

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALÚRGIA

Augusto Reichelt Maders

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE UM COMPONENTE FORJADO A QUENTE EM AÇO
DIN 38MnVS6**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Prof. Dr. Antônio Takimi

Coorientador: MSc. Eng. Peterson Diehl

Porto Alegre 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALÚRGIA

Augusto Reichelt Maders

INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE UM COMPONENTE FORJADO A QUENTE EM AÇO
DIN 38MnVS6

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. Antônio Takimi

Coorientador: MSc. Eng. Peterson Diehl

Porto Alegre 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Reichelt, Augusto
INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE UM COMPONENTE FORJADO A QUENTE EM AÇO DIN
38MnVS6 / Augusto Reichelt. -- 2021.
47 f.
Orientador: Antônio Takimi.

Coorientador: Peterson Diehl.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Resfriamento Controlado. 2. Aço Microligado. 3.
Terminal do Cardan. I. Takimi, Antônio, orient. II.
Diehl, Peterson, coorient. III. Título.

RESUMO

Realizar tratamento térmico em componentes forjados consome tempo e energia, além do risco de geração de sucata caso surjam trincas. Como alternativa surgiram os aço microligados, que são capazes de atingir valores de resistência máxima e escoamento semelhantes aos aços beneficiados através dos processos de têmpera e revenimento, passando pelo processo de resfriamento controlado após a conformação a quente. Com isso o processo de fabricação nesses aços é simplificado, tendo uma redução no tempo de produção, nos gastos energéticos e dispensando ensaios não destrutivos para avaliar a presença ou não de trincas de têmpera no componente. Sua resistência surge através do mecanismo conhecido por 'endurecimento por precipitação', além da microestrutura formada. A taxa de resfriamento pela qual o componente é exposto após o forjamento possui forte influência na sua propriedade mecânica final. Muitas vezes o resfriamento controlado atinge propriedades mecânicas acima do especificado, sendo necessário realizar tratamento térmico de recozimento. Esse estudo tem como objetivo avaliar a influência da taxa de resfriamento em Terminais do Cardan (Yokes) forjados em aço DIN 38MnVS6 na microestrutura e propriedades mecânicas. Foi possível observar que as peças submetidas a temperaturas e tempos maiores, isto é, expostas a taxas de resfriamento menores, tiveram valores de dureza menor, o mesmo ocorreu na tensão máxima e de escoamento. A microestrutura nas peças de menor dureza apresentou um volume de ferrita maior do que a peça exposta a maiores taxas de resfriamento.

Palavras-chave: Resfriamento controlado, DIN 38MnVS6, Forjamento a quente.

ABSTRACT

Performing heat treatments on forged components consume both time and energy, not to mention the risk of generating scrap when a crack occurs during the heat treatment. As an alternative, microalloyed steels were developed. These steels are able to reach values of tensile strength and yield strength similar to those of quenched and tempered steels by undergoing a controlled cooling process after hot forging. Thus, the manufacturing process is simplified, reducing lead time in production, energy costs and the need of non-destructive testing to detect cracks in components. The resistance in these steels comes from a mechanism called 'precipitation hardening'. The cooling rate from hot forming temperature has a strong influence on its mechanical properties. Sometimes the mechanical properties achieved during control cooling with ambient temperature or agitated air are higher to the ones specified for the component, so the heat treatment of annealing is necessary. This study aims to evaluate the cooling rate influence on microstructure and mechanical properties of 'End Yokes' forged from DIN 38 MnVS6 steel. It was possible to observe that parts cooled with lower cooling rates had lower values of hardness, tensile strength and yield strength along with a higher volume of ferrite on their microstructure.

Key-words: Controlled cooling, DIN 38MnVS6, Hot forging.

