



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DIRCT / DIRGRAD / DECEN

CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

DISCIPLINA PROJETO FINAL II

LUAN ZACHARIAS SILVA

RENAN DENARDI

**ANÁLISE DO CICLO PRODUTIVO DE CUBOS DE RODA FORJADOS PARA A
REDUÇÃO DE NÃO CONFORMIDADES NA MICROESTRUTURA E DUREZA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2011

LUAN ZACHARIAS SILVA

RENAN DENARDI

**ANÁLISE DO CICLO PRODUTIVO DE CUBOS DE RODA FORJADOS PARA A
REDUÇÃO DE NÃO CONFORMIDADES NA MICROESTRUTURA E DUREZA**

Monografia apresentada à disciplina Projeto Final II, do Curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, como requisito para aprovação.

Orientador: Prof. Julio Cesar Klein das Neves, Dr.

CURITIBA

2011

DEDICATÓRIA

Dedicamos o presente trabalho aos nossos pais, que são a base das nossas vidas e de nossa formação humana, além de sempre nos apoiarem nas nossas decisões e enfrentarem os momentos difíceis ao nosso lado.

Além deles, também dedicamos aos nossos familiares, amigos e namoradas, que souberam compreender os momentos de ausência, nos quais estávamos nos dedicando a este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, à empresa WHB, a qual nos permitiu o acesso ao processo e aos dados e nos forneceu os materiais necessários para desenvolvimento do presente estudo, acreditando em nossa capacidade para solucionar um problema que lhe é de grande interesse.

Também agradecemos à instituição, que através dos professores, nos proporcionou durante o período do curso a fundamentação teórica e prática utilizadas para realização desse trabalho.

Por fim, agradecemos ao Prof. Dr. Julio Cesar Klein das Neves, nosso orientador, por ter aceitado fazer parte deste trabalho, sempre disposto a nos ajudar a transpor os desafios que vinham ao nosso encontro.

"A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo".

Albert Einstein

RESUMO

DENARDI, Renan; SILVA, Luan Zacharias. Análise do ciclo produtivo de cubos de roda forjados para a redução de não conformidades na microestrutura e dureza. 2011. 52 f. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

No processo produtivo de cubos de roda forjados, requisitos específicos são colocados por parte do cliente. Essas especificações devem ser atendidas, levando em conta uma tolerância aceitável, tendo como exemplos a microestrutura e dureza da peça em questão. No ciclo analisado, após a peça ser forjada a quente, ela sai da prensa a alta temperatura, é imersa em um tanque de óleo e, então, é levada a um forno, onde permanece por certo tempo. O motivo dessas operações é atender a dureza e a microestrutura solicitadas pelo cliente. No entanto, é necessário que se estabeleça um padrão de operação para a execução com êxito da produção desses cubos de roda, objetivando-se a redução do número de retrabalhos ou refugos do processo. Quando há necessidade de um retrabalho, deve-se refazer o tratamento térmico nas peças que já passaram pela linha de produção, causando um atraso na produção e diminuindo a capacidade da linha. Para a execução do presente trabalho, que tem por objetivo apresentar uma proposta para diminuir o nível de não conformidades, realizou-se uma análise detalhada do processo, mais precisamente dos tempos e temperaturas de tratamento térmico. Tendo como base a teoria de tratamentos térmicos foram realizadas análises metalográficas e medições de dureza. Tendo a microestrutura desejada alcançada, um procedimento padrão foi recomendado, propiciando uma otimização da produção.

Palavras-chave: tratamento térmico, dureza, microestrutura, forjamento.

ABSTRACT

DENARDI, Renan; SILVA, Luan Zacarias. Análise do ciclo produtivo de cubos de roda forjados para a redução de não conformidades na microestrutura e dureza. 2011. 52 s. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

In the production process of forged wheel hubs, specific requirements are placed by the customer. These specifications must be met, taking into account an acceptable tolerance, taking as examples the microstructure and hardness of the piece in question. In the cycle analysis, after the part to be forged hot, she leaves the press at high temperature, is immersed in an oil tank and then moved to an oven, where it remains for some time. The reason for these operations is to meet the request by the costumer. However, it is necessary to establish a standard way of operation for the successful implementation of this production, aiming to reduce the number of rework or scraps of the process. When a rework is needed, there must be another heat treatment on the parts that have already passed through the production line, causing a delay in production and reducing the capacity of the line. For the execution of this work, which aims to reduce this level of non-compliances, will be of great value a detailed analysis of the process, more precisely the times and temperatures of heat treatment. Based on the theory of materials, heat treatments will be performed, and metallographic analysis and hardness measurements will be made to check the microstructure. Having achieved the desired microstructure, a standard procedure will be established, providing an optimal production.

Keywords: heat treatment, hardness, microstructure, forging.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cubo de Roda	13
Figura 2 - Exemplo de uma microestrutura aceitável fornecida pelo cliente	15
Figura 3 - Montagem do cubo de roda no eixo.....	18
Figura 4 - Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.....	20
Figura 5 - Curvas (a) TTT e (b) TRC do aço SAE 5140	23
Figura 6 - Efeito da fragilidade por revenido no ensaio de impacto Charpy realizado em amostras temperadas e revenidas a 620°C de aço 5140.....	24
Figura 7 - Exemplo de uma microestrutura contendo bainita	25
Figura 8 - Exemplo de uma microestrutura contendo sorbita	26
Figura 9 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto	27
Figura 10 - Etapas do Forjamento.....	28
Figura 11 - Microestrutura da peça temperada utilizada para o levantamento dos dados	30
Figura 12 - Microestrutura do estado de fornecimento (ataque de nital 2%).....	31
Figura 13 - Microestrutura da peça tratada na empresa (ataque de nital 2%).....	32
Figura 14 - (a) Cubo de roda para obtenção do anel; (b) Anel obtido a partir da flange do cubo de roda	33
Figura 15 - Amostras obtidas a partir do anel.....	34
Figura 16 - (a) Região para medição de dureza; (b) Amostra obtida a partir do cubo de roda	35
Figura 17 - Curva dureza <i>versus</i> temperatura de revenimento.	38
Figura 18 - Microestrutura da amostra revenida a 620°C (ataque de nital 2%).....	39
Figura 19 - Microestrutura da amostra revenida a 620°C (ataque de nital 2%).....	40
Figura 20 - Microestrutura da peça temperada na empresa	41

Figura 21 - Microestrutura da peça revenida sem cortes a 620°C (ataque de nital 2%).....	43
Figura 22 - Microestrutura da peça revenida sem cortes a 620°C (ataque de nital 2%).....	43
Figura 23 - Gráfico de Resfriamento Temperatura <i>versus</i> Tempo	46
Figura 24 – Esquema proposto de parâmetros de processo.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química em massa – DIN 41Cr4 (próximo ao aço ABNT 5141).....	14
Tabela 2 - Equivalência para o aço entre Norma DIN e SAE	24
Tabela 3 - Dados do processo atual.....	29
Tabela 4 - Dureza da peça temperada utilizada para o levantamento dos dados.....	30
Tabela 5 - Dureza do aço no estado de fornecimento.....	31
Tabela 6 - Dureza da peça tratada na empresa	32
Tabela 7 - Dureza das amostras revenidas na UTFPR (valores em itálico e negrito correspondem à faixa de dureza aceitável).....	37
Tabela 8 - Dureza da peça temperada na empresa	40
Tabela 9 - Dureza das peças tratadas termicamente sem cortes	42
Tabela 10 - Curva de Resfriamento do Material.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

Ø	diâmetro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
HB	dureza Brinell
HV30	dureza Vickers com carga de 30 kgf
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
TTT	Tempo-temperatura-transformação
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Tema	13
1.2	Problema	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Justificativa	16
1.5	Conteúdo do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Cubo de Roda	18
2.2	Tratamento Térmico	19
2.3	Aços da classe 51XX	23
2.4	Microconstituintes	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Materiais	27
3.2	Método Experimental	27
3.2.1	Caracterização do Atual Processo da Empresa	28
3.2.2	Análise do Material no Estado de Fornecimento	31
3.2.3	Análise de Peça Aceitável Produzida pela Empresa	32
3.2.4	Determinação da Curva de Revenimento para o Aço DIN 41Cr4	33
3.2.5	Determinação da Curva utilizando hipótese simplificadora	33
3.2.6	Influência do volume versus resfriamento	35
3.2.7	Influência do Resfriamento do Tarugo	36
3.3	Técnica Experimental	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1	Resultados da Curva de Revenimento	37
4.1.1	Dureza com hipótese simplificadora	37
4.1.2	Microestrutura com hipótese simplificadora	39
4.1.3	Taxa de resfriamento	40
4.2	Influência do Resfriamento do Material	44
4.3	Parametrização do processo	46
5	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE A – LEVANTAMENTO DOS DADOS DE PROCESSO	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Inicialmente, a linha de produção analisada produzia apenas bielas, onde a microestrutura desejada era alcançada somente com a utilização de um resfriamento controlado após o processo de forjamento. Com o início da produção de cubos de roda, o qual tem uma produção anual de 590 mil peças e é mostrado na Figura 1, notou-se que a microestrutura especificada para essa nova peça não estava sendo obtida com a utilização do mesmo processo. A partir de então, o processo de tratamento térmico foi alterado. Introduziu-se um tanque de óleo para têmpera e um forno para posterior revenimento.

Com a modificação, houve uma melhora nos resultados. Mesmo assim, os níveis de refugo, em determinados momentos, atingem metade do total das peças forjadas.

A motivação para o desenvolvimento do projeto em questão é o estabelecimento de um processo padrão, que garanta o atendimento das especificações iniciais de projeto, havendo uma diminuição de não conformidades na produção. Tal redução dar-se-á utilizando os conceitos e conhecimentos de engenharia dos materiais para otimização do tratamento térmico realizado no processo.



Figura 1 – Cubo de Roda

1.2 Problema

Levando em conta uma potencial melhora na produção – em primeiro plano, diminuindo a quantidade de peças refugadas –, a importância do desenvolvimento desse trabalho é aumentada. Demonstrando a forma segura de se trabalhar, e aplicando os conhecimentos da ciência dos materiais, converge-se para a obtenção de peças “conformes”. Como decorrência, essas peças poderão ser encaminhadas para o processo de usinagem, onde se terá a peça acabada e, como atenderá às especificações preestabelecidas do cliente, poderá ser enviada ao mesmo.

O principal problema a ser resolvido é estabelecer a melhor forma de se obter cubos de roda, forjados a quente, com a microestrutura e dureza solicitadas pelo cliente, partindo do material DIN 41Cr4, cuja composição química está descrita na Tabela 1. Sabe-se, por imposição do cliente, que este material não pode ser alterado.

