

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA

Departamento De Engenharia

RESFRIAMENTO CONTROLADO: UMA ALTERNATIVA À NORMALIZAÇÃO EM
COMPONENTES FORJADOS A QUENTE

Peterson Duarte Diehl

Trabalho de Diplomação

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre

2015

Peterson Duarte Diehl

RESFRIAMENTO CONTROLADO: UMA ALTERNATIVA À NORMALIZAÇÃO EM
COMPONENTES FORJADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul como requisito parcial à
obtenção do grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre
Dezembro de 2015

AGRADECIMENTOS

Ao Brasil, por ainda oferecer ensino público federal de qualidade e acesso universal.

À UFRGS por ter me proporcionado uma excelente graduação.

Aos meus pais Jaime Nataniel e Vera Lúcia pelo dom da vida e pela educação que me deram.

À Emília, por todo apoio, força e amor em todos os momentos, principalmente por sempre estar presente nas situações difíceis, muito obrigado.

À família Hilgert, em especial João Eduardo, Gema e Eduarda por serem a família que eu precisava no momento em que era tudo comigo, vocês são demais.

Aos amigos Fernando Bombassaro, Renan Richter, Rui Alles por terem compartilhado moradia quando precisei.

À Maxiforja Componentes Automotivos Ltda. por todo suporte técnico para a realização deste trabalho.

Agradeço à PUCRS e à Maxiforja por terem confiado em meu trabalho e me proporcionado o aporte financeiro que necessitei para concluir esta graduação.

Aos colegas e amigos Matheus Trinca, Hugo Pimenta, Felipe Lutckmeier, Simone Milesi, Lucas de Lemos, Felipe Cardoso, Diego Vieira, Gustavo Munhoz e Rafael Queiroz por terem estado sempre próximos nesses últimos seis anos.

Aos colegas e amigos de trabalho feitos na PUCRS e Maxiforja pelo apoio em todos os momentos.

Aos engenheiros orientadores Gustavo Antoni, Marlon Fernandes, Diego Wendt, Diego Brum, Diogo Melo e Hédio Viana pelo apoio, dicas e ensinamentos.

Ao professor Dr. Afonso Reguly pelo apoio e orientação.

RESUMO

O mercado cada vez mais competitivo leva a indústria a buscar alternativas para ter maior rapidez e economia em seus processos. Com base nesta afirmação, a substituição dos tratamentos térmicos pelo resfriamento controlado do material imediatamente após ser conformado a quente tem sido uma alternativa para a indústria de transformação mecânica. O resfriamento controlado é realizado imediatamente após o forjamento a quente, aproveitando o calor retido pelo material, de forma a garantir uma taxa de resfriamento que permita a formação de uma microestrutura desejada. Isto permite uma economia de tempo e energia em relação aos tratamentos térmicos proporcionando uma diminuição dos custos, “lead time”, preservação ambiental e, conseqüentemente, uma maior flexibilidade do processo produtivo. Nos processos produtivos que utilizam operações de forjamento a quente seguidas de usinagem, geralmente é necessário que a peça forjada seja resfriada ao ar ambiente e submetida a uma operação intermediária de tratamento térmico de normalização a fim de promover a formação de uma microestrutura ferrítica-perlítica, com dureza especificada entre 145 e 245 Brinell, de forma a melhorar as propriedades do material nas operações de usinagem. Este trabalho tem como objetivo mostrar a viabilidade de se substituir a normalização de um aço ST52-3 forjado a quente pelo resfriamento controlado em esteira, imediatamente após seu forjamento. Para isso, a microestrutura obtida por meio deste resfriamento controlado deve ser semelhante àquela obtida pela normalização com uma dureza dentro da faixa especificada para o referido tratamento térmico. Foram analisadas três amostras sendo: uma somente forjada, uma forjada com resfriamento controlado e a última com normalização após o forjamento. Utilizou-se um aço com aproximadamente 0,2% C de uma mesma corrida. Procurou-se atender as especificações e normas solicitadas pelo cliente final, a fim de tornar válido o experimento, com análises metalográficas, análise de dureza e ensaios de tração e Charpy V. Os resultados foram muito satisfatórios, mostrando que o material com resfriamento controlado ao ar após o forjamento, atende as especificações do cliente. Concluiu-se então que o resfriamento controlado após o processo de forjamento é sim uma alternativa à normalização neste caso, trazendo economia energética, financeira, preservação ambiental e maior rapidez no processamento fabril.

Palavras-chave: Resfriamento controlado, Normalização, Forjamento a quente.

ABSTRACT

The increasingly competitive market leads the industry to seek alternatives to increase productivity and cost savings in its processes. Based on this statement, the replacement of heat treatment by controlled cooling after hot forging has been an alternative for the industry. The controlled cooling is performed to ensure a proper cooling rate that allows the formation of a desired microstructure. This results in process time and energy saving in relation to conventional fabrication route providing lower costs, lead time, environmental preservation and, consequently, greater flexibility of the production process. In processes using hot forging operations followed by machining it is generally necessary that the forged part is cooled in containers and subjected to an intermediate normalizing heat treatment to obtain a ferritic-pearlitic microstructure, with hardness ranging between 145 and 245 Brinell. This work aims to show the feasibility of replacing the normalizing heat treatment of a particular forged component by controlled cooling immediately after forging. Three conditions were analyzed: as forged and cooled in a container, forged and control cooling, and forged and normalized. Metallographic, hardness analysis, tensile and impact Charpy V-notch were performed. The results were very satisfactory, showing that the material with controlled cooling after forging, meets customer specifications. It was therefore concluded that the controlled cooling after the forging process is viable alternative to the forging and normalizing route resulting in energy-saving, environmental preservation and faster manufacturing process.

Key-words: Controlled Cooling, Normalizing, Hot Forging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Matrizes para forjamento em matriz aberta	11
Figura 2 Forjamento de uma peça em matriz fechada.....	11
Figura 3 Matrizes para forjamento em matriz fechada.....	12
Figura 4: Exemplo da austenitização de um aço eutetóide.	13
Figura 5: Fluxograma dos principais tratamentos térmicos aplicados aos aços.....	15
Figura 6: Diagrama Fe-C com destaque para zona da normalização	16
Figura 7 Descrição esquemática dos ensaios realizados neste estudo.....	19
Figura 8 Indutor para aquecimento dos <i>blanks</i>	19
Figura 9 Prensa de forjamento e prensa de rebarbação	20
Figura 10 Forno Contínuo FOC-01	21
Figura 11: Pirômetro óptico utilizado nas medições de temperatura.	22
Figura 12 Esquema de onde foram retirados os valores de dureza HBW	22
Figura 13 Regiões onde foram retirados os corpos de prova para os ensaios mecânicos	23
Figura 14 Microscópio ótico Zeiss	23
Figura 15 Corpo de prova Charpy V, frente e perfil	24
Figura 16 Máquina de impacto Instron	24
Figura 17: À esquerda corpo de prova para ensaio de tração e à direita equipamento Kratos	25
Figura 18 Diagrama CCT Aço ST52-3	27
Figura 19 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 100x na condição de como forjado. Microestrutura formada por perlita e ferrita. Ataque Nital 3%.....	28
Figura 20 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 500x na condição de como forjado. Microestrutura formada por perlita e ferrita. Ataque Nital 3%.....	29
Figura 21 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 100x na condição de como forjado e normalizado. Microestrutura formada por perlita e ferrita. Ataque Nital 3%.....	30
Figura 22 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 500x na condição de como forjado e normalizado. Microestrutura formada por perlita e ferrita. Ataque Nital 3%.....	31
Figura 23 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 100x na condição de como forjado e resfriado com controle. Microestrutura formada por perlita e ferrita, presença de regiões com ferrita acicular. Ataque Nital 3%.	32
Figura 24 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 500x na condição de como forjado e resfriado com controle. Microestrutura formada por perlita e ferrita, presença de regiões com ferrita acicular. Ataque Nital 3%.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição em % em massa do Aço DIN ST52-3.....	18
Tabela 2 Espectrômetro de Emissão Ótica	18
Tabela 3 Resultado das medições de temperatura e taxa de resfriamento do aço para resfriamento o ar com controle.....	26
Tabela 4 Resultado das medições de temperatura e taxa de resfriamento do aço para resfriamento ao ar sem controle em caixa.	27
Tabela 5 Resultados de dureza para o aço DIN ST52-3 sob diferentes condições de resfriamento após o forjamento.	34
Tabela 6 Resultados de ensaio de impacto Charpy para o aço DIN ST52-3 sob diferentes condições de resfriamento após o forjamento.	35
Tabela 7 Resultados de ensaio de impacto Tração para o aço DIN ST52-3 sob diferentes condições de resfriamento após o forjamento.	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1.	Forjamento	10
2.1.1.	Forjamento à quente	10
2.1.2.	Matrizes para forjamento	10
2.2.	Transformação da Austenita	12
2.3.	Tratamentos Térmicos	14
2.3.1.	Normalização	15
2.3.2.	Resfriamento Controlado	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	18
3.1.	Material	18
3.2.	FORJAMENTO	19
3.2.1.	Indutor de aquecimento	19
3.2.2.	Prensa de forjamento	19
3.3.	Normalização	20
3.4.	Resfriamento controlado	21
3.4.1.	Esteira	21
3.4.2.	Velocidade	21
3.4.3.	Medição de temperaturas	21
3.5.	Análises	22
3.5.1.	Preparação das amostras	23
3.5.2.	Equipamentos do laboratório	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1.	Curvas de resfriamento	26
4.2.	Análise microestrutural	28
4.2.1.	Forjado	28
4.2.2.	Normalizado	30
4.2.3.	Resfriamento controlado	32
4.3.	Ensaio de dureza	34
4.4.	Ensaio mecânicos	35
4.4.1.	Ensaio de Impacto Charpy	35
4.4.2.	Ensaio de tração	35
4.5.	Ganhos produtivos	36
5	CONCLUSÕES	38
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

O forjamento pode ser considerado, em muitos casos como, um processo rápido onde, muitas vezes é necessário um tratamento térmico posterior. Essa operação requer cuidados especiais e tempo de programação para a sua execução, que consiste, normalmente, em reaquecimento e resfriamento controlado da peça, para atingir a desejada microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas especificadas pelo produto.