Lista de Figuras

Figura 1. Locais de aplicação do Yoke no sistema de transmissão. Fonte: Spicer - Cardans: Entendo os Eixos Cardans. Adaptado pelo autor.	11
Figura 2. Processo de forjamento com múltiplas etapas. Fonte: CBCM. Editado pelo autor.	14
Figura 3. Exemplos de matriz aberta e fechada. Fonte: Milwaukee Forge. Adaptado pelo autor.	16
Figura 4. Exemplo de uma matriz fechada. (a) matriz superior. (b) matriz inferior. (c) rebarba. Fonte: Altan, 2005. Adaptado pelo autor.....	16
Figura 5. Alteração estrutural do ferro. Ferro α (ferrita) com reticulado CCC. Ferro γ (austenita) com reticulado CFC. Fonte: Estácio.....	18
Figura 6. Representação esquemática do processo de solubilização e precipitação. Fonte: DOS SANTOS, 2005.....	19
Figura 7. Imagens realizadas em um microscópio eletrônico de transmissão. Em A precipitados dispersos na ferrita, em B precipitados nas lamelas de ferrita. Fonte: LI, 2013.....	20
Figura 8. Eixo Y encontram-se as propriedades mecânicas, eixo X o meio de resfriamento. (a) resistência elástica. (b) resistência máxima. (c) dureza. (d) alongamento. Fonte: Kaynar, 2013.....	22
Figura 9. Esquema comparativo entre o processo de forjamento + tratamento térmico e processo de forjamento + resfriamento controlado. Fonte: ASM VOL.14, 1998. Adaptado pelo autor.	23
Figura 10. Forno indutivo utilizado para aquecimento dos blanks. Fonte: autor.....	24
Figura 11. Prensa de forjamento e rebarbação. Fonte: autor.	24
Figura 12. Forno da marca Brasimet, 15kW de potência. Fonte: autor.	25
Figura 13. Pirômetro com capacidade de leitura no intervalo de 400 - 2000°C. Fonte: autor.	25
Figura 14. Durômetro Brinell DUR-03. Fonte: autor.	26
Figura 15. Máquina de tração Kratos. Fonte: autor.	26
Figura 16. Microscópio ótico da fabricante Zeiss. Fonte: autor.	27
Figura 17. Peça posicionada dentro do forno. Seta azul indica região de medição de temperatura. Fonte: autor.....	28
Figura 18. Croqui da peça ensaiada. Setas indicam local de medição de dureza. Fonte: autor.....	29
Figura 19. Croqui das regiões onde foram analisadas das durezas de núcleo e microestrutura. Pontos vermelhos representam locais de medição de dureza. Fonte: autor.	30
Figura 20. Croqui do perfil da peça indicando região de onde os corpos de prova para ensaio de tração foram retirados. Parte hachurada não representa as linhas de fibramento, Fonte: autor.	31
Figura 21. Corpos de prova para ensaio de tração. Da esquerda para direita: Peça 09, 15 e 18. Fonte: autor.	31
Figura 22. Gráfico de dispersão de Dureza x Temperatura. Fonte: autor.	35
Figura 23. CCT do aço. Em destaque encontram-se as curvas com os valores próximos encontrados no ensaio. Fonte: Elaborado pela Gerdau.....	36
Figura 24. Microestruturas. Peça 9: (a) superfície e (b) núcleo. Peça 15: (c) superfície e (d) núcleo. Peça 18: (e) superfície e (f) núcleo. A presença ferrita idiomórfica está destaca com as setas amarelas. Fonte: autor.....	37

Figura 25. (a) Superfície da peça 9 com aproximadamente 15% de ferrita. (b) Núcleo da peça 9 com aproximadamente 5% de ferrita. Dados obtidos através do software ImageJ.	38
Figura 26. (a) Superfície a amostra 15 com aproximadamente 15% de ferrita. (b) Núcleo da amostra 15 com aproximadamente 11% de ferrita. (c) Superfície da amostra 18 com aproximandamente 16% de ferrita. (d) Núcleo da amostra 18 com aproximadamente 12% de ferita. Fonte: autor. Dados obtidos através do software ImageJ.	40
Figura 27. Gráficos com resultados dos ensaios de tração. Fonte: autor.....	41

Lista de Tabelas

Tabela 1. Temperaturas típicas de forjamento para aço carbono. Fonte: adaptado pelo auto, retirado ASM, Vol. 14.....	15
Tabela 2. Características técnicas do forno.....	25
Tabela 3. Ciclos térmicos utilizados nos ensaios.....	28
Tabela 4. Composição química, em % de massa, encontrada.....	32
Tabela 5. Temperatura de entrada e saída das peças ensaiadas.....	33
Tabela 6. Taxas médias de resfriamento de cada peça.....	33
Tabela 7. Tabela dos valores do ensaio de durezas realizadas na superfície das peças.....	34
Tabela 8. Durezas de núcleo das peças selecionadas.....	35
Tabela 9. Resultados do ensaio de tração.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVO	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1	Forjamento	13
	3.1.1 Forjamento a Quente.....	14
	3.1.2 Matriz.....	15
	3.1.3 Matriz Fechada.....	16
3.2	Temperatura de Forjamento	17
3.3	Aço Microligados.....	19
3.4	Aço Microligados ao Vanádio.....	20
3.5	Resfriamento Controlado.....	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	Materiais.....	24
	4.1.1 Matéria-Prima.....	24
4.2	Método.....	24
	4.2.1 Indutor de Aquecimento – Forjamento	24
	4.2.2 Prensa de Forjamento	24
	4.2.3 Forno	25
	4.2.4 Pirômetro	25
	4.2.5 Durômetro	26
	4.2.6 Máquina de Tração.....	26
	4.2.7 Metalografia.....	27
	4.2.8 Espectrômetro	27
4.3	Processo	28
	4.3.1 Forjamento e Resfriamento	28
	4.3.2 Ensaios Metalúrgicos e Propriedades Mecânicas	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	Composição Química.....	32
5.2	Taxas Médias de Resfriamento	32
5.3	Ensaios de Dureza.....	34
5.4	Microestrutura	36
5.5	Ensaio de Tração.....	40
6	CONCLUSÕES	43
7	SUGESTÃO DE TRABALHO FUTUROS	44
8	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

Em muitos casos componentes forjados necessitam passar por processos de tratamento térmico, como têmpera e revenimento, para obter propriedades mecânicas desejadas. A realização desses processos impacta no tempo de processamento e gastos energéticos envolvidos para a fabricação dos componentes, visto que, para os processos citados, é necessário realizar ciclos de aquecimento e resfriamento adicionais aos componentes. Além disso, o tratamento térmico de têmpera é considerado um processo severo, onde o risco de ocorrência de trincas existe, tornando a realização de ensaios não destrutivos, como inspeção por partículas magnéticas ou líquidos penetrantes, quase que obrigatório.

