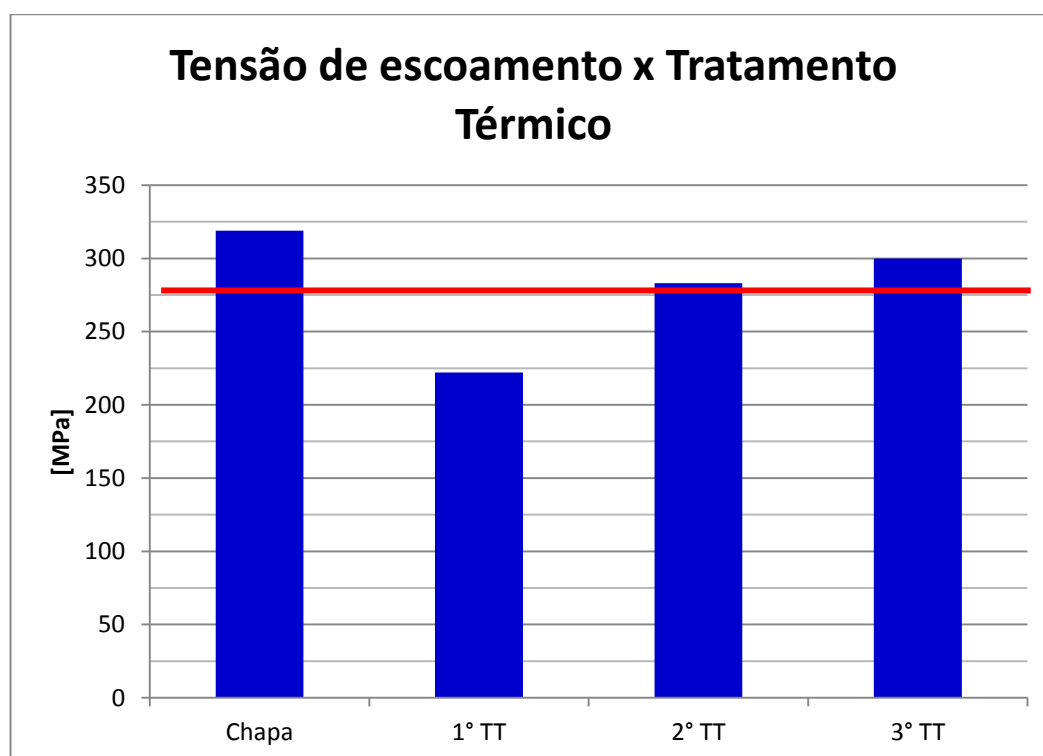
Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Como relatado na tabela acima, a tensão de escoamento está bem acima da especificada, que seria de no mínimo 275MPa. Portanto, o material atende os requisitos com um bom nível de segurança, em vista das necessidades do projeto do tampo.

Os demais ensaios estão relatados nas Tabelas 10 a 12, e permitem observar que após o primeiro TT, as tensões de escoamento e ruptura diminuíram consideravelmente, ficando o material fora do especificado pelo projeto. É provável que este fato tenha sido ocasionado pelo TT, que aumentou o tamanho de grão do material de 9 para 4.

A partir do segundo TT a tensão de escoamento voltou a atender as condições de projeto, mesmo não voltando completamente à condição inicial como demonstrado na Figura 18.

Figura 18 - Comparativo das tensões de escoamento



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Os valores de alongamento das amostras variaram conforme relatado nas Tabelas 11, 12 e 13, estando todos os valores dentro do especificado do projeto que é de no mínimo 20%, fica comprovado que o primeiro TT, devido ao aumento do tamanho de grão, favoreceu o escoamento do material, assim como seu alongamento. (CALLISTER JUNIOR, 2007)

Tabela 11 - Tração prismática primeiro TT

Tensão de escoamento [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Alongamento [%]
222	424	36

Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Tabela 12 - Tração prismática segundo TT

Tensão de escoamento [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Alongamento [%]
283	566	31

Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Tabela 13 - Tração prismática terceiro TT

Tensão de escoamento [MPa]	Tensão de Ruptura [MPa]	Alongamento [%]
300	510	29

Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

Figura 19 – CPs de tração prismática ensaiados



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

4.4 ANÁLISE DOS ENSAIOS DE IMPACTO DO TIPO CHARPY “V”

Os ensaios de impacto foram conduzidos com o objetivo de determinar os valores de energia absorvida das amostras estudadas para cada ciclo térmico. Os valores de energia de impacto absorvidos pelas amostras deve ser de no mínimo 22 J individual e 30 J para a média do set de ensaio que possuem 3 CPs de impacto cada. Para tanto, foram feitos ensaios na

temperatura de 0°C em acordo com as normas, a fim de verificar o comportamento das amostras estudadas dentro de uma faixa mais crítica que ao projeto. (EN, 2009)