Atualmente, as empresas vêm buscando um processo o mais contínuo possível, visando maior produtividade. Para as indústrias, é inviável manter grandes estoques e, por esse motivo, já não podem mais manter a mesma produção em massa do passado.

Uma alternativa adotada pela indústria para maximizar a produtividade é a melhoria contínua de seus processos. Este trabalho aborda a substituição do tratamento térmico de normalização, que tem por principal objetivo o refino de grão e a formação de microestrutura do tipo ferrita e perlita. Este tratamento térmico é necessário porque os produtos dos processos de forjamento podem sofrer crescimento de grão indesejável e, nem sempre serem adequados para o processo posterior de usinagem. Para corrigir este problema, atender as especificações do produto e reduzir os custos com usinagem realiza-se a normalização.

Uma alternativa à normalização é o aproveitamento da energia pós-forjamento, utilizando resfriamento controlado formando, assim, microestrutura e propriedades desejáveis. Os estudos são feitos, normalmente, testando aços micro ligados. Este trabalho testará um aço ao carbono DIN ST52-3, que possui aproximadamente 0,2% C.

Os aços, tanto ao carbono quanto os micro ligados, quando resfriados controladamente, apresentam alta resistência e tenacidade, o que dispensa tratamentos térmicos posteriores reduzindo, assim, o tempo de processo na fabricação e os custos com energia. Neste contexto, o próprio calor remanescente do forjamento é suficiente para que se promova a homogeneização já na fase de resfriamento do material. As propriedades mecânicas, como resistência e tenacidade, são obtidas com o controle de fenômenos metalúrgicos associados à composição química que ocorrem no plano estrutural.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Analisar o mesmo material com três diferentes processos: como forjado, forjado e com tratamento térmico de normalização e forjado com resfriamento controlado ao ar;
2. Verificar se a microestrutura formada por ferrita e perlita é atingida;
3. Apurar se a dureza especificada pela norma do cliente é atingida;

4. Testar se o valor do ensaio de Charpy V especificado pela norma do cliente é atingida;
5. Averiguar se os valores do ensaio de tração especificados pela norma do cliente é atingida;
6. Avaliar a possível retirada do tratamento térmico de normalização pelo resfriamento controlado ao ar forçado após o forjamento a quente;
7. Confirmar o possível ganho em *lead time* em sete dias de produção com a eliminação do tratamento térmico de normalização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Forjamento

O processo de forjamento é utilizado para transformar metais do estado bruto em peças acabadas. Tem como vantagem o grande aproveitamento da matéria-prima, além das peças forjadas apresentarem microestrutura homogênea, livres de porosidades e com um fibramento favorável às propriedades mecânicas exigidas em muitos componentes. (SCHAEFER, 2006).

2.1.1. Forjamento à quente

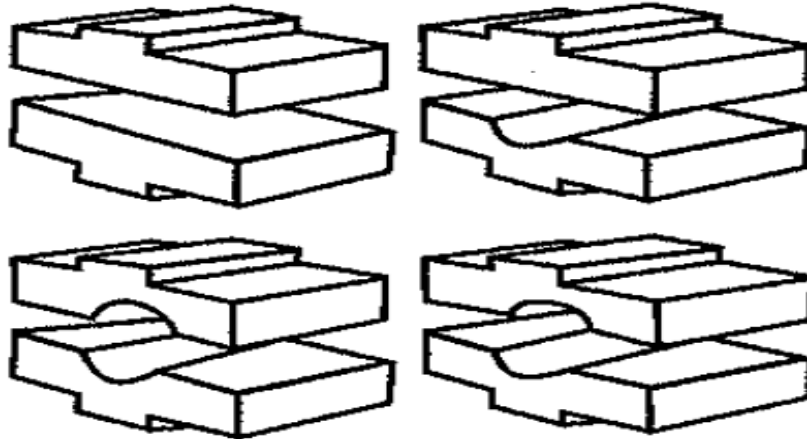
Para o forjamento de praticamente todos os metais e ligas, é feito um aquecimento na etapa inicial da conformação. As variações estruturais, devido a esse aquecimento, proporcionam um aumento na ductilidade e na tenacidade do metal, requerendo menor energia para a sua deformação. Esse aquecimento também facilita o escoamento plástico, diminuindo a probabilidade de trincas (CIMM, 2012).

2.1.2. Matrizes para forjamento

Para Cetlin e Helman (2005), matriz é a ferramenta utilizada no processo de forjamento que entra em contato com o material que será forjado. Existem dois tipos de matrizes, abertas e fechadas, e, usualmente, são de aço-ferramenta.

As matrizes abertas são usadas para forjar peças grandes, com baixo nível de produção. Sua geometria é bastante simples, e a restrição ao movimento lateral do metal comprimido é pequena. A imagem de uma matriz aberta pode ser observada conforme ilustra a Figura 1.

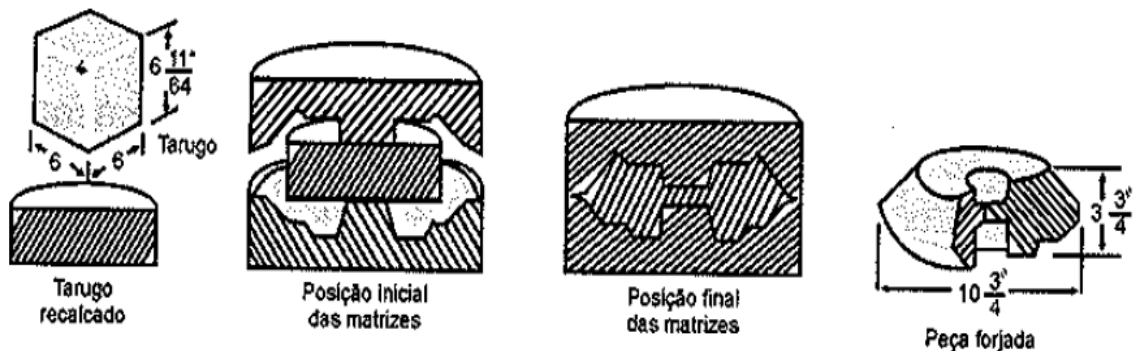
Figura 1 Matrizes para forjamento em matriz aberta



Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005)

As matrizes fechadas têm cavidades esculpidas no formato da peça que se deseja obter; o metal a ser forjado deve adotar esse formato. Neste caso, ao contrário de matrizes abertas, o material terá fortes restrições ao seu livre e ao espalhamento no momento da conformação. A Figura 2 mostra uma operação desse tipo (CETLIN e HELMAN, 2005).

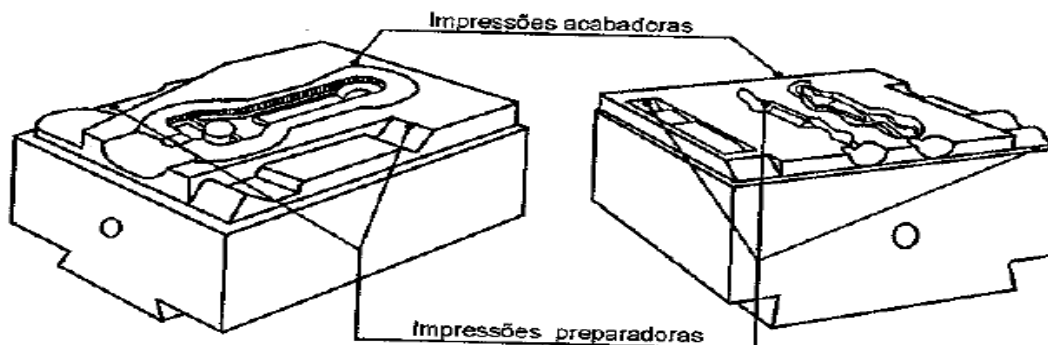
Figura 2 Forjamento de uma peça em matriz fechada



Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005)

Forjamento em matrizes fechadas é considerado um processo caro, pois não é feito de uma só vez. Confeccionam-se várias cavidades em uma matriz, e a peça vai sendo forjada nessas cavidades até que atinja seu formato final. Desta forma, considera-se viável esse processo na fabricação de um grande número de peças. A Figura 3 ilustra dois exemplos de matrizes para forjamento em matrizes fechadas (CETLIN e HELMAN, 2005).