Como alternativa para esses problemas foram desenvolvidos os aços microligados que, com mecanismos de endurecimento por precipitação, refino de grão e microestruturas formadas durante o resfriamento controlado, são capazes de obter resistências mecânicas semelhantes a aços beneficiados por têmpera e revenimento (DEARDO, 2001). Sem a necessidade de tratamento térmico posterior ao forjamento, esses aços são submetidos ao processo termomecânico chamado de 'resfriamento controlado', que necessita de um controle sobre a taxa de resfriamento após o forjamento para se obter as propriedades mecânicas e microestruturas desejadas. Em alguns casos, dependendo da composição do aço microligado e os requisitos solicitados pelo cliente, resfriamentos controlados convencionais, ao ar ou ar forçado (ventilador), entregam propriedades mecânicas superiores as desejadas, tornando o tratamento térmico de recozimento necessário para adequação das propriedades mecânicas exigidas, de acordo com estudos internos realizados em uma empresa da indústria metalomecânica na região metropolitana de Porto Alegre.

Este trabalho apresentará a influência de diferentes taxas de resfriamento em um componente forjado em aço DIN 38MnVS6 nas propriedades mecânicas e na microestrutura, para isso, cada uma das dezoito peças foram expostas a uma combinação de temperaturas e tempos diferentes, com o intuito de encontrar a taxa de resfriamento máxima para o requisitos exigidos para o componente.

O componente em foco neste trabalho foi um Terminal do Cardan (Yoke), utilizado no sistema de transmissão em caminhões. Este elemento mecânico é responsável por transmitir movimento da transmissão pelo Cardan ao diferencial traseiro que realizará a movimentação das rodas. São utilizados na saída da transmissão, entrada e saída do Cardan e entrada ou saída do diferencial traseiro, conforme mostra a **Figura 1**.

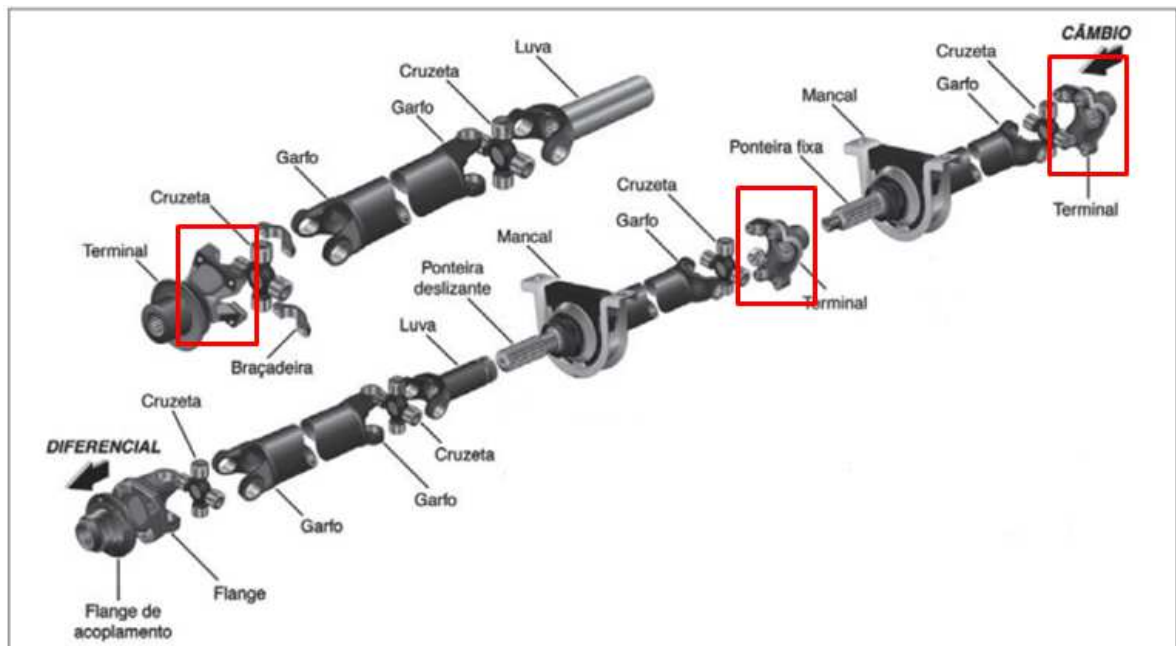


Figura 1. Locais de aplicação do Yoke no sistema de transmissão. Fonte: Spicer - Cardans: Entendo os Eixos Cardans. Adaptado pelo autor.

2 OBJETIVO

Avaliar diferentes taxas de resfriamento em componentes forjados a quente em aço DIN 38MnVS6 visando atingir o intervalo de dureza (núcleo e superfície) especificado pelo projeto do componente, eliminando assim o processo de recozimento utilizado posterior ao forjamento a fim de reduzir a dureza.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- Avaliar a taxa de resfriamento máxima pelo qual o componente pode ser submetido para atender o requisito de dureza exigido pelo projeto do componente;
- Analisar os valores de dureza medidos na superfície dos componentes após a exposição aos diferentes ciclos térmicos e verificar a influência da taxa de resfriamento na dureza medida na superfície da peça;
- Analisar a dureza de núcleo de três peças que atingiram o requisito de dureza citado anteriormente;
- Avaliar as propriedades mecânicas das amostras estudadas através do ensaio mecânico de tração, e comparar os resultados obtidos com os valores de referência no projeto do componente;
- Avaliar microestrutura e sua influência nas propriedades mecânicas.