Inicialmente, os tarugos a serem forjados, em forma de barras laminadas de seção circular, são aquecidos a temperaturas entre 1.180 e 1.270 °C. Após o processo de forjamento, os cubos de roda são levados a um tanque de óleo, e após esse procedimento o material é encaminhado para um forno, que se encontra aproximadamente a 650°C, para finalizar o tratamento térmico, onde permanece por aproximadamente quatro horas. Então, o material é retirado e resfriado ao ar por convecção forçada promovida pelo uso de ventiladores. Com esse tratamento térmico, deve-se atingir a microestrutura composta por bainita e sorbita, não podendo existir ferrita proeutetoide, e a dureza de 262 a 302 HBS (275 a 318 HV30). Uma micrografia de um resultado aceitável, composta por sorbita, do tratamento térmico é exemplificada pelo cliente na Figura 2. Tais requisitos serão avaliados, realizando-se análise metalográfica, para verificação da microestrutura, e ensaios de dureza, para verificação dessa propriedade.

Tabela 1 - Composição Química em massa – DIN 41Cr4 (próximo ao aço ABNT 5141)

	% C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Cu	%Al (tot.)
Mín.	0,38	0,50	0,15	-	0,020	0,90	-	0,020
Máx.	0,45	0,80	0,35	0,035	0,040	1,20	0,30	0,050

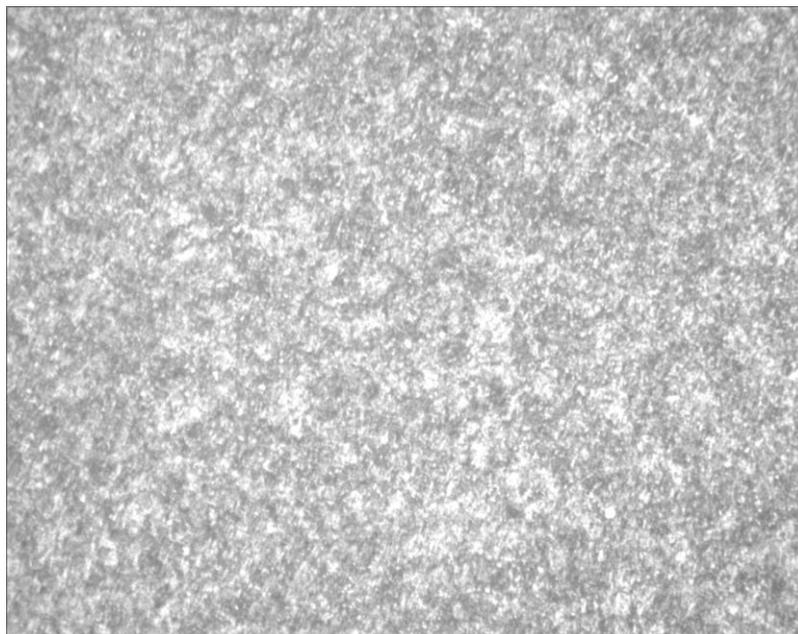


Figura 2 - Exemplo de uma microestrutura aceitável fornecida pelo cliente

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O principal objetivo é desenvolver um método de executar o tratamento térmico, garantindo que a microestrutura e a dureza especificadas sejam atingidas, melhorando assim a confiabilidade e o desempenho do processo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Este trabalho determinou parâmetros para o tratamento térmico das peças, possibilitando o cumprimento do objetivo geral. Alguns desses parâmetros estão listados abaixo:

- curva de resfriamento da peça ao ar;
- temperatura da peça na entrada do tanque de óleo;
- temperatura do forno de revenimento;
- tempo de permanência da peça no forno;

- curva de temperatura de revenimento x dureza da peça.

1.4 Justificativa

Como o procedimento atualmente realizado não foi submetido a uma análise detalhada de tempos e métodos, isso gera grande quantidade de desperdícios, além de atrasos na produção. Padronizando-se parâmetros adequados, é possível propor uma solução padrão para o processo, obtendo-se os resultados desejados sem perdas de materiais, de tempo e de mão-de-obra, entre outros.

Aplicando-se os conhecimentos obtidos durante o estudo da ciência dos materiais, como tratamentos térmicos e técnicas de metalografia e análise, a execução do trabalho se torna facilitada.

Devido à área de materiais ser julgada como extremamente interessante, e pelo fato de o trabalho englobar também conhecimentos do processo de forjamento e, ainda, alguns conceitos de capacidade de linha e tempos de ciclo, delineou-se a motivação em trabalhar nesse projeto.

1.5 Conteúdo do Trabalho

Este projeto de conclusão de curso estabelece o estudo dos parâmetros para a realização do tratamento térmico em cubos de rodas forjados, a partir de um processo já existente.

No Capítulo 2, é apresentada uma revisão da bibliografia que fornece a fundamentação teórica necessária ao desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 3, de um modo geral, contempla os materiais e métodos utilizados no presente trabalho.

O item 3.1 apresenta o processo atual realizado na empresa e alguns parâmetros de importante relevância para desenvolvimento do trabalho.

Em 3.2, o procedimento para análise dos tratamentos térmicos, através da preparação das amostras, é enunciado.

A análise do material no estado de fornecimento é feita no item 3.3

Já em 3.4, é feita a análise de uma peça aceitável tratada termicamente na empresa.

No item 3.5, os diferentes tratamentos térmicos realizados são descritos, de forma a obter a curva de revenimento do material.

Sabe-se que a influência do resfriamento do material é de grande importância. Tal estudo é apresentado no item 3.6.

No Capítulo 4 são relatados os resultados desse estudo parcial.

No Capítulo 5 são expostas as conclusões obtidas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cubo de Roda

O cubo de roda é o elemento mecânico que, juntamente com a ponta de eixo, conecta a roda do automóvel ao eixo de sustentação. Assim, ele serve de apoio tanto para roda, quanto para o pneu. Ele é acoplado ao eixo por um furo central, o qual deve possuir uma pequena tolerância dimensional para garantir a montagem precisa dos componentes. Um esquema simplificado de montagem do eixo é ilustrado na Figura 3, na qual se pode observar o acoplamento do cubo de roda na ponta de eixo.

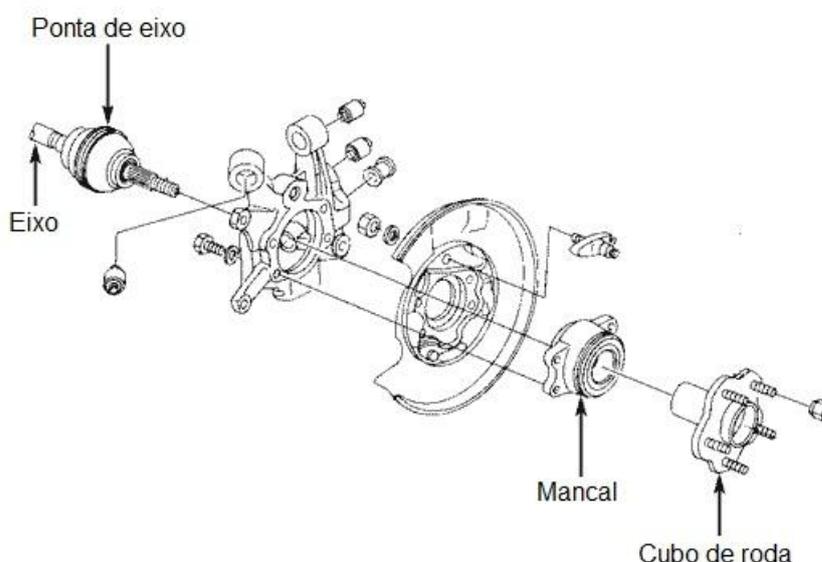


Figura 3 - Montagem do cubo de roda no eixo

Fonte: Adaptada de <http://www.garage411.com/AxlesS13> (acesso em 23/06/2011 às 10:15h)

O cubo deve ser capaz de apoiar rigidamente a roda no eixo sem falha durante seu ciclo de vida esperado. Se a geometria do cubo e seleção de materiais são inadequados, ele pode quebrar ou dobrar completamente. Devido aos altos carregamentos suportados pelo componente em questão, ele deve ser capaz de suportar as vibrações resultantes do movimento do automóvel. Desta forma, deve-se ter um material com elevada tenacidade, o que em geral conduz a um material de uma dureza não muito elevada.

Essas peças podem ser fabricadas em aço e ferro fundido. O primeiro é utilizado em veículos de passeio e, devido ao seu menor tamanho, é facilmente deformável por forjamento e o segundo aplica-se em casos nos quais as peças têm maiores dimensões, como caminhões e máquinas agrícolas, e, por questões de tamanho e econômicas, são fabricadas pelo processo de fundição.

2.2 Tratamento Térmico

Para obtenção da microestrutura e dureza desejadas, os aços devem ser tratados termicamente. Chiaverini (2002) define tratamento térmico como sendo o conjunto de operações de aquecimento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades. Sendo que essas propriedades dependem da sua estrutura.

Chiaverini (2002) também afirma que o resfriamento é o fator mais importante, pois é ele que efetivamente determinará a estrutura e, em consequência, as propriedades finais do aço. Embora para atribuir essa preponderância do resfriamento sobre as demais etapas o autor deva assumir que as demais variáveis foram escolhidas de forma adequada, é certo que com a variação da velocidade de resfriamento pode-se obter diferentes tipos de microestrutura, variando 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 elementos de liga), dimensões das peças, entre outros. Para se determinar o meio de resfriamento, o fator inicial a ser considerado é o tipo de estrutura desejada; no caso do presente trabalho, bainita e sorbita.

Já Callister Jr. (2002) afirma que os procedimentos convencionais de tratamento térmico para produção de aços martensíticos envolvem normalmente o resfriamento rápido e contínuo de uma amostra austenitizada em meios de resfriamento, tais como água, óleo, ar ou, ainda, em gases inertes, embora esses últimos sejam processos menos utilizados.

No presente trabalho, o meio de resfriamento utilizado foi o óleo, devido às instalações já disponíveis na empresa. Sendo esse meio mais rápido que ao ar e mais lento que na água, o resfriamento se dá de forma bastante uniforme na peça, entre a superfície e o núcleo.

Quanto ao resultado de se realizar tratamentos térmicos, Callister Jr. (2002) afirma que tais métodos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando na alteração, mais ou menos pronunciada, de suas propriedades.

Ao se realizar a têmpera, deve-se aquecer o material à sua faixa de austenitização (entre 815 e 875°C) e, após a homogeneização da temperatura, deve-se resfriar a peça de forma rápida, de modo a possibilitar a formação de martensita. Deve-se ter o cuidado de aquecer à temperatura adequada, pois se ela estiver abaixo desta, a austenitização não será completa, levando à formação de ferrita proeutetoide, constituinte de baixa dureza, o que é o contrário do que se pretende. Ainda, não se deve aquecer a temperatura muito elevada, já que isso causaria um superaquecimento, resultando em uma martensita acicular muito grosseira e de elevada fragilidade (Chiaverini, 2002). A Figura 4 esquematiza a operação de têmpera.