Figura 3 Matrizes para forjamento em matriz fechada

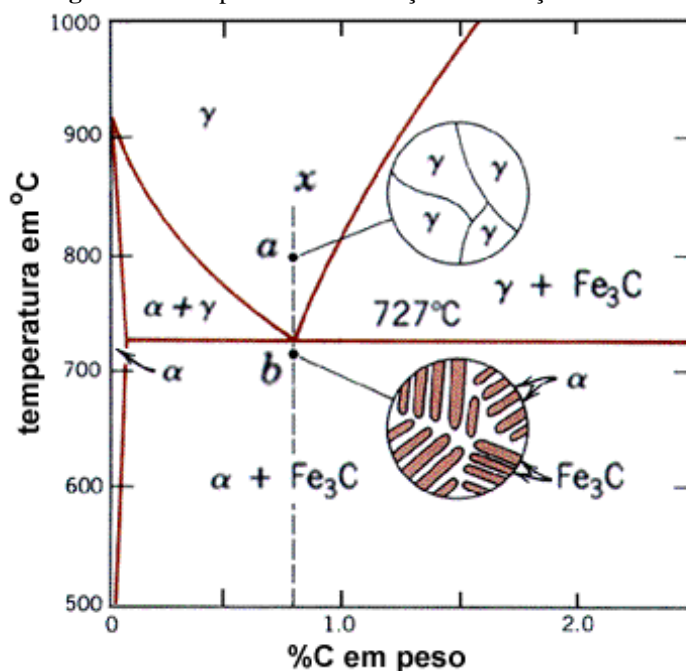


Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005)

2.2. Transformação da Austenita

No forjamento a quente, que é realizado acima da temperatura crítica, que é a temperatura a partir da qual o aço se encontra no campo austenítico (varia de acordo com a composição do aço), acontecem diversas modificações na microestrutura do aço, alterando suas propriedades mecânicas. Durante o aquecimento, há uma crescente mobilidade atômica, um rearranjo da estrutura cristalina e modificações microestruturais, como crescimento de grão e dissolução de precipitados. Esses fenômenos ocorrem, geralmente, acima da temperatura crítica. A partir dessa temperatura, tem-se uma austenitização completa do aço, ou seja, há uma dissolução total do carboneto de ferro na austenita, conforme Figura 4, (CHIAVERINI, 2012).

Figura 4: Exemplo da austenitização de um aço eutetóide.



Fonte: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6434-diagramas-fe-fesub3subc#.VgshFHpViko

Segundo Chiaverini (2012), a austenitização é o ponto de partida para as transformações posteriores desejadas, as quais se processarão em função da velocidade de resfriamento adotada.

À medida que a temperatura é elevada acima da zona crítica, aumenta-se a dissolução dos precipitados e de outras fases presentes na austenita. Entretanto, o aumento da temperatura é favorável ao crescimento de grão da austenita. O aumento destes grãos é prejudicial no resultado final de certas propriedades mecânicas – como dureza e resistência mecânica – por esse motivo, prefere-se uma dissolução incompleta das fases presentes na austenita, a ter completa dissolução destas fases com grãos excessivamente grandes. Por isso, evitam-se temperaturas muito acima da zona crítica (CHIAVERINI, 2012).

Para que se garanta uma completa homogeneização térmica, a velocidade de aquecimento deve ser controlada na peça, ou seja, é necessário eliminar os gradientes de temperatura por meio de uma velocidade de aquecimento controlada, num processo normalmente chamado de “encharque”. Este cuidado é muito importante, principalmente quando os aços estão sob estado de tensão interna ou quando possuem tensões residuais devido um encruamento prévio ou ao estado puramente martensítico – isso se deve porque nas situações citadas, um aquecimento excessivamente rápido tem a possibilidade de causar empenamento ou até mesmo fissuras (CHIAVERINI, 2012).

Tempo de permanência à temperatura de aquecimento

“A influência do tempo de permanência do aço à temperatura escolhida de aquecimento é mais ou menos idêntica à de máxima temperatura de aquecimento, isto é, quanto mais longo o tempo à temperatura considerada de austenitização, tanto mais completa a dissolução do carboneto de ferro ou outras fases presentes na austenita, entretanto maior o tamanho de grão resultante” (CHIAVERINI, p. 83 ,2012).

Por isso, é necessário evitar tempos excessivos a uma determinada temperatura que venham a ultrapassar o tempo necessário de resfriamento para que se obtenham as modificações estruturais que se deseja. Longos tempos em elevadas temperaturas podem levar ao aumento da descarbonetação do aço, que é um processo difusivo auxiliado pela temperatura (CHIAVERINI 2012).

2.3. Tratamentos Térmicos

Chiaverini (2012) afirma que, o tratamento térmico tem como objetivo alterar as propriedades ou conferir características determinadas aos aços, sob as condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, quando submetidos ao conjunto de operações de aquecimento.

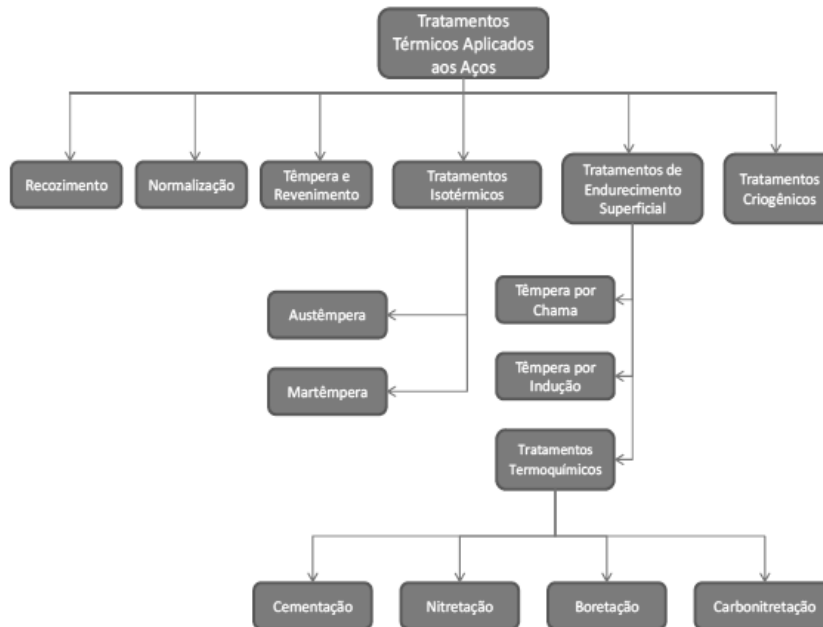
Os tratamentos térmicos modificam as estruturas dos aços e, conseqüentemente, alteram as suas propriedades. Conforme a austenita se transforma, segundo o tipo, a velocidade e as condições de resfriamentos adotados, cada uma das estruturas obtidas apresenta suas características próprias, que se transferem aos aços, conforme a estrutura ou combinação de estrutura presente.

Praticamente todos os aços carbono, após a operação de forjamento ou laminação, necessitam de tratamento térmico antes de serem colocados em serviço. Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são:

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

Um mapeamento dos tratamentos térmicos e termoquímicos pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Fluxograma dos principais tratamentos térmicos aplicados aos aços.



Fonte: Castro (2014)

2.3.1. Normalização

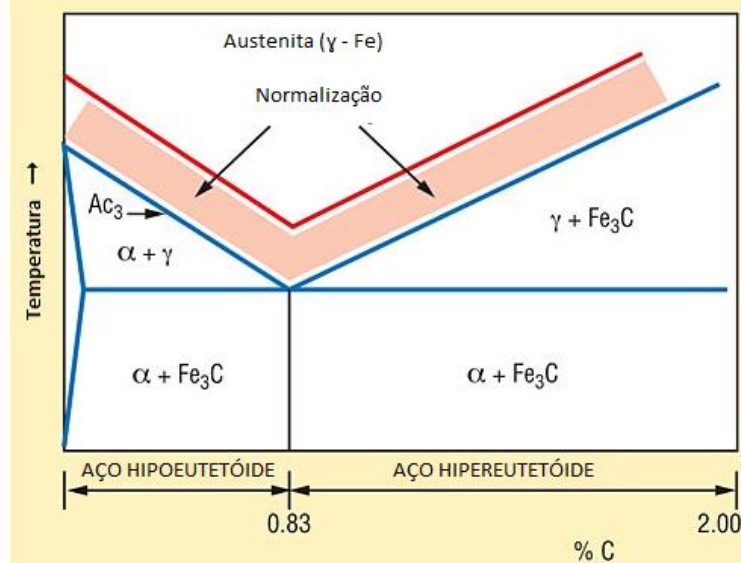
Segundo Silva e Mei (2006), a normalização consiste na austenitização completa do aço, seguida de resfriamento ao ar parado ou agitado. É indicada, normalmente, para homogeneização da estrutura após o forjamento e antes da têmpera ou revenimento.

A normalização, segundo Silva e Mei (2006), pode ser usada para:

- Refino de grão (por meio de recristalização) e homogeneização da estrutura, visando obter uma melhor resposta na têmpera ou revenimento posterior;
- Refino de estrutura bruta de fusão (peças fundidas, por exemplo);
- Obtenção de propriedades mecânicas desejadas.

Na normalização, o aço é resfriado ao ar ambiente após ser aquecido acima da zona crítica. Pode ser observado na Figura 6 que a temperatura de aquecimento supera a linha Ac3, para os aços hipoeutetóides, e a linha Acm, para os aços hipereutetóides.

Figura 6: Diagrama Fe-C com destaque para zona da normalização



Fonte: <http://blog.indeeco.com/importance-normalizing/> (Adaptado)

A normalização visa refinar a granulação grosseira de peças de aço fundido, laminados ou forjados. 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 bainita (CHIAVERINI, 2002).

2.3.2. Resfriamento Controlado

Segundo Yamakami (2005), após o processo de forjamento a quente, o resfriamento controlado do material pode fornecer uma taxa de resfriamento que seja adequada para que aconteçam as transformações microestruturais desejadas e, desta forma, a obtenção das propriedades exigidas. Assim, o tratamento térmico de normalização, por exemplo, após o forjamento não seria mais necessário, recomendado para melhorar a usinabilidade do material, isso favoreceria uma diminuição significativa no consumo de energia gasto com esse tratamento e o tempo total do processo produtivo.