3 REVISÃO BILIOGRÁFICA

3.1 Forjamento

Dentre os processos de conformação encontra-se o forjamento, no qual se considera uma peça forjada aquela que passa por uma grande deformação plástica, alterando sua forma original, e a porção que sofre deformação plástica é superior à porção que sofre deformação elástica, tornando negligenciável o fenômeno de recuperação elástica (ASM INTERNACIONAL, 2013).

Com relação às vantagens do processo de forjamento, destacam-se: aproveitamento de matéria-prima otimizado, microestrutura mais homogênea e livre de porosidades quando comparado ao processo de fundição, fibramento favorável aos esforços e propriedades exigidas pelos componentes (SCHAEFFER, 2006) e maior facilidade quando for realizado tratamentos térmicos, por promover menor segregação de elementos de liga, tornando o processo mais homogêneo (FORGING, 2021).

Pode-se classificar o processo de forjamento com relação à temperatura de trabalho e quanto ao método de aplicação da carga. Para a temperatura de trabalho podemos dividir em três categorias:

- Forjamento a frio;
- Forjamento a morno;
- Forjamento a quente.

Quanto ao método de aplicação da carga, podemos dividir em duas categorias:

- Forjamento por impacto;
- Forjamento por pressão.

O processo de forjamento pode ocorrer em mais de uma etapa, como mostra a **Figura 2**.

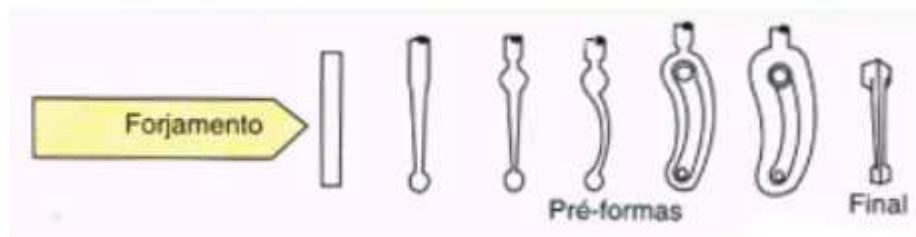


Figura 2. Processo de forjamento com múltiplas etapas. Fonte: CBCM. Editado pelo autor.

3.1.1 Forjamento a Quente

O processo de forjamento a quente em aço implica necessariamente de um aquecimento do *blank* antes do início da conformação, que, com isso, ganhará um aumento na tenacidade e ductilidade do aço, e uma diminuição na resistência mecânica, requerendo assim menor energia para a conformação (CIMM, 2021).

Para aço carbono e aço baixa liga, as temperaturas de trabalho geralmente ficam entre 1150°C até 1250°C, a seleção da temperatura de trabalho é realizada através da análise da composição química do aço. Teores de carbono e elemento de liga influenciam na temperatura de trabalho, sendo que se nota (Tabela 1) uma queda da temperatura de forjamento com um aumento do percentual de carbono (ASM, 1993).

Algumas das desvantagens do forjamento a quente são: precisão geométrica menor quando comparado com forjamento a frio, não uniformidade, da microestrutura e propriedades mecânicas, e cuidados com o tamanho de grão. Como durante o forjamento a superfície da peça sofre uma extração de calor muito superior ao núcleo, e o mesmo permanece durante mais tempo em temperaturas elevadas, pode ocorrer um crescimento excessivo no tamanho grão na região (CIMM, 2021).

Tabela 1. Temperaturas típicas de forjamento para aço carbono. Fonte: adaptado pelo auto, retirado ASM, Vol. 14.

AÇO [SAE]	TEMPERATURA TÍPICA DE FORJAMENTO [°C]
1010	1315
1015	1315
1020	1290
1030	1290
1040	1260
1050	1260
1060	1180
1070	1150
1080	1205

3.1.2 Matriz

Para realizar o forjamento, o *blank* metálico é posicionado entre duas ferramentas que possuem a geometria que se deseja conformar o metal. Esse conjunto de ferramentas recebe a denominação de ‘matriz’ (ALTAN, 2005). Existem dois conjuntos de matrizes:

- Matriz aberta;
- Matriz fechada.

As matrizes abertas são utilizadas para componentes forjados grandes, com baixo volume de produção. De modo geral as peças forjadas são de geometria simples. Com o nome sugere as matrizes abertas não enclausuram o metal em suas cavidades, e a restrição ao movimento lateral do metal comprimido é pequena (ALTAN, 2005). Já para a produção de alto volume e peças com geometrias mais complexas se faz uso das matrizes fechadas, que garantem maior precisão geométrica quando comparada com o processo de forjamento em matriz aberta (ASM, 1998). Na **Figura 3** é mostrado exemplos de matriz aberta e fechada.