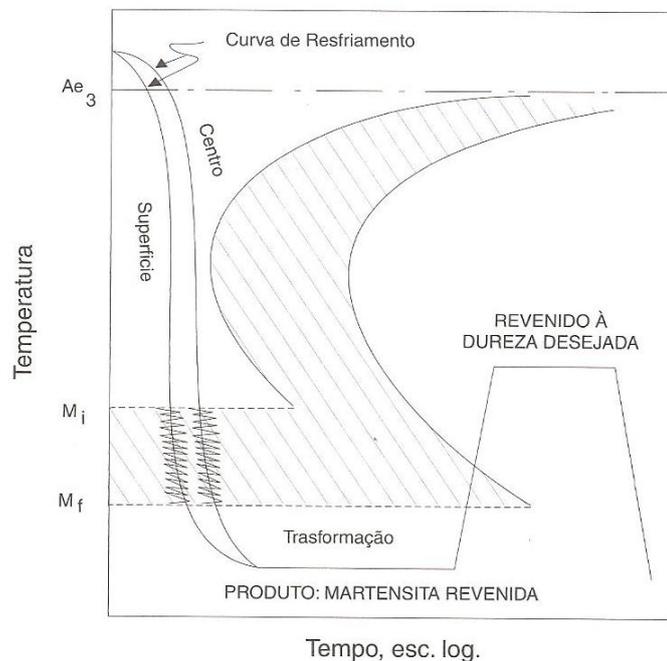


Figura 4 - Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido

Fonte: Chiaverini, 2002, p.99

Segundo Chiaverini (2002), o revenido normalmente acompanha a têmpera, pois elimina a maioria dos inconvenientes produzidos por esta. Esse tratamento, além de aliviar e remover as tensões internas, corrige as excessivas dureza e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque. O autor também recomenda revenir logo após a têmpera, para diminuir a perda de peças por ruptura, a qual pode ocorrer se aguardar muito tempo para realizar o revenido. Além disso, o revenido permite ajustar a dureza do aço temperado para valores desejados. A regra geral seguida pelos os aços de construção mecânica no revenimento é de que quanto maior a temperatura utilizada, menor a dureza final.

Uma interrupção do resfriamento após a têmpera pode fazer com que a transformação da martensita não seja completa. Assim, tem-se austenita retida na microestrutura da peça, microconstituente rico em carbono. Outra possível causa para este fenômeno trata-se do resfriamento do material, que quanto mais lento, maior a possibilidade da retenção da austenita.

Grandes quantidades de austenita retida podem ainda impedir que se atinja a dureza final desejada no aço, porque a austenita pode se transformar num produto mais mole (ferrita mais carboneto) do que a martensita, durante as subsequentes operações de revenido (Chiaverini, 2002).

Na Figura 5 (a), a qual mostra a curva TTT do aço SAE 5140, podem-se observar as transformações na microestrutura que ocorrem nesse material. Também se pode verificar a temperatura até a qual a peça deve ser resfriada para que ocorra a total transformação da martensita, não havendo austenita retida, conforme já abordado.

Callister (2002) atenta para a “fragilização por revenido”, que ocorre quando o aço é revenido a uma temperatura acima de 575°C, seguido por um resfriamento lento até a temperatura ambiente, ou quando o revenido é realizado entre aproximadamente 375 e 575°C. O autor também ressalta que as ligas de aço que são suscetíveis à fragilização por revenido contêm concentrações apreciáveis dos elementos de liga Mn, Ni ou Cr. No caso do aço utilizado, este último elemento está presente em maior quantidade e o primeiro, mesmo que em menor, também o compõe.

Após a realização do tratamento térmico, a peça deve ser analisada. Um dos métodos possíveis trata-se de metalografia. Fazano (1980) propõe que, com o auxílio da metalografia, é possível observar e identificar a granulação do material, a natureza, forma, quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões.

Para se avaliar a influência que o resfriamento exerce na microestrutura após o tratamento térmico, utilizam-se as curvas TTT de resfriamento contínuo (tempo-temperatura-transformação). A curva do aço da peça analisada é mostrada na Figura 5(a).

Segundo (ASM Handbook, V.1, 1990), para a produção de cubos de roda, o material indicado são barras forjadas com teor de carbono por volta de 0,30 a 0,40 % peso e, ainda, possuem mais do que 0,50 % de cromo e, aproximadamente, 0,80 % de manganês em sua composição. Os aços classificados na família SAE 51XX, onde se enquadra o DIN 41Cr4, são caracterizados por possuírem, em sua composição química, principalmente, o elemento de liga cromo e alto teor de manganês. Além destes, possuem também silício.

O cromo tem a característica de formar carbonetos, além de propiciar um aumento da resistência à oxidação e à corrosão. Já o manganês, aumenta a resistência mecânica e a temperabilidade, sendo este último também favorecido pela presença de silício.

41 Cr 4 (SAE 5140)

Composição: 0.44% C - 0.80% Mn - 0.22% Si - 0.030% P -
 0.023% S - 1.04% Cr - 0.17% Cu - 0.04% Mo - 0.26% Ni -
 <0.01% V Austenetizado a 840°C (1544°F)

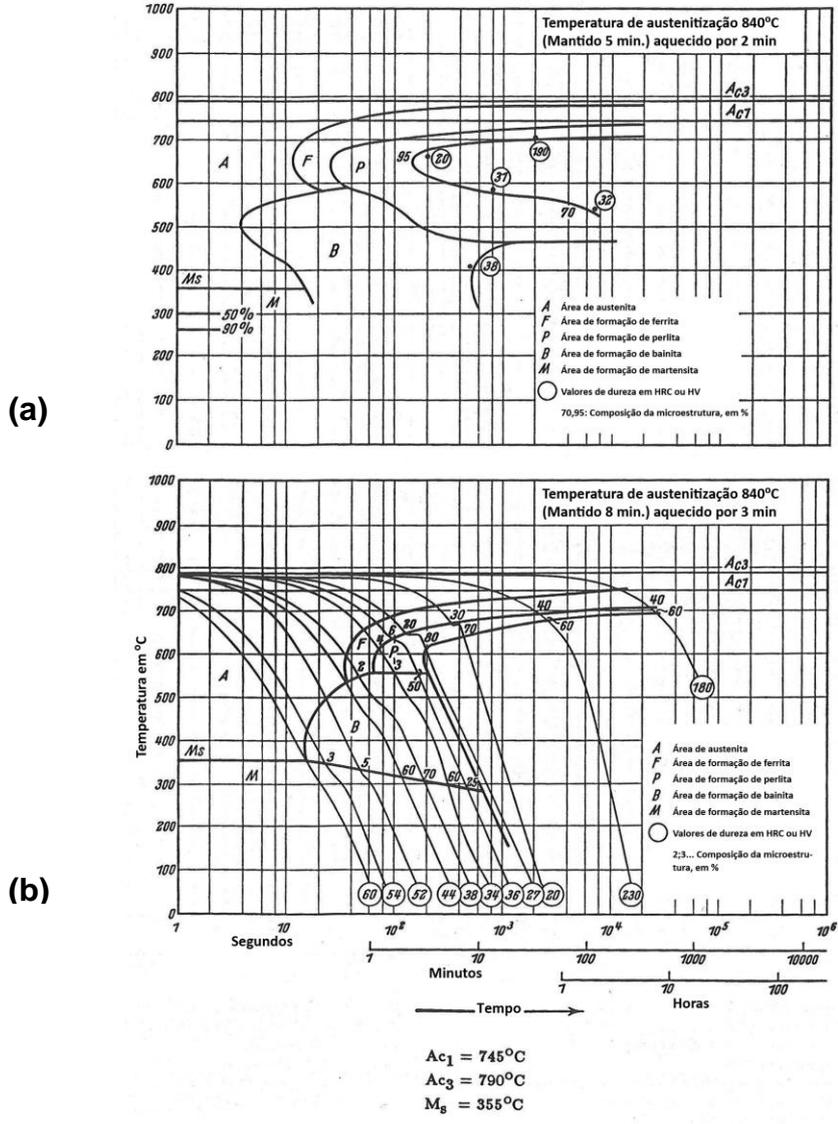


Figura 5 - Curvas (a) TTT e (b) TRC do aço SAE 5140

Fonte: Adaptada de Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels, 1991, p. 126.

2.3 Aços da classe 51XX

Devido à presença desses elementos de liga, dependendo da temperatura de revenido, como visto no item 2.2, pode ocorrer o fenômeno de “fragilização por revenido”. Esse comportamento para o aço SAE 5140, cuja composição está relacionada ao SAE 5140, conforme Tabela 2, é evidenciado na Figura 6.

Tabela 2 - Equivalência para o aço entre Norma DIN e SAE

Fonte: ASM Handbook V. 1, 1990, p. 458

Próximo da Norma SAE	Número DIN	Composição, %								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Outros
5140	1.7035, 41Cr4	0.38-0.45	0.15-0.40	0.50-0.80	0.035	0.035	...	0.90-1.20

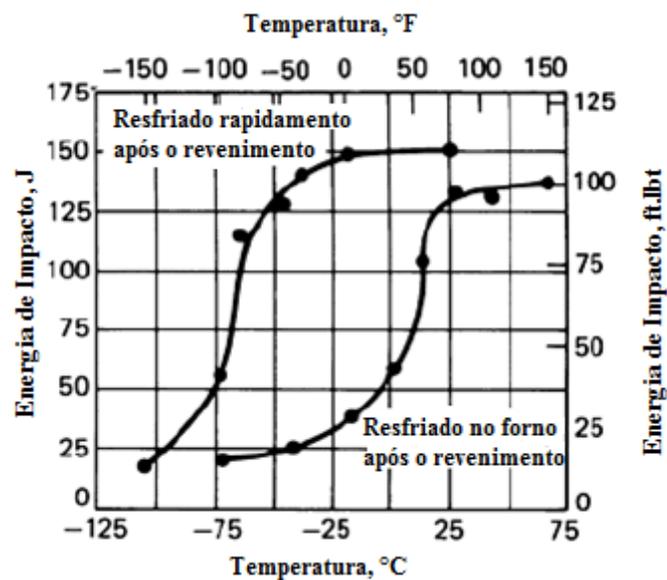


Figura 6 - Efeito da fragilidade por revenido no ensaio de impacto Charpy realizado em amostras temperadas e revenidas a 620°C de aço 5140

Fonte: ASM Handbook V. 4, 1991, p. 321

Na Figura 6, pode-se observar que quando a peça é resfriada no forno após o revenimento, verifica-se um comportamento de transição dúctil-frágil entre as temperaturas de 0 e 25°C, portanto deve-se evitar essa condição de resfriamento. Para isso, utilizando um resfriamento mais rápido, esse comportamento se verifica entre -75 e -50°C, temperaturas mais difíceis de serem atingidas por componentes automotivos.

2.4 Microconstituintes

No presente trabalho, tem-se como objetivo para microestrutura a obtenção de bainita e sorbita.

A bainita é uma mistura não lamelar de ferrita e cementita em uma escala extremamente refinada. Existem dois tipos de bainita: a superior, formada a altas temperaturas e a inferior, formada a baixas temperaturas. A dureza desse microconstituente aumenta com a diminuição da temperatura de formação (ASM Handbook V.4, 1991). Na Figura 7 é apresentado um exemplo da microestrutura.