Ghosh (2003) observa que as peças forjadas num tratamento termomecânico controlado podem apresentar propriedades mecânicas melhores que as obtidas por um forjamento convencional. A melhoria das propriedades mecânicas se deve às mudanças microestruturais adequadas que se conseguem com esses tratamentos.

Um fator muito importante no resfriamento controlado é a velocidade em que ele é realizado. Isto impactará diretamente na microestrutura do aço e, por consequência, nas propriedades finais dele. Por meio da variação da velocidade de resfriamento, pode-se obter diferentes fases e diferentes proporções destas no aço. Entretanto, é importante frisar que a

obtenção dessas fases não depende apenas da velocidade de resfriamento, mas também das dimensões das peças e da composição do aço (CHIAVERINI 2012).

A maior vantagem observada, no entanto, com a aplicação do resfriamento controlado, além da eliminação do tratamento térmico, é tornar mais flexível e rápido o processo produtivo de peças forjadas a quente que necessitem usinagem após o forjamento.

De acordo com Samuels (1999) o material necessita ser resfriado constantemente desde a temperatura de austenitização. Ainda complementa que a transformação microestrutural ocorre a temperaturas mais baixas, a uma taxa de resfriamento um pouco mais rápida na faixa de transformação da perlita, entretanto tem-se o produto final com uma estrutura mais refinada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Material

Para este trabalho, foi utilizado o aço DIN ST52-3, vindo do fornecedor em forma de barras redondas laminadas. Tem sua composição dada pela Tabela 1:

Tabela 1 Composição em % em massa do Aço DIN ST52-3

Análise química																	
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Sn	Cu	Pb	Nb	N	Cu10Sn	
0,19	0,23	1,3	0,016	0,0027	0,14	0,13	0,03	0,002	0,002	0,022	0,011	0,2	0,001	0,002	0,0083	0,31	

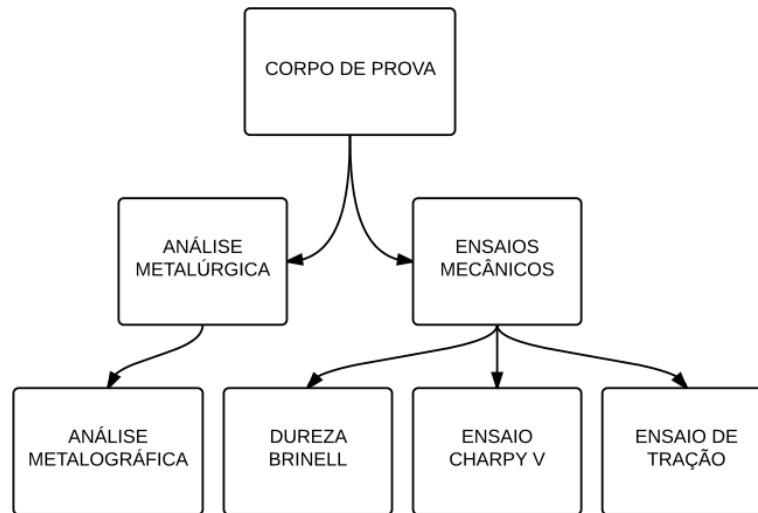
Para a análise acima, foi utilizada um Espectrômetro de emissão ótica com características citadas na Tabela 2:

Tabela 2 Espectrômetro de Emissão Ótica

Equipamento: Espectrômetro de Emissão Ótica	Fabricante, modelo: Spectro / SpectroLab
Identificação: ES - 2801	Certificado de calibração: 0911/2010
Software: Spark Analyzer 3.01	

A figura 7 apresenta, de forma esquemática, os diferentes ensaios realizados neste estudo. Foram analisadas três condições de tratamento térmico para o componente: como forjado, forjado e normalizado e resfriamento controlado após forjamento. Para caracterização mecânico-metalúrgica foram realizados ensaios de caracterização microestrutural, dureza de núcleo Brinell, ensaio de impacto Charpy e ensaio de tração. Conforme a especificação deste produto, a microestrutura deve ser ferrítica-perlítica com dureza de núcleo entre 145 e 245 HB e para os ensaios Charpy V e tração (valor de Tensão de alongamento não proporcional - Rp), os resultados devem ser maiores que 27 J e 345 MPa, respectivamente.

Figura 7 Descrição esquemática dos ensaios realizados neste estudo.



3.2. FORJAMENTO

3.2.1. Indutor de aquecimento

Para o forjamento a quente, foi utilizado indutor elétrico (Figura 8) com potência de 860 kW para aquecimento dos *blanks*. O material foi aquecido a uma temperatura média de 1175°C por um período de 30 segundos.

Figura 8 Indutor para aquecimento dos *blanks*



3.2.2. Prensa de forjamento

Para o forjamento foi utilizada uma prensa rápida Smeral de 1600 TF (figura 9) onde o material é encalcado e forjado.

Figura 9 Prensa de forjamento e prensa de rebarbação



3.3. Normalização

Para o tratamento térmico de normalização foi utilizado um forno contínuo elétrico (Figura 10). Ele é composto por cinco câmaras que são chamadas zonas, pode-se definir a temperatura que se deseja para cada zona.

Neste trabalho foram utilizadas as seguintes temperaturas:

- Zona 1: 800 °C;
- Zona 2: 860 °C;
- Zona 3: 860 °C;
- Zona 4: 860 °C;
- Zona 5: 860 °C.

Para cada zona, o tempo de ciclo foi definido em 13 minutos.

Após o processo em forno, o material é resfriado ao ar, ou seja, sem ventilador.

Figura 10 Forno Contínuo FOC-01



3.4. Resfriamento controlado

3.4.1. Esteira

Para realização do resfriamento controlado após o forjamento, as peças foram colocadas em uma esteira de seis metros e submetidas a resfriamento ao ar por meio de cinco ventiladores industriais com 100 cm de diâmetro e sua rotação controlada por potenciostato, para forçar o resfriamento.

3.4.2. Velocidade

Para este trabalho, precisou-se testar a velocidade da esteira, primeiro devido ao material ainda não ter sido testado para este processo, segundo porque, devido à composição química com aproximadamente 0,2% de Carbono, a curva CCT tem o cotovelo muito próximo ao eixo Y. Após diversos testes foi determinada a velocidade ótima de 25 mm/s, velocidade na qual a dureza, ao final do resfriamento, estava, de acordo com a especificação do cliente, entre 145 e 245 HB.

3.4.3. Medição de temperaturas

As medições de temperatura foram realizadas em dois momentos: no instante zero (aquele no qual o material forjado é retirado da prensa de rebarbação) e no final da esteira. Para controle do resfriamento das peças forjadas e levantamento da respectiva curva, foi utilizado um pirômetro infravermelho *RaytekRaynger 3i*®, conforme Figura 11.

Figura 11: Pirômetro óptico utilizado nas medições de temperatura.

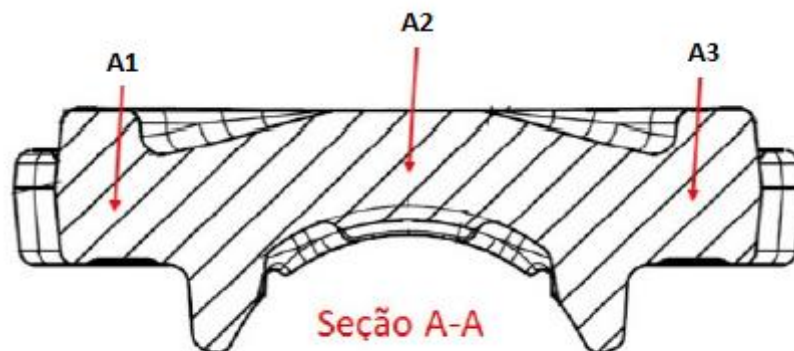


Fonte: www.raytek.com

3.5. Análises

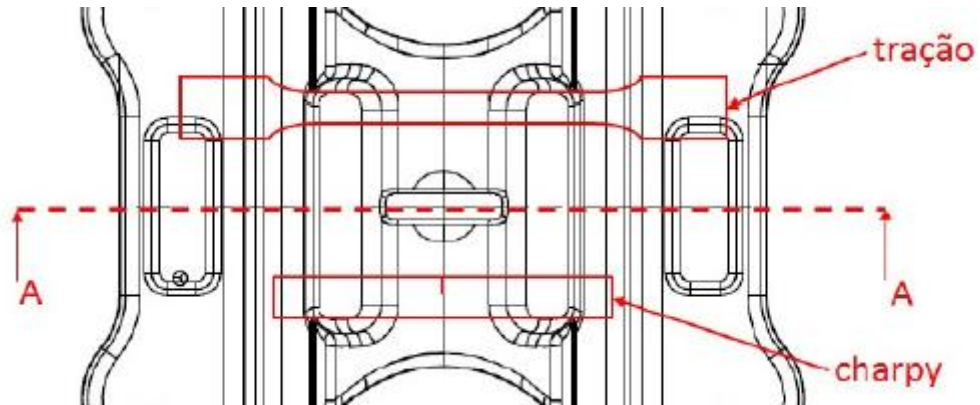
A Figura 12 mostra as posições onde foram feitos os ensaios de dureza Brinell nos corpo de prova estudados.