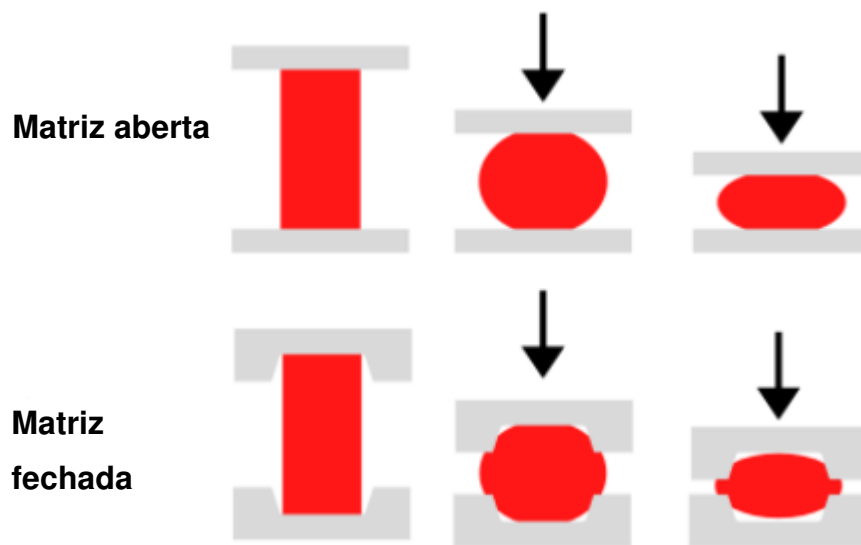


Figura 3. Exemplos de matriz aberta e fechada. Fonte: Milwaukee Forge. Adaptado pelo autor.

3.1.3 Matriz Fechada

Forjamento em matriz fechada (**Figura 4**) é a conformação do componente utilizando duas matrizes, de forma que todo o componente fique confinado entre as cavidades das matrizes no momento do forjamento. Esse processo proporciona elevados níveis de redução, ele é utilizado para o forjamento de peças com geometrias complexas sendo capaz de atender tolerâncias dimensionais mais restritas das alcançadas no forjamento em matrizes abertas (ASM, 1993).

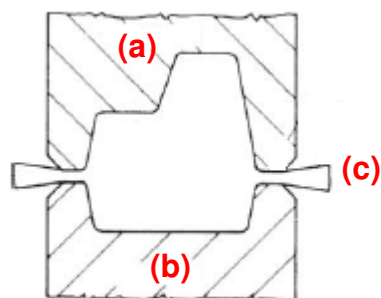


Figura 4. Exemplo de uma matriz fechada. (a) matriz superior. (b) matriz inferior. (c) rebarba. Fonte: Altan, 2005. Adaptado pelo autor.

O processo de forjamento com matriz fechada produz o que se chama de rebarba, que é excesso de metal que escoou no espaço existente entre as duas matrizes e é representada na Figura 4 no item (c). A rebarba ocorre como uma resposta, um alívio, da alta pressão gerada no processo de forjamento com matriz fechada. Ela atua como uma barreira para o metal no interior da matriz, ajudando o preenchimento completo das cavidades da mesma. A remoção da rebarba ocorre no processo chamado de 'rebarbação', um corte realizado no perímetro da peça (ASM, 1998).

A existência da rebarba significa perda de matéria-prima, ou seja, um desperdício, e deve ser minimizada.

O uso da matriz fechada possibilita um controle sobre a direção dos grãos, garantido propriedades mecânicas melhores na longitudinal dos componentes (ASM, 1998).

3.2 Temperatura de Forjamento

Quando aquecido de forma contínua até elevadas temperaturas, o ferro passa por uma transformação de fase. A transformação ocorre no retículo cristalino do ferro, passando de uma estrutura CCC (cúbica de corpo centrado) para uma estrutura CFC (cúbica de face centrada) (**Figura 5**). O início dessa transformação ocorre quando a temperatura ultrapassa a Ac1 do aço, temperatura denominada de início da formação da austenita, e finalizando a transformação quando ultrapassa a Ac3, denominada de temperatura crítica.

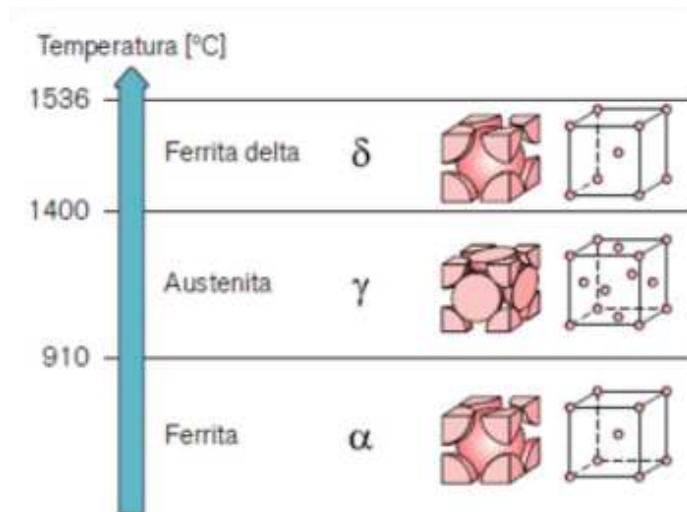


Figura 5. Alteração estrutural do ferro. Ferro α (ferrita) com reticulado CCC. Ferro γ (austenita) com reticulado CFC. Fonte: Estácio

As temperaturas empregadas no forjamento a quente de aço ao carbono e aço baixa liga são superiores a temperatura crítica (A_{c3}), realizando uma transformação austenítica completa. No momento dessa transformação algumas alterações nas propriedades metalúrgicas do aço ocorrem, tais como, o material se tornar não-magnético, alterações nas propriedades mecânicas e alterações na microestrutura.

Devido a sua transformação estrutural, de CCC para CFC, o ferro, agora na forma austenítica, possui a capacidade de solubilizar em sua matriz um percentual, de carbono e outros elementos de liga maior do que no reticulado CCC. Tal fato é de extrema importância para a realização de tratamentos térmicos e termomecânicos (resfriamento controlado) (CHIAVERINI, 1998).