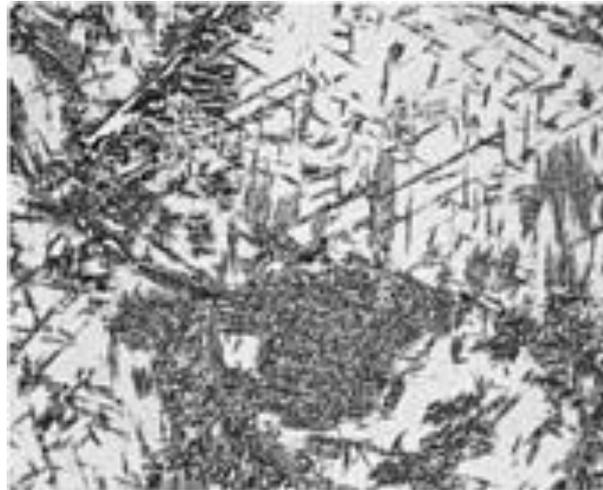


Figura 7 - Exemplo de uma microestrutura contendo bainita
Fonte: ASM Handbook V. 9, 1985, Fig.138

A sorbita é uma fina mistura de ferrita e cementita produzida regulando-se as taxas de resfriamento ou revenindo o aço após temperar. A primeira é uma perlita muito fina que é difícil de visualizar ao microscópio e a segunda trata-se da martensita revenida (ASM Handbook V.4, 1991). A Figura 8 apresenta um exemplo da microestrutura.

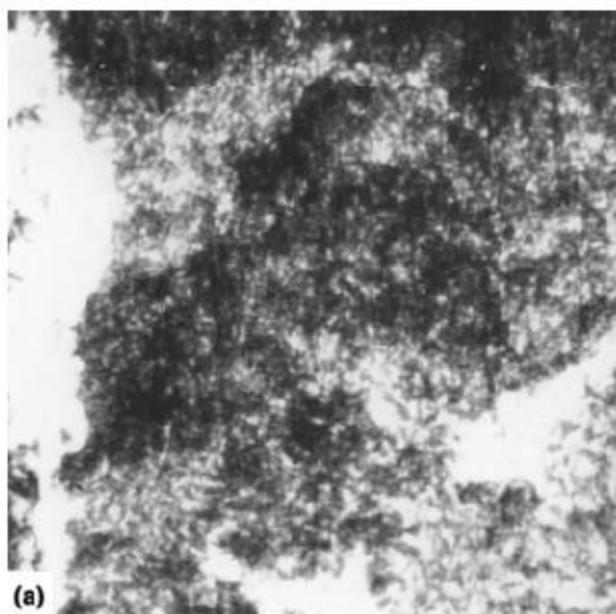


Figura 8 - Exemplo de uma microestrutura contendo sorbita
Fonte: ASM Handbook V. 9, 2004, Fig.4a

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos adotados no decorrer do trabalho.

3.1 Materiais

O material principal dessa análise são barras laminadas de aço DIN 41Cr4, que são posteriormente forjadas, resultando em cubos de roda. A operação subsequente a que esses produtos brutos são submetidos é a usinagem.

3.2 Método Experimental

A Figura 9 mostra o fluxograma das etapas adotadas.

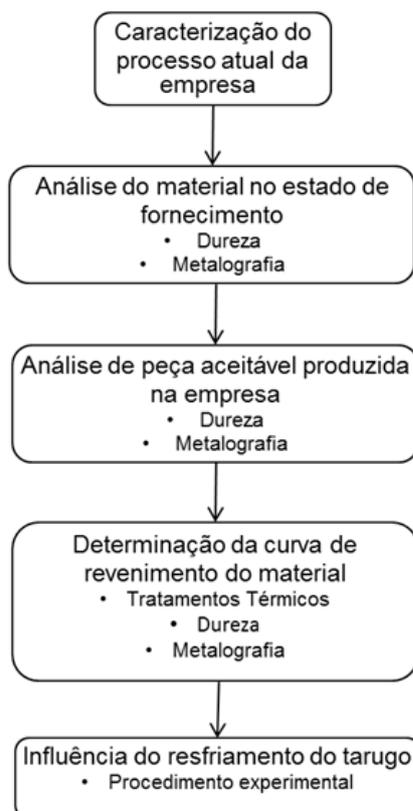


Figura 9 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto

3.2.1 Caracterização do Atual Processo da Empresa

Inicialmente, tarugos de 60,33 mm de diâmetro e 84,2 mm de comprimento, de massa aproximada de 1,890 kg, são transportados por uma esteira no interior de um forno de indução, aquecendo-os entre 1180 e 1270 °C. Após o aquecimento, esses tarugos são encaminhados para o forjamento, o qual é realizado em três etapas: achatamento, preforma e forjamento final, conforme ilustrado na Figura 10.

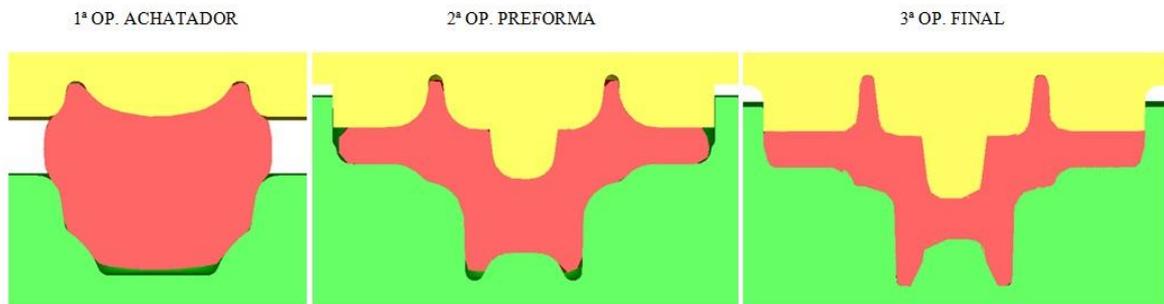


Figura 10 - Etapas do Forjamento

No achatamento, pode-se verificar uma condição de recalque, na qual o tarugo tem sua altura diminuída e seu diâmetro aumentado. Na etapa subsequente, a matriz possui uma forma que se aproxima da condição final. Já na última operação, a peça é conformada com a configuração final, levando-se em consideração as contrações térmicas e o sobremetal a ser deixado para posterior usinagem. Nas três etapas, as matrizes se encontram a uma temperatura de 120°C, para aumentar a forjabilidade e, somado à aplicação de um desmoldante, evitar a incrustação do material no molde.

Conforme Apêndice A, logo após o forjamento, os cubos de roda estão em média a 869°C, e entram no tanque contendo óleo a temperatura de 60°C, a uma temperatura de aproximadamente 660°C. Como a passagem das peças pelo tanque é rápida, elas saem dele a aproximadamente 222°C e são depositadas em um cesto metálico, a fim de que a temperatura ambiente seja atingida.

Atingindo-se certo número de peças temperadas, de acordo com a capacidade do forno de revenimento, o cesto é introduzido neste forno, que se encontra entre 640 e 660°C, e lá permanece por volta de quatro horas.

O resultado desse processo é analisado em laboratório, onde uma amostra por fornada tem sua dureza medida e sua microestrutura analisada. Se as especificações forem atingidas, as peças podem prosseguir no processo. Quando isso não se verifica, dependendo do caso, as peças podem ser retrabalhadas. No caso de dureza acima da faixa aceitável, é feito um novo revenimento; quando abaixo, o que ocorre em 75% dos casos, deve-se temperar e revenir os cubos novamente.

Tendo-se finalizado o processo de tratamento térmico, essas peças são analisadas, em caráter de inspeção final, por um processo de partículas magnéticas, a fim de que trincas superficiais e/ou dobras de forjamento possam ser identificadas. Quando esses defeitos aparecem, as peças são refugadas. Quando aprovadas, podem ser encaminhadas para o processo de usinagem, que ocorre dentro da própria empresa.

Durante esse estudo foi acompanhada a fabricação de um lote de cubos de roda. A Tabela 3 mostra os principais dados do processo medidos para esse lote, levando em conta as médias do levantamento que consta no Apêndice A.

Tabela 3 - Dados do processo atual

Dimensões do tarugo (mm)	Ø60,33 X 84,2
Massa (kg)	1,890
Faixa de temperaturas do forno de indução	1200 A 1250 °C
Temperatura das matrizes	120 °C
Temperatura de saída da prensa	869 °C
Temperatura de entrada na têmpera	660 °C
Temperatura do óleo	60 °C
Temperatura de saída da têmpera	223 °C

A partir do lote no qual foi feito o levantamento dos dados do processo, uma peça que deveria estar na condição apenas temperada foi analisada, a fim de se obter a microestrutura e dureza relativas a essa condição de tratamento térmico.

A Tabela 4 exibe os resultados das medições de dureza para a peça descrita, bem como sua média e desvio-padrão.

Tabela 4 - Dureza da peça temperada utilizada para o levantamento dos dados

	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
HV50	200	204	213	205,7	6,7

Com relação à microestrutura, a micrografia para a peça que deveria estar no estado “como temperado” é apresentada na Figura 11.

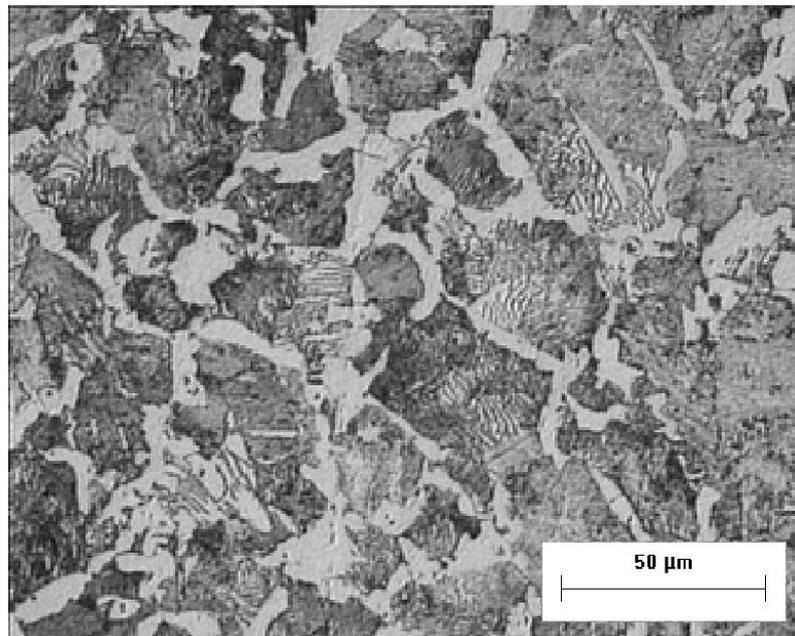


Figura 11 - Microestrutura da peça temperada utilizada para o levantamento dos dados

Da figura, pode-se perceber que os microconstituintes são ferrita e perlita. Assim, depreende-se que a peça pode não ter sido corretamente temperada, ou seja, nesse caso a peça não atingiu o campo de austenitização, como já havia sido evidenciado pelos dados da Tabela 3.