Figura 12 Esquema de onde foram retirados os valores de dureza HBW



Para os ensaios mecânicos de Impacto Charpy e Tração os corpos de prova foram retirados conforme esquema mostrado na Figura 13.

Figura 13 Regiões onde foram retirados os corpos de prova para os ensaios mecânicos



3.5.1. Preparação das amostras

As amostras foram preparadas pelo método metalográfico tradicional, onde foram cortadas, embutidas em baquelite, lixadas, polidas e atacadas com Nital 3% (3ml de HNO₃ em 97mL de álcool etílico).

3.5.2. Equipamentos do laboratório

Após devidamente preparadas, as amostras foram analisadas em microscópio ótico, modelo Axiovert 40 MAT, da fabricante Zeiss (Figura 14). Para a aquisição das imagens foi utilizado o software Axiovision 4.8.0.0.

Figura 14 Microscópio ótico Zeiss



Para as análises de dureza, foi utilizado um durômetro HPO-3000 da fabricante WPM com penetrador esfera de 10 mm, onde uma carga de 3000 kg é aplicada durante 10 segundos, de acordo com a norma ABNT NBR NM ISO187.

O ensaio de impacto Charpy-V, após a preparação das amostras com chanfro do tipo V, as amostras com dimensão 55x10x10mm (Figura 15) foram ensaiadas em máquina de impacto SI-1 C3, da marca Instron (Figura 16).

Figura 15 Corpo de prova Charpy V, frente e perfil



Figura 16 Máquina de impacto Instron



Os ensaios de tração foram realizados no equipamento MKU da marca Kratos, equipamento que permite ensaios de tração e compressão, utilizando os corpos de prova padrão ABNT NBR ISO 6892-1:2013 com seção útil de 50 mm, conforme Figura 17. Os dados foram obtidos por software fornecido pela fabricante do equipamento.

Figura 17: À esquerda corpo de prova para ensaio de tração e à direita equipamento Kratos



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos neste trabalho.

4.1. Curvas de resfriamento

Com intuito de verificar a taxa de resfriamento (Tr) das peças, foi calculada, para cada uma delas, taxa em $\left(\frac{^{\circ}C}{s}\right)$, utilizando a Equação 1.

$$Tr = \frac{(Ti - Tf)}{Tt} \quad [1]$$

Ti = Temperatura inicial, °C

Tf = Temperatura final, °C

Tt = Tempo total de resfriamento, s

Na Tabela 3 tem-se o cálculo das taxas de resfriamento de três corpos de prova forjados e resfriados ao ar com controle, velocidade da esteira de 25 mm/s por 240 segundos.

Tabela 3 Resultado das medições de temperatura e taxa de resfriamento do aço para resfriamento o ar com controle.

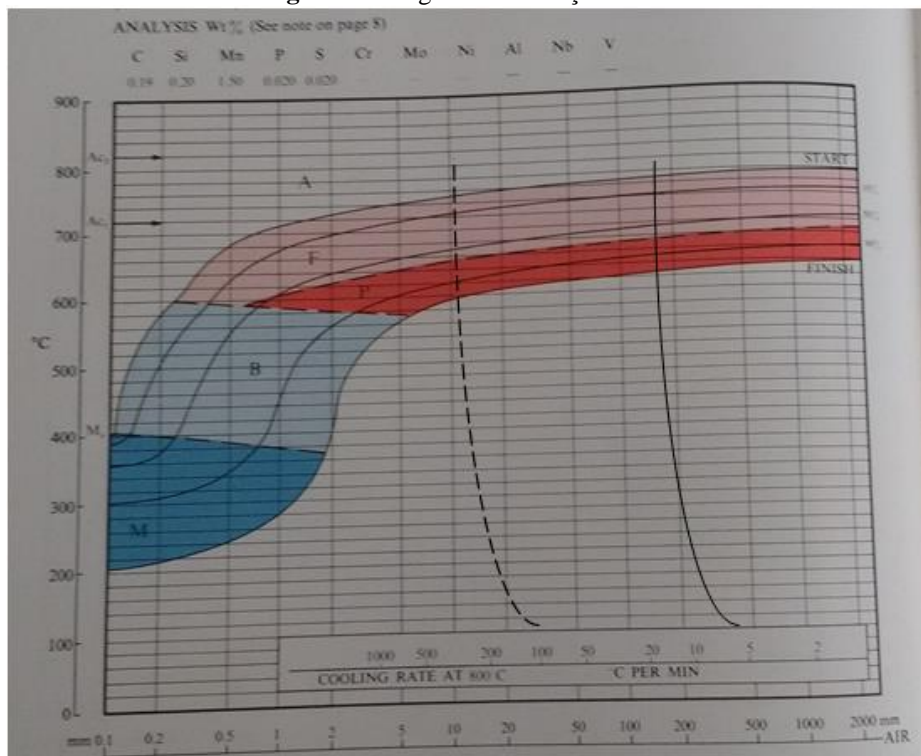
Temperatura inicial após o forjamento (°C)	Temperatura final após o resfriamento forçado (°C)	Tempo total de resfriamento (s)	Taxa de resfriamento (°C/s)
898	509	240	1,62
905	516	240	1,62
890	496	240	1,64
Média: 897,6	Média: 507		Média: 1,62
Taxa de resfriamento: 97,6 °C/min			

Na Tabela 4 tem-se o cálculo das taxas de resfriamento de três corpos de prova forjados e resfriados ao ar sem controle em caixa durante 9000 segundos.

Tabela 4 Resultado das medições de temperatura e taxa de resfriamento do aço para resfriamento ao ar sem controle em caixa.

Temperatura inicial após o forjamento (°C)	Temperatura final após o resfriamento forçado (°C)	Tempo total de resfriamento (s)	Taxa de resfriamento (°C/s)
905	60	9000	0,09
900	69	9000	0,09
898	68	9000	0,09
Média: 901	Média: 66		Média: 0,09
Taxa de resfriamento: 5,4 °C/min			

Figura 18 Diagrama CCT Aço ST52-3



Fonte: (Atkins, 1980) Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels

De acordo com as taxas de resfriamento calculadas, traçando uma curva para cada uma no diagrama CCT pode-se observar que a microestrutura esperada para ambos após o resfriamento é formada por ferrita e perlita (figura 18), sendo a curva com linha cheia indicando o resfriamento ao ar sem controle e a curva tracejada o resfriamento ao ar com controle.

4.2. Análise microestrutural

Conforme especificação a microestrutura deve ser ferrítica-perlítica.

4.2.1. Forjado

A Figura 19, obtida por microscópio ótico com aumento de 100x onde se observa para o material na condição de como forjado e resfriado sem controle uma microestrutura consistindo de ferrita equiaxial e perlita fina. Na Figura 20, tem-se o mesmo corpo de prova com aumento de 500x e ferrita equiaxial e perlita fina observada em detalhe.

Figura 19 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 100x na condição de como forjado. Microestrutura formada por perlita e ferrita. Ataque Nital 3%.