A escolha da temperatura de austenitização deve levar em consideração as necessidades de processo, no caso do forjamento a quente, precisam ser altas o suficiente para garantir ao aço tenacidade e ductilidade, sem que ocorra um crescimento excessivo do tamanho de grão austenítico (CHIAVERINI, 1998).

3.3 Aço Microligados

O desenvolvimento de aços microligados teve início na década de 50, período no qual estruturas soldadas eram amplamente utilizadas, fazendo com que, o aumento da resistência mecânica dos aços através do uso do carbono se tornasse proibido, visto que esse aumento da resistência afetaria a tenacidade do material. Surgindo como solução os aços microligados, que endurecem através do mecanismo de precipitação e refino de grão (LAGNEBORG, 1999).

Endurecimento por precipitação ocorre quando finos particulados (precipitados), dispersos na matriz do metal, atuam como barreiras para o movimento das discordâncias. Segundo Mitchell (2004) para ocorrer nucleação desses particulados, uma liga, susceptível a esse fenômeno, deve ser aquecida a uma temperatura onde ocorrerá a solubilização de fases e elementos de liga, então resfriado e posteriormente passar por um novo aquecimento a temperaturas inferiores ao aquecimento anterior para que os ocorra à precipitação, como mostra na **Figura 6**.

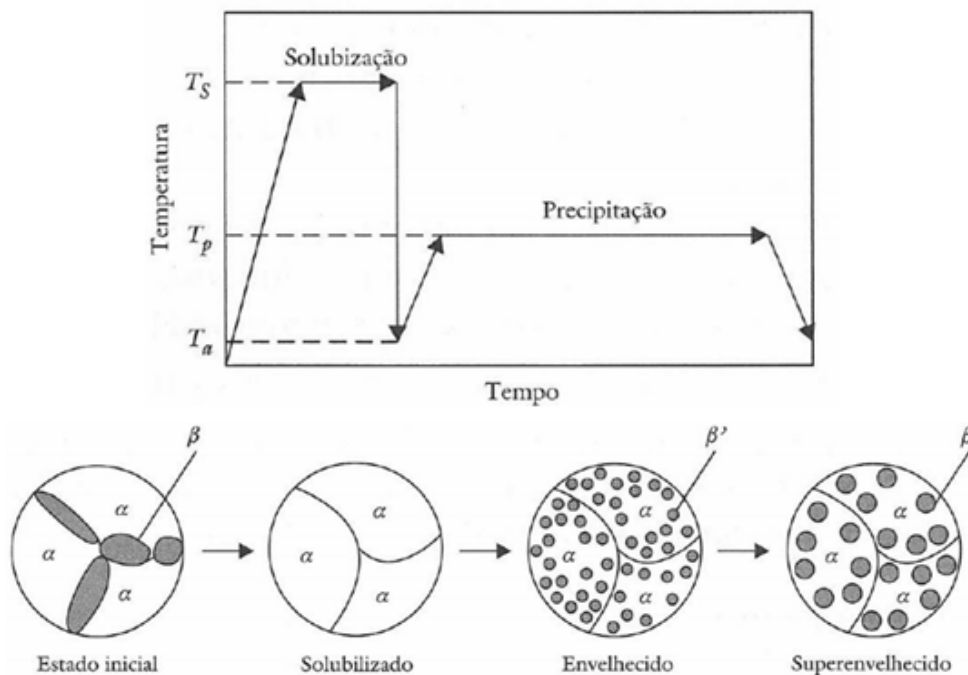


Figura 6. Representação esquemática do processo de solubilização e precipitação.

Fonte: DOS SANTOS, 2005.

O tratamento térmico utilizado para realizar a nucleação dos precipitados é conhecido como 'envelhecimento' devido sua forte relação com o tempo. Caso a liga seja exposta por longos períodos de tempo ocorrerá um crescimento dos precipitados na matriz, e se o crescimento for excessivo, os mesmos perderão o efeito de barreira, reduzindo assim a resistência do material, esse efeito é chamado de 'superenvelhecimento' (DOS SANTOS, 2005).

3.4 Aço Microligados ao Vanádio

Em aços microligados, elementos de liga como nióbio, titânio, níquel e vanádio são excelentes formadores de carbonetos, nitretos e carbonitretos que nucleiam na forma de precipitados, eles se encontram finamente dispersos na ferrita, precipitando inclusive nas lamelas de ferrita (**Figura 7**). Quando comparado aos demais elementos de liga, o vanádio possui a vantagem de ter alta solubilidade na austenita em relativamente baixas temperaturas (1050°C) (LAGNEBORG, 1999). A primeira fase de nucleação dos precipitados durante o processo de forjamento ocorre ainda na austenita, sendo esses os responsáveis pelo refino de grão dos aços microligados. A segunda fase ocorre durante a transformação da austenita para a ferrita, ocorrendo na interface das fases e na ferrita (GÜNDÜZ, 2005) e perlita (LAGNEBORG, 1999) tal fato faz com que o tratamento de envelhecimento seja dispensado.