3.2.2 Análise do Material no Estado de Fornecimento

O material a ser forjado é fornecido na forma de barras laminadas de seção circular, de 6 m de comprimento e diâmetro de 60,33 mm. Para verificação das propriedades desse aço foram feitos os procedimentos descritos no item 3.2.

A dureza para o material no estado de fornecimento está explicitada na Tabela 5.

Tabela 5 - Dureza do aço no estado de fornecimento

	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
HV30	224	225	225	224,7	0,5
HB	213	214	214	213,7	0,5

No estado de fornecimento a matéria-prima apresenta microestrutura composta por perlita e ferrita, como se pode observar na Figura 12.



Figura 12 - Microestrutura do estado de fornecimento (ataque de nital 2%)

3.2.3 Análise de Peça Aceitável Produzida pela Empresa

Para se verificar uma peça com propriedades aceitáveis, uma amostra foi retirada de um cubo de roda tratado na empresa, o qual foi aprovado segundo as especificações do cliente.

A dureza correspondente para essa amostra, após têmpera e revenido, é apresentada na Tabela 6, pode-se verificar que a dureza está dentro da faixa especificada, ou seja, 262 a 302 HB.

Tabela 6 - Dureza da peça tratada na empresa

	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
HV30	304	301	299	301,3	2,1
HB	289	286	284	286,3	2,1

Conforme especificação do cliente a microestrutura dessa peça deve estar isenta de ferrita livre e ser constituída por bainita e sorbita. Pode se observar que as exigências foram atendidas conforme a Figura 13, a qual traz a microestrutura isenta de ferrita livre e composta por martensita revenida em alta temperatura, ou seja, sorbita.

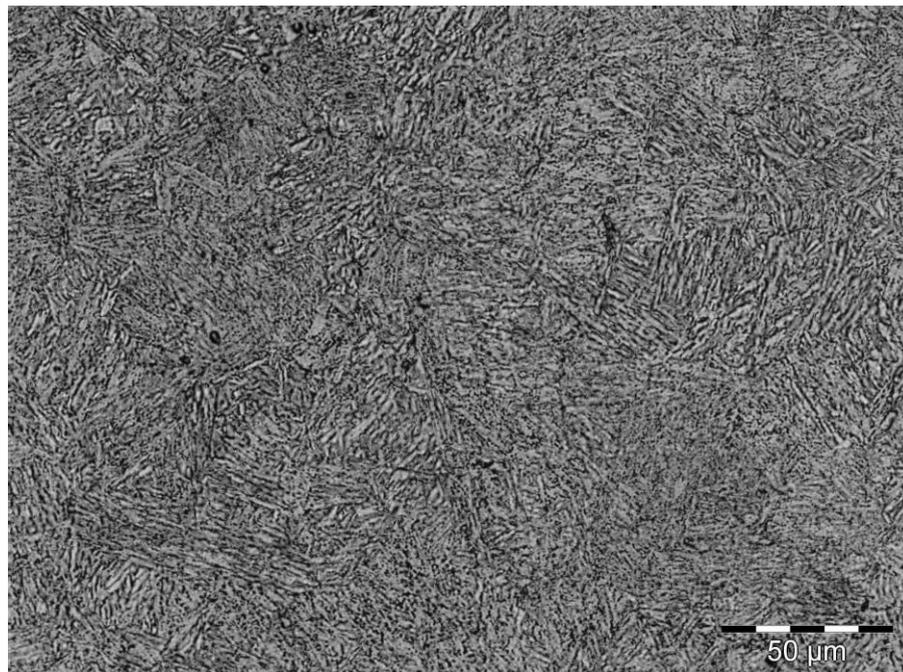


Figura 13 - Microestrutura da peça tratada na empresa (ataque de nital 2%)

3.2.4 Determinação da Curva de Revenimento para o Aço DIN 41Cr4

A fim de se analisar a fundo os efeitos dos tratamentos térmicos de têmpera e revenido em cubos de roda forjados a quente, a metodologia adotada foi tratar termicamente amostras obtidas a partir de um cubo de roda, em uma condição de têmpera e a diferentes temperaturas de revenido, e verificar as alterações na microestrutura e dureza.

3.2.5 Determinação da Curva utilizando hipótese simplificadora

Para uma análise inicial, um anel foi obtido a partir da flange de um cubo de roda, a qual possui a espessura mais crítica para avaliação da dureza, conforme se pode observar na Figura 14.



Figura 14 - (a) Cubo de roda para obtenção do anel; (b) Anel obtido a partir da flange do cubo de roda

Esse anel foi cortado em diversas partes de aproximadamente 20 mm x 20 mm, a fim de perfazer o número necessário de amostras para análise. Foram obtidas cerca de 20 amostras; algumas delas estão ilustradas na Figura 15.

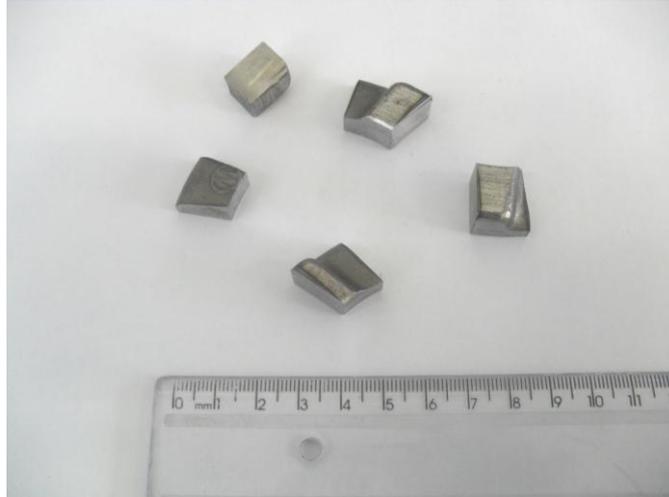


Figura 15 - Amostras obtidas a partir do anel

Com as amostras obtidas, os tratamentos térmicos foram realizados em um dos fornos da UTFPR. A fim de evitar problemas de divergências entre a leitura do *display* e a temperatura real do forno, foi realizada uma contracheragem utilizando um termopar tipo K. Este procedimento permitiu determinar que a temperatura indicada no forno varia de 8 a 12°C a menos do que a medida no meio da câmara, onde estavam as peças.

Como tratamento inicial, todas as amostras obtidas foram pré-aquecidas a 600°C durante 12 minutos, a fim de minimizar o gradiente térmico entre a peça e o forno subsequente no qual as peças foram temperadas. Em seguida foram levadas a um forno a 850°C e deixadas 15 minutos dentro deste para homogeneização da temperatura nas amostras. Então, foram retiradas do forno e imersas em um tanque de óleo a temperatura de 15°C agitando-as e, assim, realizando o tratamento de têmpera. Posteriormente cada uma delas passou por um tratamento de revenimento a diferentes temperaturas. Foram utilizadas as temperaturas de 200, 300, 400, 500, 530, 560, 590, 620, 650, 680 e 700°C. Após esses tratamentos as amostras foram preparadas conforme procedimento padrão e suas durezas foram avaliadas a fim de gerar um gráfico de temperatura de revenimento *versus* dureza.

3.2.6 Influência do volume versus resfriamento

A fim de verificação, os tratamentos foram refeitos, utilizando cubos de roda inteiros, ou seja, sem cortes como feito inicialmente. Foram selecionadas cinco temperaturas, dentre as quais três resultaram em durezas aceitáveis, e as outras duas sendo uma acima do limite superior e outro abaixo do limite inferior.

Para realização dos tratamentos, foram utilizadas peças temperadas na própria empresa, refletindo as condições do processo. As temperaturas para revenimento foram de 560, 590, 620, 650 e 680°C, como justificado acima.

Após esses procedimentos, as amostras foram cortadas conforme Figura 16. Segundo especificação do cliente, a região de análise da dureza e microestrutura deve ser em um corte central na espiga, entre 20 e 25 mm a partir da extremidade. Suas durezas foram avaliadas a fim de verificar a influência do volume *versus* resfriamento.



(a)

(b)

Figura 16 - (a) Região para medição de dureza; (b) Amostra obtida a partir do cubo de roda

Também foi analisada uma peça desse lote com o tratamento térmico apenas de têmpera, sem revenimento, para poder verificar se esse lote estava ou não dentro da especificação do cliente.

3.2.7 Influência do Resfriamento do Tarugo

Como ferramenta auxiliar, a curva de resfriamento do tarugo foi obtida, através de experimento, onde o material aquecido foi resfriado ao ar e sua temperatura foi tomada em intervalos de tempo de 5 segundos. O resfriamento foi analisado nesse meio para a verificação do tempo máximo até a peça atingir a temperatura recomendada para imersão no meio de têmpera, em óleo, que não deve ser inferior a 820°C. Dessa forma determina-se o tempo máximo que a peça pode levar entre sair da matriz e entrar no tanque de têmpera.

3.3 Técnica Experimental

Para realização dos experimentos, as amostras foram preparadas a fim de facilitar a manipulação das mesmas. Amostras de aproximadamente 20 mm por 20 mm foram embutidas a quente em baquelite por 20 minutos, sendo 5 minutos para preaquecimento, 10 minutos de aquecimento efetivo e 5 minutos para resfriamento.

Após o embutimento, os cantos vivos foram lixados a fim de evitar acidentes e danificação nos aparelhos durante os procedimentos seguintes. Então, as amostras foram lixadas em quatro lixas de diferentes granulometrias, partindo-se da lixa mais grossa para a mais fina. A cada troca de lixa a amostra foi girada em 90°, partindo-se para a próxima sempre que os sulcos da anterior não mais pudessem ser vistos.

Em seguida, as amostras foram polidas utilizando solução de alumina 1 µm juntamente com água. Após a superfície estar espelhada, foi feito o ataque químico utilizando solução de Nital 2% para revelação da microestrutura.

A medição de dureza foi realizada no laboratório de Materiais da UTFPR, utilizando o durômetro ENCO. Foi utilizado um penetrador de diamante piramidal, obtendo-se os valores na escala HV30, os quais também foram convertidos para escala HBW, a fim de se comparar com a especificação do cliente. Cada amostra foi medida três vezes e o valor final corresponde à média das três medições.

A análise metalográfica foi feita também nos laboratórios da UTFPR utilizando o microscópio ótico Olympus.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e feitas discussões sobre os mesmos.

4.1 Resultados da Curva de Revenimento

4.1.1 Dureza com hipótese simplificadora

As durezas obtidas após realização do procedimento de tratamentos térmicos, conforme detalhada no item 3.4 são ilustradas na Tabela 7. Os valores destacados em itálico e negrito correspondem à faixa de dureza aceitável, a qual é de 275 a 318 HV30.