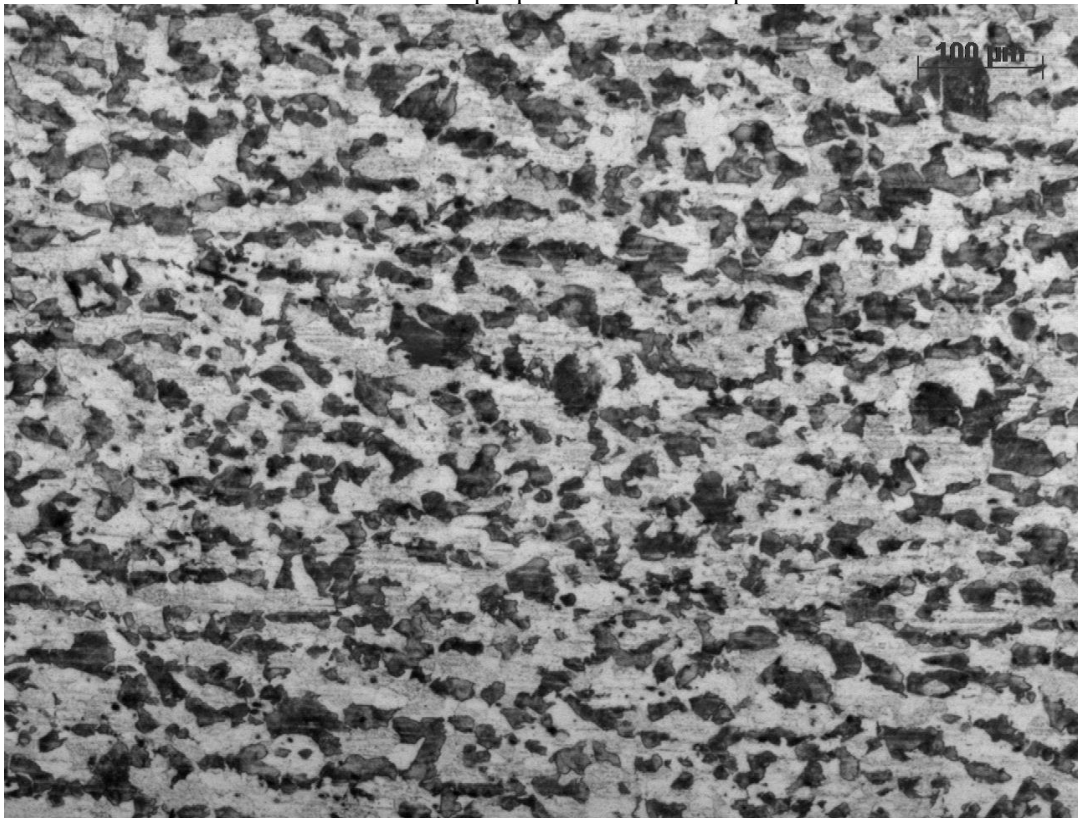
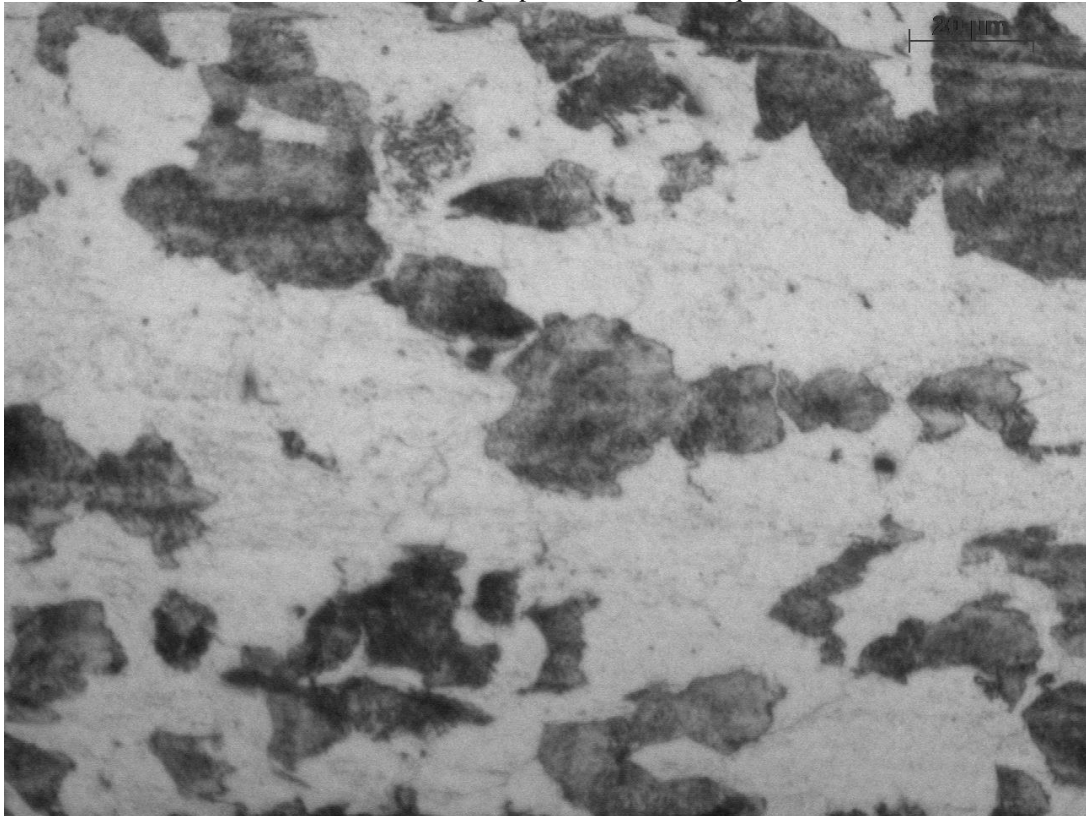


Figura 20 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 500x na condição de como forjado. Microestrutura formada por perlita e ferrita. Ataque Nital 3%.



4.2.2. Normalizado

A figura 21 apresenta a microestrutura observada para o material na condição de forjado e com tratamento térmico de normalização. Uma microestrutura consistindo de ferrita equiaxial e perlita em bandas foi obtida. Essas bandas são provavelmente provenientes do processo de lingotamento contínuo, devido principalmente à presença de elementos de liga substitucionais, como, o manganês (KRAUSS, 2003). A Figura 22, com aumento óptico de 500x, observa-se em detalhe as bandas de perlita e ferrita equiaxial.

Figura 21 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 100x na condição de como forjado e normalizado. Microestrutura formada por perlita e ferrita. Ataque Nital 3%.

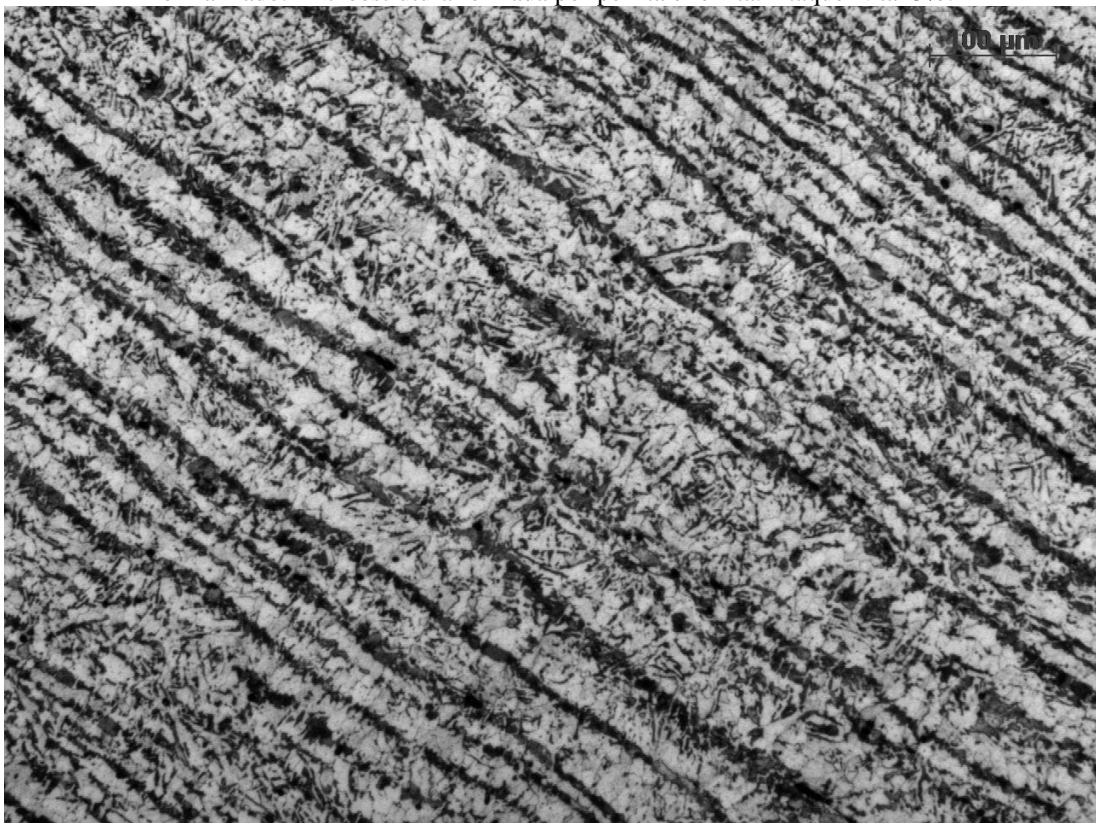
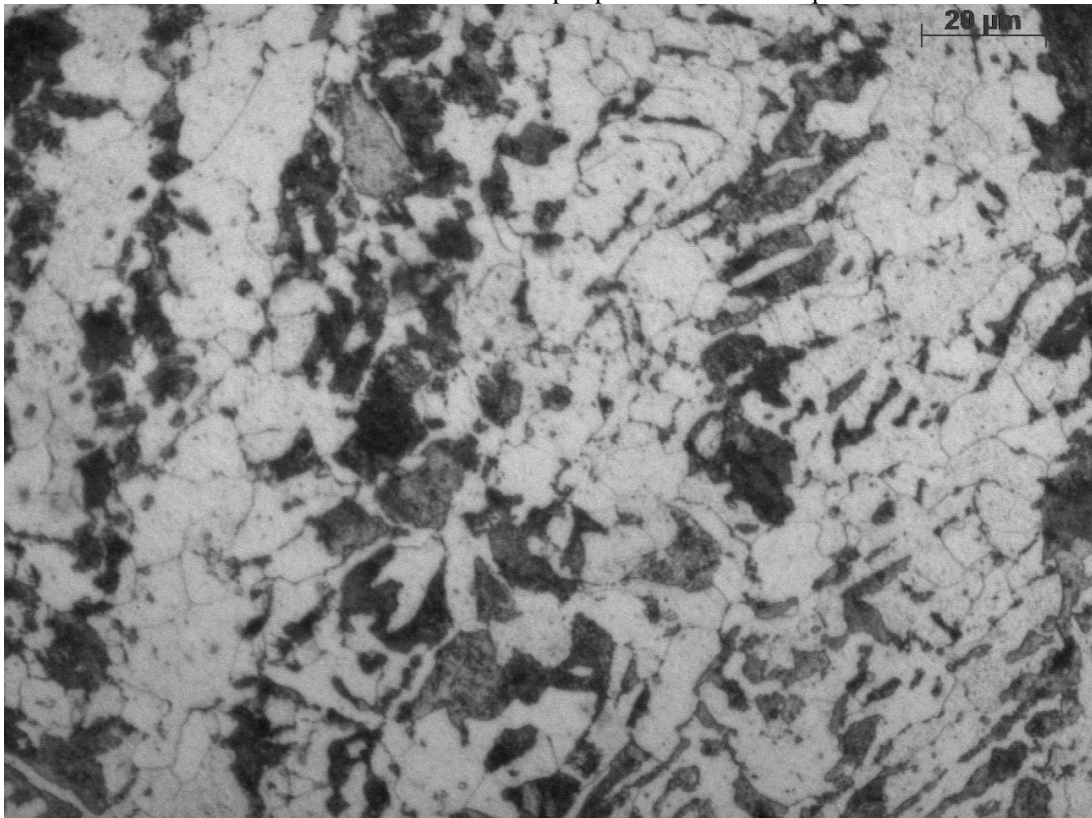


Figura 22 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 500x na condição de como forjado e normalizado. Microestrutura formada por perlita e ferrita. Ataque Nital 3%.