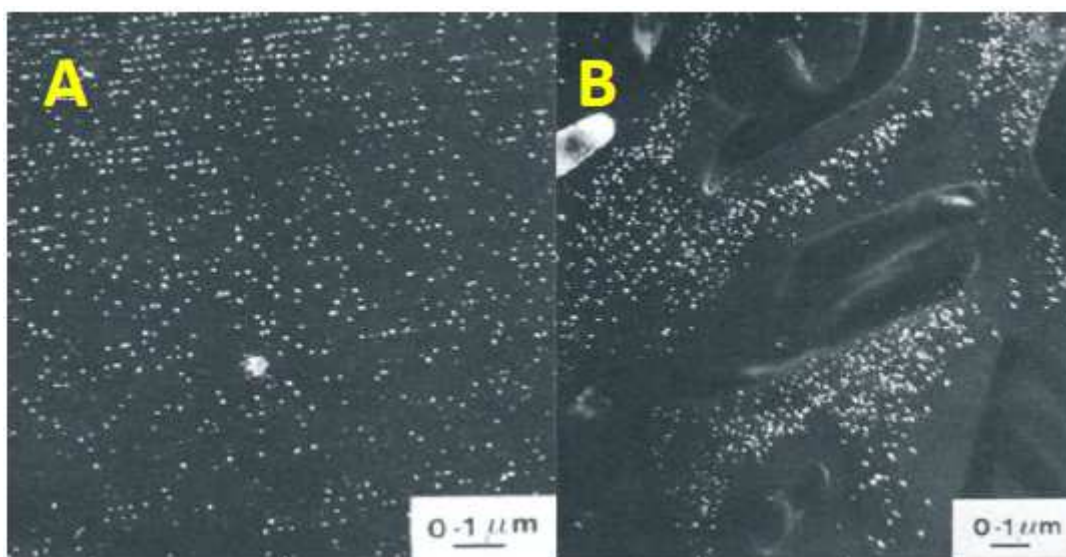


Figura 7. Imagens realizadas em um microscópio eletrônico de transmissão. Em A precipitados dispersos na ferrita, em B precipitados nas lamelas de ferrita. Fonte: LI,

Segundo Gündür, a temperatura no qual os precipitados irão se formar dita qual o papel que eles terão nos aços microligados, além disso, a taxa de resfriamento possui forte influência na temperatura de precipitação dos mesmos. Quanto maior a taxa de resfriamento, menor será a temperatura de precipitação, determinando se irão nuclear na austenita ou ferrita.

Além do endurecimento por precipitação, aços microligados ao vanádio sofrem alteração quanto a sua resistência mecânica e tenacidade com mudanças no teor de carbono. Aumentando seu percentual em massa de carbono, aumenta-se a resistência máxima, porém perde-se em tenacidade. Isso ocorre porque quanto maior for o teor de carbono no aço, maior será a fração de perlita (LI, 2013). No caso de um aço microligado ao vanádio com teor de carbono aproximado de 0,38%, como o aço DIN 38MnVS6, a microestrutura esperada é formada por perlita e ferrita.

A taxa de resfriamento após forjamento possui um papel importante no controle da microestrutura e propriedades mecânicas nos aços microligados ao vanádio. O aumento da taxa de resfriamento durante o processo de resfriamento controlado provocará um aumento nas propriedades mecânicas, como dureza e resistência máxima, sem provocar uma diminuição na ductilidade em decorrência do tamanho de grão crescer menos quando comparado com baixas taxas de resfriamento (LI, 2013). Além do grão, a microestrutura formada também será mais refinada, o espaçamento interlamelar da perlita será menor, pois altas taxas de resfriamento suprimem a difusão atômica dos elementos. Por outro lado, baixas taxas de resfriamento irão formar microestruturas mais grosseiras, com o tamanho de grão austenítico prévio maiores (RODRIGUES, 2000).

Segundo Capdevila (2004), podemos classificar a ferrita nucleada pelo processo de difusão em duas classes principais: ferrita alotriomórfica e idiomórfica. Identifica-se como ferrita alotriomórfica aquela que nucleia e cresce no contorno de grão austenítico prévio, já a nucleação da ferrita idiomórfica é intragranular, tendo inclusões como sítios de nucleação. Sendo assim, na medida em que o tamanho de grão austenítico prévio cresce, a nucleação de ferrita alotriomórfica é preterida à de ferrita idiomórfica, visto que a área do contorno de grão diminui, e quanto maior o

tamanho do grão, maior a probabilidade de conter mais inclusões que servirão como sítios de nucleação para ferrita idiomórfica.

A fração de perlita e ferrita formada e o tamanho dessas fases, possui uma grande influência nas propriedades mecânicas e são controladas pelo, parâmetros de forjamento e resfriamento pós forjamento (KAYNAR, 2013). Na Figura 8 é possível observar a influência do meio de resfriamento na tensão de escoamento, tensão máxima, na dureza e alongamento em um aço DIN 38MnVS6 (MA) e um AISI 1040 (MC). Com o aumento da severidade do meio de resfriamento houve um aumento na tensão de escoamento, tensão máxima e dureza, porém houve uma redução no alongamento.