Tabela 7 - Dureza das amostras revenidas na UTFPR (valores em itálico e negrito correspondem à faixa de dureza aceitável)

Temperatura (°C)	Dureza (HV 30)				
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
200	607	606	593	602,0	7,8
300	543	548	545	545,3	2,5
400	464	474	474	470,7	5,8
500	379	385	391	385,0	6,0
530	351	356	351	352,7	2,9
560	357	350	354	353,7	3,5
590	304	311	304	306,3	4,0
620	300	296	297	297,7	2,1
650	277	276	276	276,3	0,6
680	246	247	246	246,3	0,6
700	242	241	244	242,3	1,5

A partir dos dados obtidos na Tabela 7, pode-se gerar o gráfico ilustrado na Figura 17.

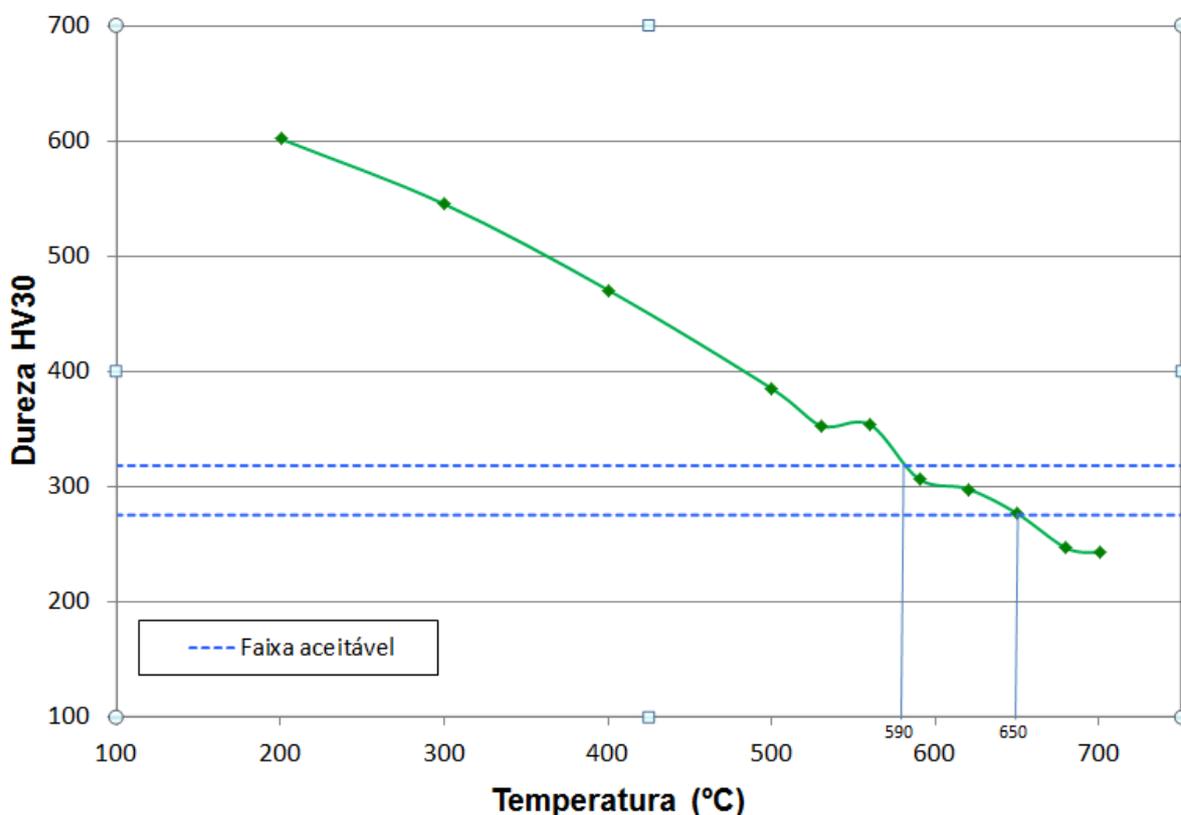


Figura 17 - Curva dureza versus temperatura de revenimento.

Três condições dentre as avaliadas atenderam à faixa de dureza solicitada. A amostra revenida a 620°C foi selecionada para análise metalográfica por estar aproximadamente na região intermediária da faixa aceitável.

Verificou-se que a dureza medida na peça, cujo tratamento foi realizado na empresa, não corresponde ao resultado obtido experimentalmente neste trabalho. Uma provável causa para essa divergência é a temperatura à qual a peça deixa o tanque de óleo, 220°C. Nesta temperatura, já tem a transformação de martensita finalizada, conforme curva TRC, Figura 5 (b). Porém essa temperatura foi medida por sensor infravermelho na superfície do material. Em seu interior a temperatura deve ser superior a 220°C, o que ainda gera a transformação de martensita após a têmpera, gerando austenita retida.

4.1.2 Microestrutura com hipótese simplificadora

A amostra revenida a 620°C foi selecionada para análise metalográfica por estar aproximadamente na região intermediária da faixa aceitável. O resultado da metalografia realizada pode ser verificado na Figura 18. A ampliação utilizada, foi a mesma que as outras metalografias, a fim de compararmos as microestruturas com a mesma ampliação.

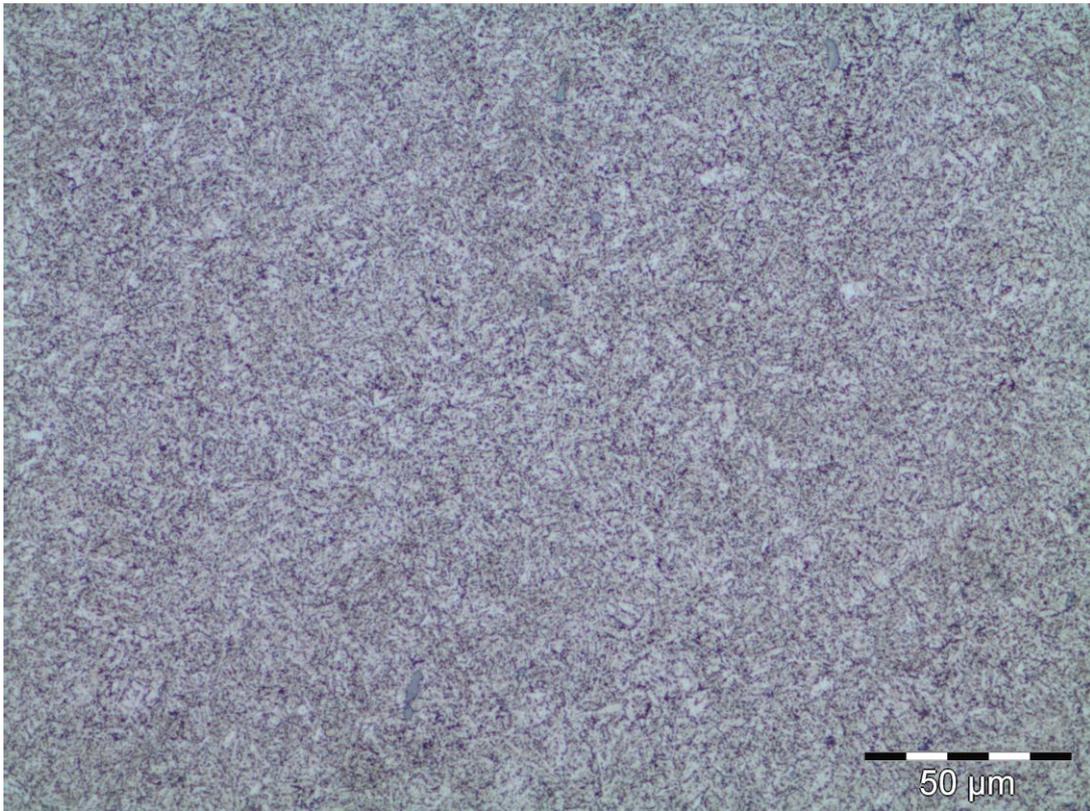


Figura 18 - Microestrutura da amostra revenida a 620°C (ataque de nital 2%).

Devido à dificuldade para avaliar a microestrutura resultante na Figura 18, uma outra micrografia foi tirada com uma ampliação maior. Na Figura 19 é apresentada a imagem adquirida nessas condições.

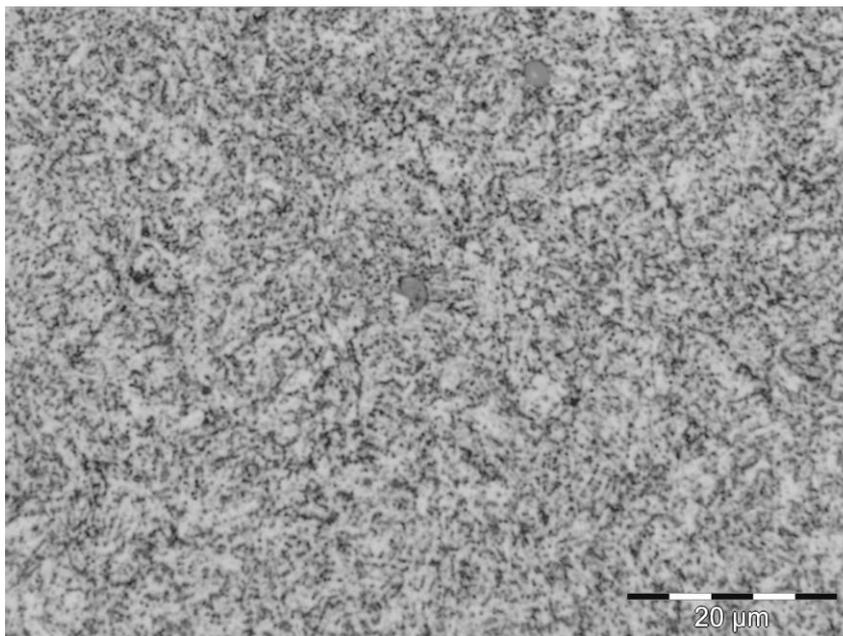


Figura 19 - Microestrutura da amostra revenida a 620°C (ataque de nital 2%).

Nota-se uma diferença entre a amostra obtida a partir do processo da empresa e a amostra analisada a partir de tratamento térmico realizado na UTFPR, observa-se uma estrutura de martensita revenida muito mais refinada nesta em relação àquela – material da empresa. Isto se dá devido ao retratamento térmico produzir um refinamento dos grãos e também devido a influência da taxa de resfriamento do material.

4.1.3 Taxa de resfriamento

Inicialmente, foi avaliada a peça apenas temperada na empresa, a fim de se verificar se esse lote de peças estaria propício ao revenimento. A dureza resultante dessa peça é mostrada na Tabela 8, e sua microestrutura na Figura 20.