4.2.3. Resfriamento controlado

A Figura 23 apresenta a microestrutura observada para o material na condição de como forjado e com resfriamento controlado. Uma microestrutura consistindo de Ferrita acicular e perlita fina foi obtida. Na Figura 24, com aumento de 500x, vê-se em detalhe a ferrita acicular e perlita.

Figura 23 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 100x na condição de como forjado e resfriado com controle. Microestrutura formada por perlita e ferrita, presença de regiões com ferrita acicular. Ataque Nital 3%.

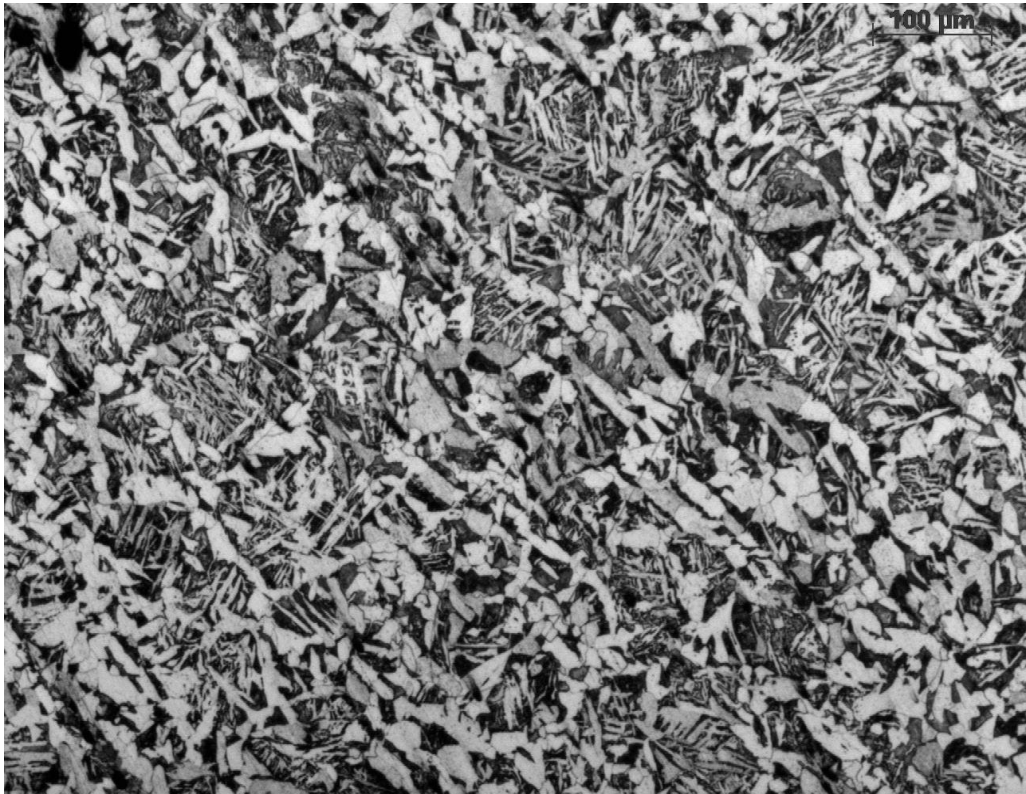
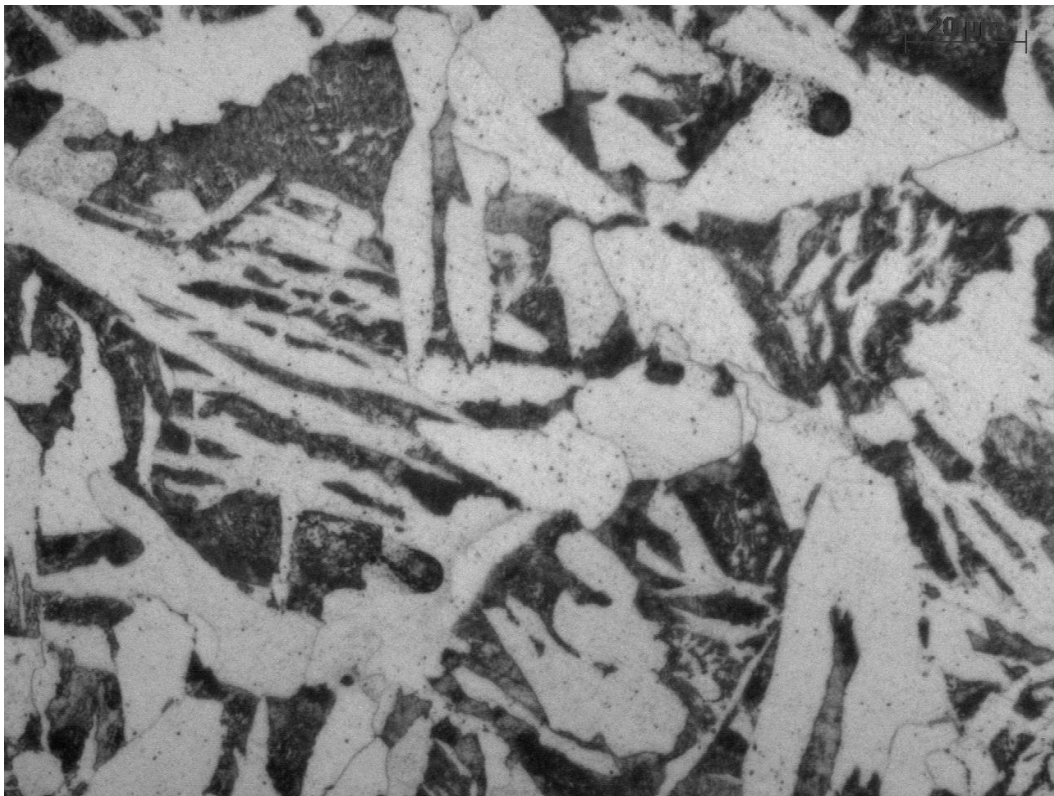


Figura 24 Microestrutura do aço DIN ST52-3 com aumento de 500x na condição de como forjado e resfriado com controle. Microestrutura formada por perlita e ferrita, presença de regiões com ferrita acicular. Ataque Nital 3%.



Os resultados obtidos nas análises metalográficas mostram que o item alcança a microestrutura alvo formada por ferrita e perlita nos três processos estudados, forjamento, normalização e resfriamento controlado, portanto, conforme objetivos deste trabalho, conclui-se que o resfriamento controlado atende as especificações.

4.3. Ensaio de dureza

Tabela 5 Resultados de dureza para o aço DIN ST52-3 sob diferentes condições de resfriamento após o forjamento.

Condição	Dureza HBW – Carga de 3000 Kg		
	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>
Como forjado	172	165	167
Normalizado	153	162	165
Com resfriamento controlado	180	183	185
Especificado	145 - 245	145 - 245	145 - 245

Analisando-se os dados da Tabela 5, se observa que as durezas após o forjamento já atendem ao especificado, que é de 145 a 245 HB, porém bem próximo da dureza mínima. Já os resultados das durezas após a normalização também apresentaram uma média próxima da mínima, porque mesmo com a microestrutura refinada o material não apresenta muito carbono. Por último, o material que foi resfriado de maneira controlada apresentou maior dureza de núcleo das três amostras. O aumento na dureza, após o resfriamento controlado, se dá ao fato do refino de grão e a presença de ferrita acicular de widmanstatten, conforme Dieter (1981).

Como pode ser visto na Tabela 1, o material possui 1,3% em massa de manganês, e segundo Viana (2012) *apud* Peixoto (2003) o manganês em teores na faixa de 0,8 a 1,5% de peso, junto com o enxofre, pode atuar como refinador de grão pela diminuição na temperatura de transformação, resultando em tamanhos de grão ferríticos e colônias perlíticas menores, pela alta taxa de nucleação e baixa taxa de crescimento de grão. O aumento no teor de manganês conduz a mais numerosos sítios de nucleação (principalmente na formação de MnS), reduz a velocidade de difusão do carbono e outros elementos e dificulta o movimento dos contornos de grão. Em combinação com o silício, material este estudo possui 0,23% em peso de Silício, contribui com o endurecimento por solução sólida na ferrita pró-eutetóide e na ferrita da perlita.

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza Brinell mostram que o item alcança a dureza de núcleo especificada nos três processos estudados, forjamento, normalização e resfriamento controlado, portanto, conforme objetivos deste trabalho, conclui-se que o resfriamento controlado atende as especificações.

4.4. Ensaio mecânicos

4.4.1. Ensaio de Impacto Charpy

Na Tabela 6 tem-se os resultados obtidos no ensaio de impacto Charpy V, onde pode-se observar que em todas as condições avaliadas tivemos resultados acima do especificado de 27 J. O material forjado apresentou 109 J de energia absorvida, esse valor provavelmente devido ao grão mais grosseiro e simétrico, quando comparado ao tamanho de grão observado nos corpos de prova normalizados após forjamento, visto que a peça resfriou lentamente em caixa juntamente com outras peças. O material normalizado, com 143 J de energia absorvida, ou seja, extremamente dúctil e grãos muito refinados na matriz de ferrita-perlita, além disso, a formação da perlita em bandas favorece a absorção de energia pelo corpo de prova. O valor de 36 J de energia absorvida para a amostra que sofreu resfriamento controlado, explica-se principalmente pela presença de ferrita acicular na matriz, é importante frisar que a fratura após o ensaio foi limpa nas amostras ensaiadas validando por tanto os resultados, que está diretamente associada à alta tenacidade e não com alta ductilidade como observa De Figueiredo (2004).