Os resultados, conforme a Tabela 14 abaixo ficaram bem acima do especificado, havendo ainda um incremento considerável após os tratamentos térmicos se comparados à condição inicial da chapa.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de impacto

Caso	Individual [J]	Média [J]
Chapa	140	143
	150	
	138	
1º TT	230	230
	236	
	224	
2º TT	252	253
	249	
	259	
3º TT	233	233
	242	
	223	

Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

As amostras apresentaram uma ótima energia absorvida ao impacto, onde os CPs não fraturaram, Figura 20, portanto o material demonstrou não se fragilizar a baixas temperaturas que o projeto necessita, sendo é uma condição crítica a ser verificada para projetos de vasos de pressão.

Figura 20- Fotos do CPs de impacto



Fonte: (CONFAB EQUIPAMENTOS, 2015).

5 CONCLUSÕES

Para tampos fabricados através de conformação a frio em aço P275NH, nas condições de procedimento analisadas neste trabalho (normalização após conformação), pode-se concluir que as propriedades do material podem ser recuperadas de forma a atender os requisitos de projeto.

Esta condição fica bem evidenciada após os ensaios do terceiro tratamento térmico onde o tamanho de grão, tensão de ruptura recuperaram sua condição inicial. A tensão de escoamento após o terceiro tratamento térmico atingiu 309 MPa bem próximo a condição inicial de 312 MPa da chapa conforme fornecida.

Porém o procedimento de tratamento térmico como velocidade de aquecimento, variação da temperatura de patamar, tempo de patamar e a velocidade de resfriamento devem ser bem controlados. Os principais parâmetros que influenciaram foram a velocidade de resfriamento no qual se alcançou os requisitos introduzindo um resfriamento ao ar forçado numa taxa de aproximadamente 42°C/min e a temperatura de patamar variando o mínimo possível dentro de uma faixa de 890 a 910 °C.

Pois se estes não forem bem controlados podem implicar em um tratamento térmico indesejado no material. A exemplo observamos este acontecimento no primeiro ciclo de TT deste estudo, em que se verificou a ocorrência de recozimento pleno do material, quando a normalização era o objetivo. Esta condição de recozimento ficou evidenciada na microestrutura encontrada assim como nas tensões de escoamento e ruptura que apresentaram valores bem abaixo da condição inicial e abaixo da especificação de projeto.

Outra conclusão importante é que o TT de normalização em tampos pode, além de recompor algumas de suas propriedades, melhorar outras como a tensão a ruptura e a energia absorvida no impacto, ou seja, após uma normalização bem controlada o material torna-se mais homogêneo e com melhores propriedades se comparado a um material sem TT, antes mesmo da conformação, como comprovado no segundo e terceiro tratamento térmico que apresentaram valores maiores que a condição inicial.

REFERÊNCIAS

AD 2000 - MERKBLATT. **B4**: design of pressure vessels: dished heads. Berlin: VdTÜV, 2000.

AD 2000 - MERKBLATT. **HP 7/2**: design of pressure vessels: heat treatment - ferritic steels. Berlin: VdTÜV, 2009.

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **ASM handbook: heat treating - volume 4**. Detroit: ASM, 1991

ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL COMMITTEE (Org.). **2013 ASME boiler & pressure vessel code**: VIII division 1 - rules for construction of pressure vessels. New York: The American Society Of Mechanical Engineers, 2013.

ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL COMMITTEE (Org.). **2013 ASME boiler & pressure vessel code**: VIII division 2 – alternative rules - rules for construction of pressure vessels. New York: The American Society Of Mechanical Engineers, 2013.

BRESCIANI FILHO, Ettore (Coord.) **Conformação plástica dos metais**. 5. ed. Campinas: Ed. UNICAMP, 1997. 385 p.

CALLISTER Jr., William D. **Materials science and engineering**: an introduction. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007. 852 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **DIN EN 10028-1**: flat products made of steels for pressure purposes - part 1: general requirements. Berlin, 2009.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo, SP: Artliber, 2005. 260 p.

TELLES, Pedro C. Silva. **Vasos de pressão**. 2. ed. Rio De Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001.