Tabela 8 - Dureza da peça temperada na empresa

Dureza (HV 30)				
Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
644	631	614	629,7	15,0

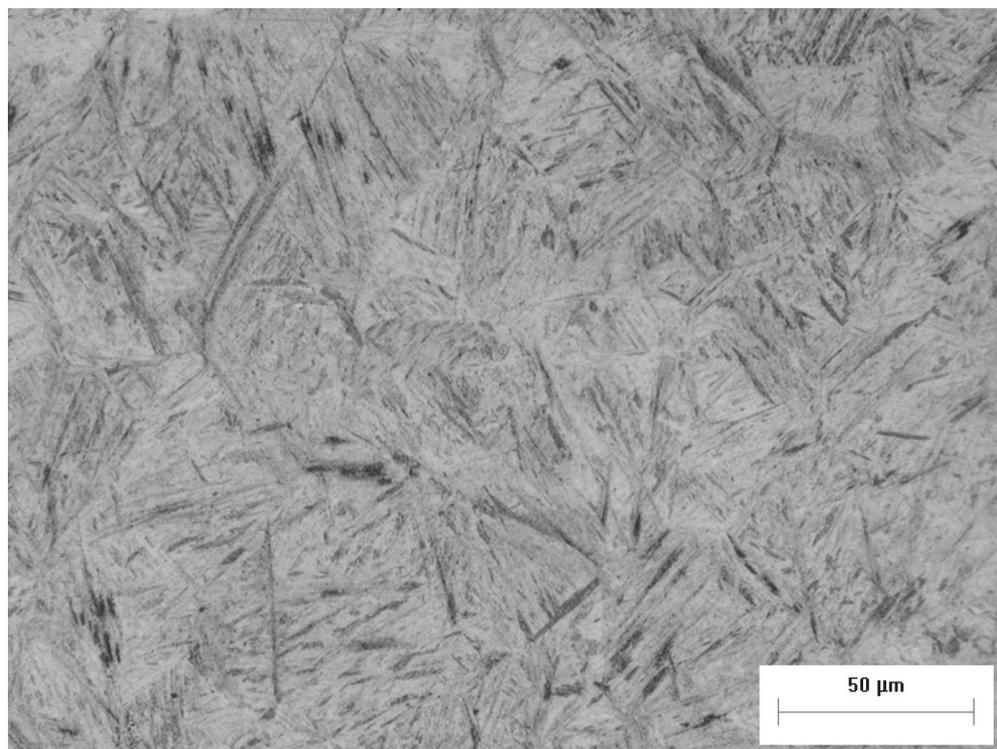


Figura 20 - Microestrutura da peça temperada na empresa

Comparando as Tabelas 7 e 8, nota-se que essa peça foi temperada a uma temperatura maior do que o lote analisado para levantamento dos dados. Comparando a microestrutura da Figura 20 com a da Figura 11, pode-se verificar a diferença também do efeito da têmpera. Nesta, a microestrutura é composta por martensita, a qual após o revenimento estará refinada, conforme será abordado, enquanto aquela mostrada na Figura 11 possui perlita e ferrita, evidenciando que efetivamente a têmpera não foi realizada de forma correta.

Com as novas amostras preparadas a partir do tratamento térmico no cubo de roda sem cortes, a dureza foi avaliada, gerando a Tabela 9.

Tabela 9 - Dureza das peças tratadas termicamente sem cortes

Temperatura (°C)	Dureza (HV 30)				
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média	Desvio Padrão
560	353	350	351	351,3	1,5
590	317	314	318	316,3	2,1
620	306	315	311	310,7	4,5
650	279	283	284	282,0	2,7
680	236	235	235	235,3	0,6

Comparando as durezas médias das Tabelas 7 e 9, nota-se que os valores são próximos. Dessa forma, a hipótese adotada para determinação da curva revenimento pode ser considerada válida. Portanto, deduz-se que para o material em questão e as dimensões do componente analisado, a distribuição de durezas não foi influenciada pela forma e volume das amostras. Ou seja, a temperabilidade do material permite que os resultados de dureza obtidos em amostras pequenas (seccionadas de um cubo) se reproduzam para cubos inteiros. Esses resultados permitiram que, em análises futuras realizadas pela empresa, amostras menores possam ser utilizadas aumentando a praticidade das operações e diminuindo-se o uso de material.

Quanto à microestrutura, a amostra selecionada para análise foi aquela cuja temperatura de revenimento foi de 620°C, a qual a dureza se aproxima mais do centro do intervalo. A microestrutura relativa a essa temperatura é mostrada na Figura 21. A ampliação foi selecionada, devido às outras micrografias já estarem com esse mesmo valor, para efeito de comparação.

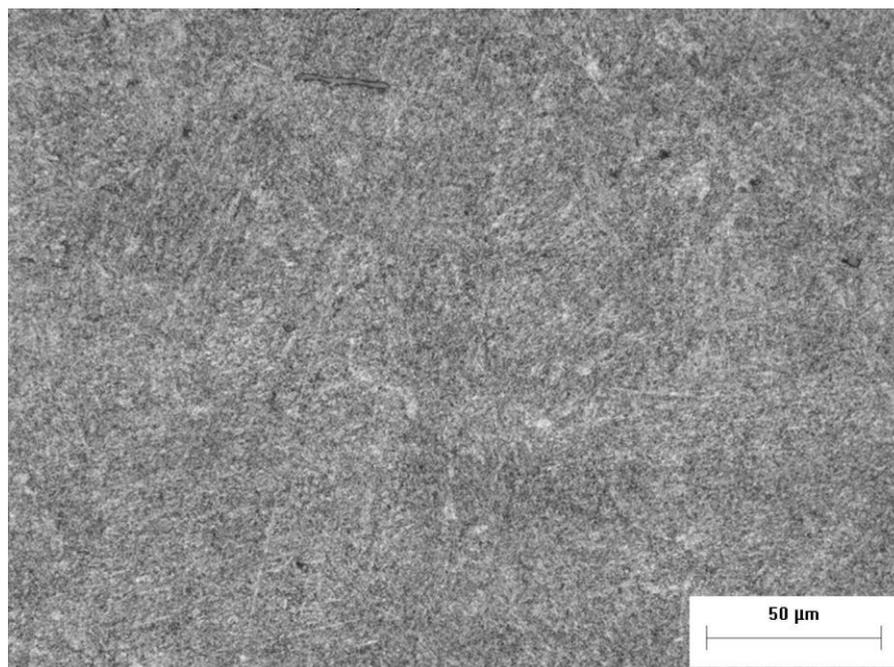


Figura 21 - Microestrutura da peça revenida sem cortes a 620°C (ataque de nital 2%).

Como realizado em 4.1.2, devido à dificuldade de visualização da microestrutura resultante dos tratamentos térmicos que foram realizados na peça, uma outra fotografia foi tirada, tendo a ampliação sido aumentada. Essa fotografia é apresentada como Figura 22.

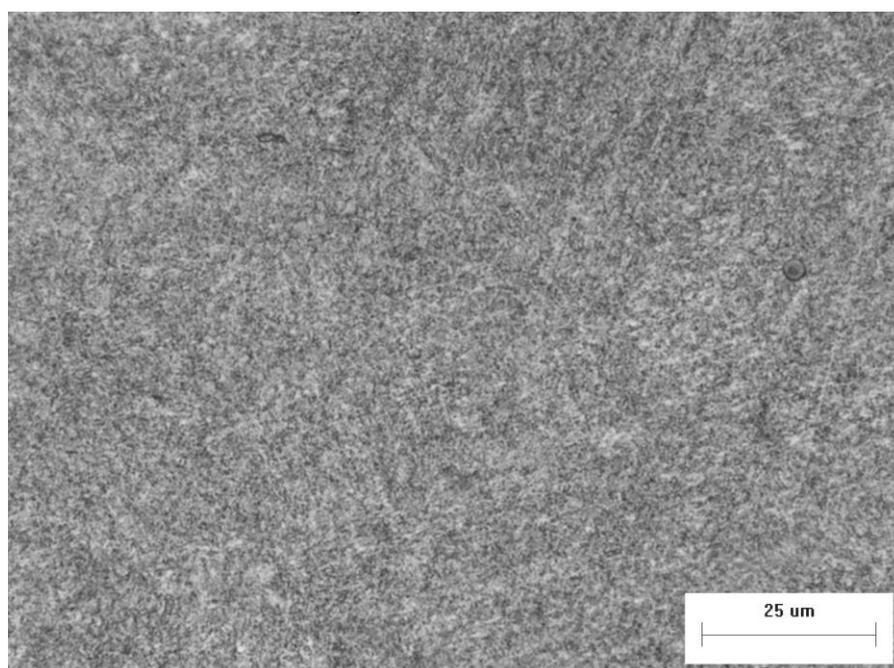


Figura 22 - Microestrutura da peça revenida sem cortes a 620°C (ataque de nital 2%).

A Figura 22 apresenta uma microestrutura composta por martensita revenida muito refinada, se for comparada à Figura 19, que representa o tratamento térmico realizado em apenas um pedaço da peça. Assim, pode-se concluir que o efeito do tratamento na peça inteira, sem cortes, é um refinamento um pouco mais intenso, melhorando a microestrutura do produto final.

Após a análise dessa peça, a qual foi fornecida pela empresa já temperada, pode-se também notar que nesse caso, o lote está de acordo com a especificação do cliente, sendo um lote aprovado, diferente do que ocorreu com o lote analisado para levantamento dos dados do processo.

4.2 Influência do Resfriamento do Material

Os dados obtidos no experimento realizado em 3.5 (Influência do Resfriamento do Tarugo) estão ilustrados na Tabela 10.

Tabela 10 - Curva de Resfriamento do Material

Tempo (s)	Temp. 1 (°C)	Temp. 2 (°C)	Temp. 3 (°C)	Média (°C)	Desvio Padrão (°C)
0	971	975	972	972,7	2,1
5	965	969	968	967,3	2,1
10	935	938	940	937,7	2,5
15	917	910	912	913,0	3,6
20	915	908	907	910,0	4,4
25	906	900	903	903,0	3,0
30	887	891	887	888,3	2,3
35	881	881	883	881,7	1,2
40	872	869	868	869,7	2,1
45	857	854	858	856,3	2,1
50	852	849	848	849,7	2,1
55	846	842	843	843,7	2,1
60	840	836	833	836,3	3,5
65	817	813	815	815,0	2,0
70	806	801	800	802,3	3,2
75	798	797	795	796,7	1,5
80	786	785	783	784,7	1,5
85	773	770	771	771,3	1,5
90	770	768	765	767,7	2,5
95	767	766	763	765,3	2,1
100	762	760	759	760,3	1,5
105	758	755	756	756,3	1,5
110	750	748	746	748,0	2,0
115	745	742	742	743,0	1,7
120	740	740	739	739,7	0,6
125	732	733	730	731,7	1,5
130	728	726	726	726,7	1,2
135	720	721	718	719,7	1,5

Com os dados da Tabela 10, obtém-se a curva de resfriamento do tarugo no ar, a partir de uma temperatura equivalente àquela na entrada da prensa. Tal curva é ilustrada na Figura 23.