Tabela 6 Resultados de ensaio de impacto Charpy para o aço DIN ST52-3 sob diferentes condições de resfriamento após o forjamento.

Condição	Energia Absorvida, J
Como forjado	109
Normalizado	143
Com resfriamento controlado	36
Especificado	27

Os resultados obtidos nos ensaios de impacto Charpy V mostram que o material estudado fica acima do valor especificado de 27 J de energia absorvida nos três processos estudados, forjamento, normalização e resfriamento controlado, portanto, conforme objetivos deste trabalho, conclui-se que o resfriamento controlado atende as especificações.

4.4.2. Ensaio de tração

Os valores obtidos no ensaio de Tração foram aferidos conforme ABNT NBR ISO 6892-1:2013.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração, Tabela 7, mostram que o item alcança os valores especificados entre 470 e 630 MPa para resistência a tração (Rm) e 22% para alongamento proporcional após a ruptura (A5) para os três processos estudados.

Tabela 7 Resultados de ensaio de impacto Tração para o aço DIN ST52-3 sob diferentes condições de resfriamento após o forjamento.

Condição	Rp (MPa)	Rm (MPa)	A5 (%)
Como forjado	<u>330</u>	545	25%
Normalizado	364	480	28%
Resfriamento controlado	438	600	23%
Especificado	345	470 – 630	22%

Rp: Tensão convencional de alongamento não proporcional

Rm: Resistência à tração

A5: Alongamento proporcional após ruptura

Para o valor especificado de 345 MPa para Tensão convencional de alongamento não proporcional (Rp) o item somente forjado fica abaixo deste valor, que pode ser explicado devido o tamanho de grão mais grosseiro quando comparado à microestrutura das duas outras condições estudadas, material forjado/normalizado e forjado/resfriamento controlado. Importante notar que os resultados para alongamento não são compatíveis aos resultados obtidos no ensaio Charpy V, sendo portanto, sugestão para trabalhos futuros o entendimento destes resultados.

Os resultados mostram, portanto, que o item necessita processo posterior após forjamento, isto porque os itens que sofreram processos posteriores ao forjamento, normalização e resfriamento controlado, alcançaram todos os valores especificados, por fim, conforme objetivos deste trabalho, conclui-se que o resfriamento controlado atende as especificações.

4.5. Ganhos produtivos

Como foi descrito no decorrer deste trabalho, um dos ganhos do resfriamento controlado frente aos tratamentos térmicos convencionais é o ganho em *lead time*, que nada mais é que o tempo de atravessamento, ou seja, tempo no qual um produto precisa para percorrer todas as etapas produtivas.

Pelo mix produtivo, estima-se que um produto necessite de sete dias para entrar e sair do setor de tratamento térmico. Com os resultados deste trabalho, esses sete dias foram retirados da rotina deste item, ou seja, o item atravessa as demais etapas sete dias mais rápido, o que também representa sete dias a menos de estoques em toda a fábrica.

Um fato importante, este item compartilha forno com outros itens, com a retirada do tratamento térmico de normalização, se ganha em disponibilidade desse equipamento e se ganha na possibilidade de novos itens serem adicionados à rotina do forno sem acréscimos ao carga/máquina.

Desta forma, como ao final dos testes os resultados mostraram que é possível a substituição do tratamento térmico de normalização pelo resfriamento controlado ao ar após forjamento a quente, o objetivo proposto de ganho de sete dias em *lead time* foi atingido.

5 CONCLUSÕES

Baseado nos resultados apresentados neste trabalho é possível chegar as seguintes conclusões:

- a) O material somente forjado não atinge a especificação do ensaio de tração o que faz com que ele necessite ser processado após forjado ou sendo normalizado ou sofrendo resfriamento controlado ao ar forçado;
- b) O material normalizado apresenta todos os resultados dentro do especificado pelo cliente, onde o resultado que mais chama a atenção é o valor do ensaio de impacto Charpy V com valor bastante alto, condizente com um material extremamente dúctil e excelente para o processo posterior de Usinagem;
- c) O material que sofreu o processo de resfriamento controlado, atende a todas as especificações estudadas, dureza de núcleo, ensaio de impacto Charpy V e ensaio de tração, sendo portanto, uma alternativa à normalização;
- d) O material que sofreu o processo de resfriamento controlado apresentou um valor bastante baixo, 36 J no ensaio de impacto Charpy V, quando comparado as outras duas condições.
- e) Foi possível reduzir o lead time do item em sete dias, o que significa sete dias a menos de estoque desde a matéria prima até o produto acabado;

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após análise e avaliação dos resultados obtidos no trabalho atual, podemos sugerir a realização dos seguintes, estudos futuros, que poderão colaborar com a área de estudo de interesse do trabalho:

- a) Estudo de outros produtos que são normalizados que podem ter os tratamentos térmicos substituído por resfriamento controlado;
- b) Avaliação da fratura por MEV após ensaio de tração;
- c) Avaliar a possibilidade de utilização de resfriamento controlado para substituição de beneficiamento via introdução de aços microligados.
- d) Avaliar a influência da temperatura pré-forjamento na microestrutura de itens apenas forjados.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR ISO 6892-1. **Materiais metálicos — Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente** : 2013.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR NM ISO 187. **Papel, cartão e pastas celulósicas - Atmosfera normalizada para condicionamento e ensaio e procedimento de controle da atmosfera e condicionamento das amostras** : 2000.

CASTRO, Raphael. **TRATAMENTOS SUPERFICIAIS EM AÇOS VISANDO AO AUMENTO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE**. Trabalho de conclusão de curso Engenharia Metalúrgica UFRGS, 2014

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. ABM; 7ª ed., SP, Brasil, 2012.

CIMM. **Diagramas Fe-Fe₃C**. Disponível em:

<http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6434diagramasfefesub3subc#.VknjF3arTIV>. Acesso em: 14 out. 2015.

COTA, André Barros; LACERDA, Cássio Antônio Mendes; OLIVEIRA, Fernando Lucas Gonçalves e ARAUJO, Fernando Gabriel Silva. **Influência da temperatura de austenitização sobre a cinética de formação da ferrita em um aço microligado com Nb**. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. 2002, vol.55, n.4, pp. 273-277. ISSN 1807-0353.

DAVID, Fabio Henrique Santos et al. **INC 0108: EFEITO DA TAXA DE RESFRIAMENTO NA CONSTITUIÇÃO DA PERLITA E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS COMUNS**. Revista Iniciação Científica, Belo Horizonte, v. 13, n. 1, p.56-63, jun. 2014. Disponível em: <<http://npa.newtonpaiva.br/iniciacaocientifica/?p=261>>. Acesso em: 14 out. 2015.

DE FIGUEIREDO, Kléber Mendes. **Aplicação de ensaio de impacto Charpy instrumentado no estudo da tenacidade à fratura dinâmica nas soldas a arco submerso em aços para caldeiras**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**, 2a Ed.; .part1; Guanabara Dois, 1981

EN (European Normative). EN10025:1990. **Specification for hot rolled products of non-alloy structural steels and their technical delivery conditions**: 1990.

GHOSH, A.; DAS, S.; CHATTERJEE, S.; MISHRA, B.; RAO, P. R. **Influence of thermo-mechanical processing and different post-cooling techniques on structure and properties of an ultra low carbon Cu bearing HSLA forging**. Materials Science and Engineering A, v. 348, p. 299-308, 2003.

HERRING, Daniel H. **Segregação e bandeamento em aços carbono e ligados**. 2015.

Disponível em: <<http://www.revistaih.com.br/coluna-htd/segregacao-e-bandeamento-em-acos-carbono-e-ligados/2019>>. Acesso em: 14 out. 2015.

INDEECO. **The Importance of Normalizing**. 12 Jan. 2015 Disponível em:

<<http://blog.indeeco.com/importance-normalizing/>>

KRAUSS, George, **Solidification, Segregation and Banding in Carbon and Alloy Steels**, **Metallurgical and Material Transactions B**, Volume 34B, December 2003

PEIXOTO, N. H. **Caracterização Metalúrgica do Aço SAE 1141 Microligado ao Nióbio por Simulação Física**. Porto Alegre, 2003, 123 p., (Tese de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Minas, Metalurgia de Materiais-PPGEM).

SAMUELS, Leonard Ernest. **Light microscopy of carbon steels**. ASM International, 1999.

SCHAEFFER, Lirio. **Introdução ao projeto de ferramentas para forjamento a quente em matriz fechada**. Ferramental Revista Brasileira da Indústria de Ferramentais, p. 19-28, 2006.

SILVA, André Luiz V. Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2006.

VIANA, Hédio. **SUBSTITUIÇÃO DE AÇO CONVENCIONAL POR MICROLIGADO PARA ELIMINAÇÃO DA NORMALIZAÇÃO APÓS FORJAMENTO À QUENTE**. Trabalho de conclusão de curso Engenharia Mecânica ULBRA, 2012.

YAMAKAMI, Wyser José; REIS, Maria Beatriz. **ELIMINAÇÃO DE TRATAMENTO TÉRMICO USANDO RESFRIAMENTO CONTROLADO.**, 2005