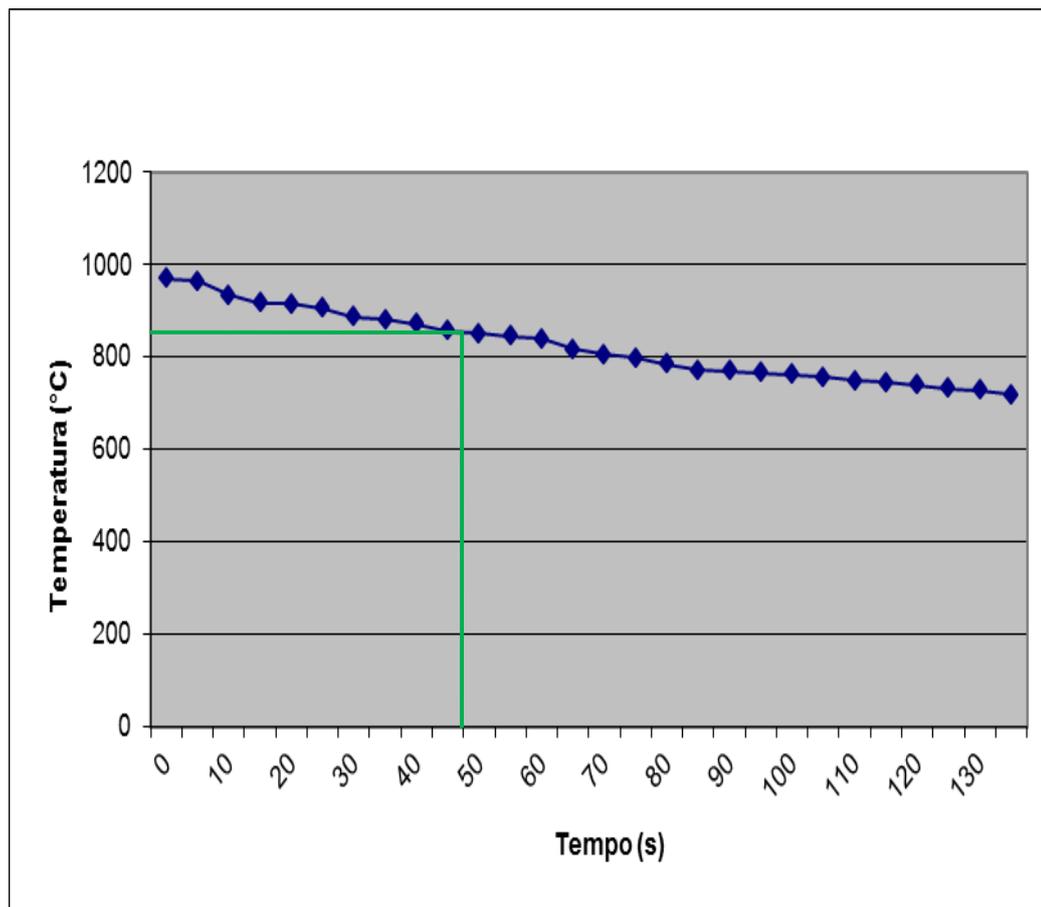


Figura 23 - Gráfico de Resfriamento Temperatura versus Tempo

Com a obtenção desse gráfico podemos determinar o tempo máximo que o cubo de roda pode esperar para ser imerso no tanque de óleo após o forjamento. Esse tempo, conforme podemos verificar na Figura 25 é de no máximo 50 segundos.

4.3 Parametrização do processo

Para resolver a questão, propõe-se um esquema de parametrização do processo, reduzindo retrabalhos e refugos, o que foi proposto no início do trabalho, mostrado na Figura 24.

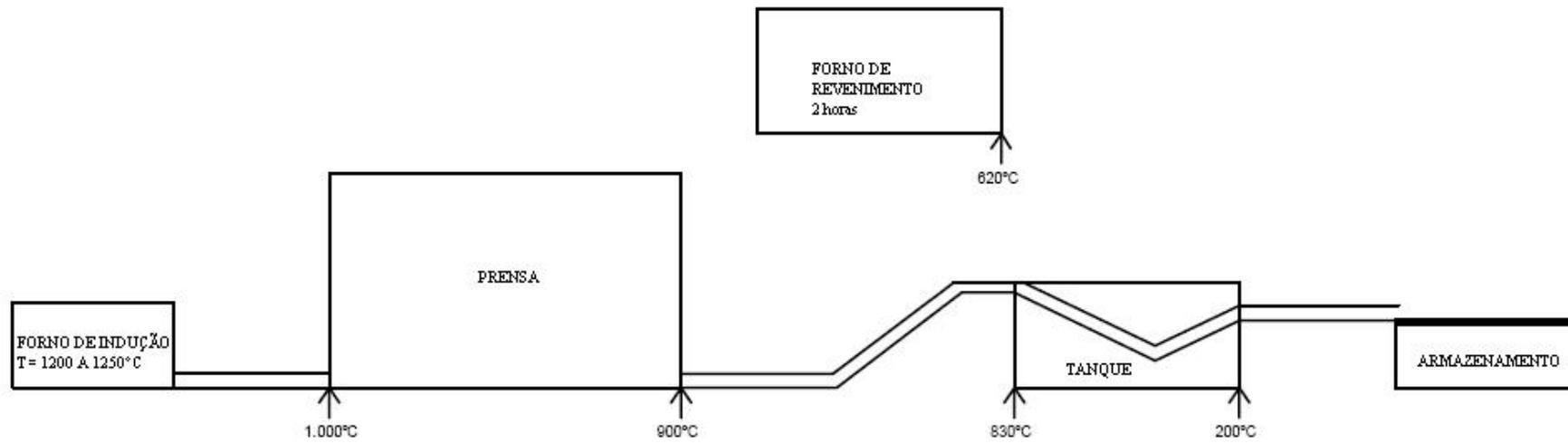


Figura 24 – Esquema proposto de parâmetros de processo

Para chegar a esses valores, algumas alterações na linha de produção deverão ser feitas. A seguir, segue uma lista de recomendações acerca disso:

1. A temperatura de saída do forno não será alterada, levando-se em conta que se for diminuída não chegará ao tanque à temperatura suficiente e se for aumentada poderá causar transformações no material;
2. A temperatura de entrada na prensa deverá ser aumentada para 1000°C. Para isso, pode-se aumentar a velocidade da esteira que liga o forno à prensa. Uma outra possibilidade seria diminuir a distância entre essas duas máquinas, porém isso não pode ser feito, pois existe um rolo laminador entre elas, utilizado somente para a produção de bielas;
3. A temperatura de saída da prensa será aumentada para 900°C, mantendo a diferença entre entrada e saída da prensa, para que o tempo de forjamento não precise ser modificado, levando em conta que a máquina já trabalha próxima a sua capacidade máxima;
4. A temperatura na entrada do tanque de têmpera será aquela que sofrerá maior alteração. Para possibilitar que a temperatura de 830°C seja atingida, a velocidade da esteira entre a prensa e o tanque deverá ser aumentada ou a distância entre as operações, diminuída. É possível que as duas alterações sejam necessárias. É imprescindível que o controle de temperatura nesse ponto do processo seja constante, preferencialmente automatizado, e que necessariamente tenha não observação da temperatura cause intervenção no processo no sentido de segregar peças, ou interromper o processo;
5. Para garantir que a temperatura de saída do tanque de têmpera seja diminuída para 200°C, a velocidade da esteira que transporta os cubos pelo óleo deverá ter seu valor ligeiramente decrescido;
6. Quanto ao revenimento, conforme estudos realizados, se as demais sugestões foram aceitas, pode-se diminuir a temperatura para 620°C e o tempo para 2 horas, parâmetros suficientes para se atingir a dureza solicitada.

Um ponto que vale a pena ressaltar é que as peças, após serem temperadas não devem aguardar muito tempo para passarem pelo processo de revenimento. A

principal causa para se evitar essa demora, é que poderão surgir trincas nos cubos, decorrentes das tensões internas e da elevada dureza que o tratamento de têmpera gera.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, está claro que a obtenção de dureza e microestrutura desejadas nos cubos de roda não tem limitações técnicas, apenas operacionais. Isso ficou evidenciado pelo fato de os resultados estarem dentro do especificado quando foi utilizada a temperatura adequada de austenitização e fora do especificado quando as peças entraram no tanque de óleo a 660°C.

Para evitar que as peças com temperaturas baixas entrem no tanque de óleo e se misturem àquelas que, de fato, foram temperadas, é de fundamental importância que um controle automático de temperatura seja instalado na entrada do tanque. Aliado a esse sistema, sugere-se introduzir um dispositivo passa-não passa, para que as peças que não satisfaçam à condição sejam descartadas do processo.

Todas as análises foram realizadas para um processo de forjamento automático, o qual é mais recomendado. Na eventual necessidade de utilizar-se o forjamento manual das peças torna-se ainda mais importante o controle da temperatura de entrada das peças no tanque de óleo, preferencialmente associado a um sistema de segregação das que esteja fora da faixa de temperatura recomendada para austenitização.

Os conhecimentos adquiridos durante o curso foram de grande importância para o desenvolvimento do trabalho, facilitando, naturalmente, o seu desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

ASM HANDBOOK, **VOLUME 1 Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys**, 1990, 2521p.

ASM HANDBOOK, **VOLUME 4 Heat Treating**, 1991, 2173p.

ASM HANDBOOK, **VOLUME 9 Metallography and Microstructures**, 1985, 1627p.

ASM HANDBOOK, **VOLUME 9 Metallography and Microstructures**, 2004, 2733p.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**, LTC, 5ed, 2002 589p.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 1966 599p.

FAZANO, Carlos Alberto T.V. **A prática metalográfica**. 1 ed. São Paulo: Hemus-Livraria Editora Ltda, 1980 453p.

GIL, Antonio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.

G. F. VANDER VOORT, EDITOR, **Atlas of Time – Temperature Diagrams for Irons and Steels**. ASM International, 1991 766p.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia de Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino A Distância da UFSC, 2001. 121 p.

APÊNDICE A – LEVANTAMENTO DOS DADOS DE PROCESSO

Para levantamento dos dados do processo, foram feitas 30 medições de cada uma das temperaturas relevantes, assim como calculadas as médias e desvios-padrão.

Medição	Temperatura de Saída do Forno	Temperatura de Entrada na Prensa	Temperatura de Saída da Prensa	Temperatura de Entrada no Óleo	Temperatura de Saída do Tanque
1	1227	977	861	650	220
2	1222	976	875	660	221
3	1224	983	863	655	220
4	1229	985	867	657	222
5	1234	987	878	653	219
6	1243	985	862	661	225
7	1237	979	867	668	229
8	1227	977	869	659	227
9	1235	965	880	660	226
10	1245	968	867	655	225
11	1220	973	866	662	223
12	1213	972	870	651	222
13	1235	978	865	664	219
14	1227	974	861	666	226
15	1237	979	859	667	224
16	1218	978	869	657	227
17	1215	976	862	658	223
18	1230	975	873	662	227
19	1220	978	875	658	217
20	1233	977	868	661	218
21	1235	971	879	663	228
22	1228	973	881	657	221
23	1224	975	869	659	222
24	1241	974	873	661	225
25	1237	969	859	663	226
26	1217	979	862	665	227
27	1218	978	871	663	229
28	1220	976	869	653	219
29	1236	973	871	662	218
30	1240	972	873	659	220
Média	1228,9	976,1	868,8	659,6	223,2
Desvio Padrão	8,9	4,9	6,2	4,5	3,6