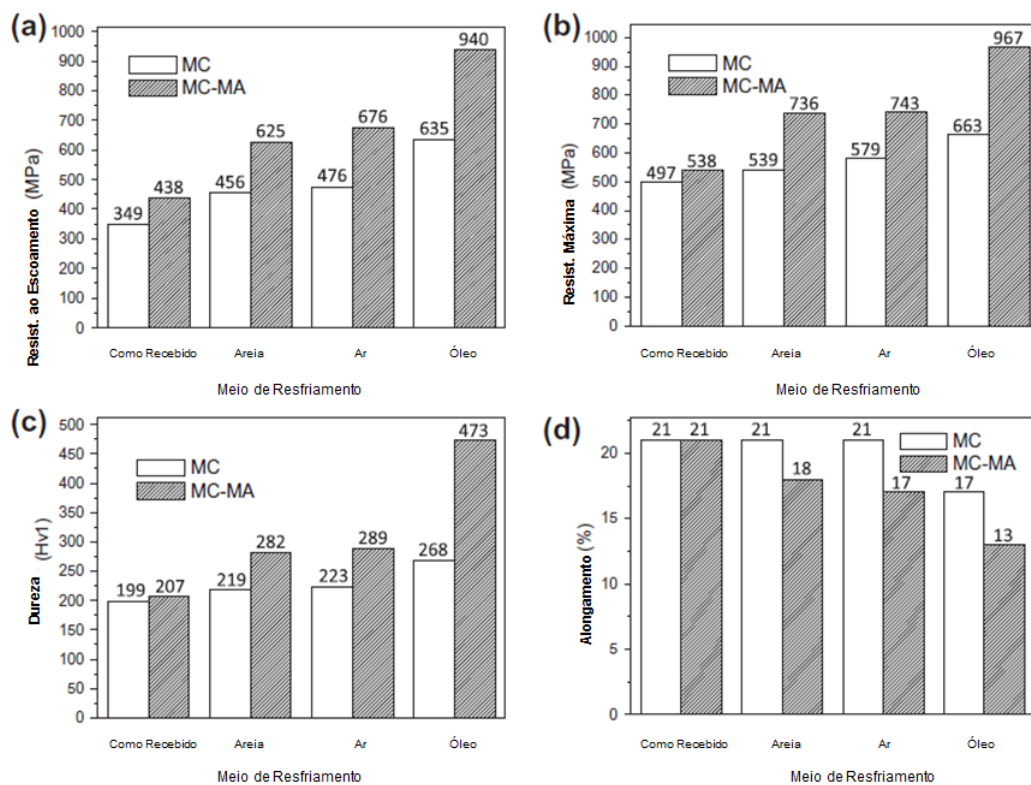


Figura 8. Eixo Y encontram-se as propriedades mecânicas, eixo X o meio de resfriamento. (a) resistência elástica. (b) resistência máxima. (c) dureza. (d) alongamento. Fonte: Kaynar, 2013

3.5 Resfriamento Controlado

Resfriamento controlado pode ser definido como: resfriamento de um material aquecido a altas temperaturas de forma que, a sua taxa de resfriamento será controlada com o intuito de prevenir a formação de fases duras, trincas, defeitos internos ou para atingir propriedades mecânicas ou microestruturas desejadas. (ASM, 1991).

É no forjamento a quente onde o processo de resfriamento controlado encontra seu potencial, pois aços microligados ao vanádio foram desenvolvidos com o intuito de eliminar o processo de têmpera e revenimento, muitas vezes necessários para se obter as propriedades mecânicas desejadas, e passam a utilizar apenas o resfriamento pós forjamento como método de beneficiamento (**Figura 9**).

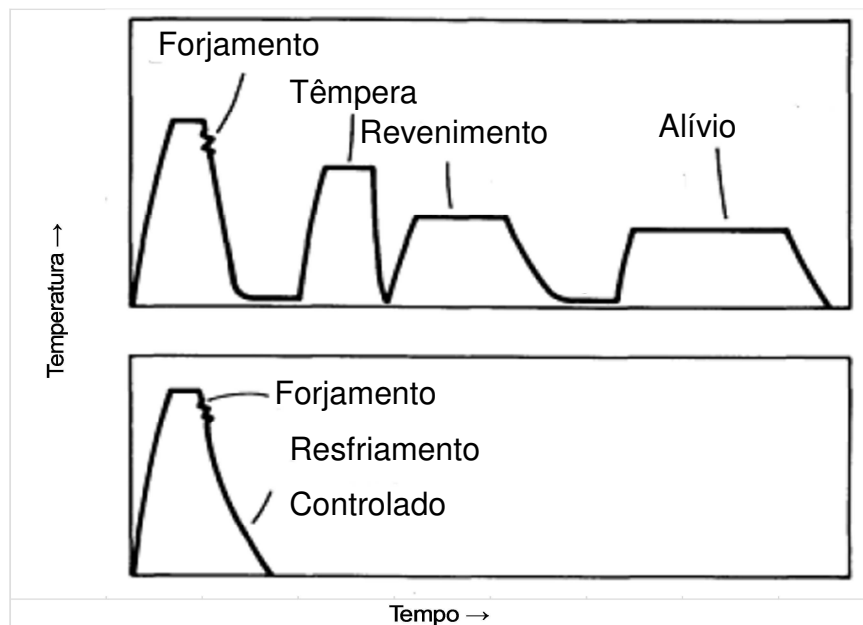


Figura 9. Esquema comparativo entre o processo de forjamento + tratamento térmico e processo de forjamento + resfriamento controlado. Fonte: ASM VOL.14, 1998. Adaptado pelo autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Matéria-Prima.

Para este trabalho foi utilizado duas corridas diferentes do aço DIN 38MnVS6, vindas do fornecedor em forma de barras redondas laminadas,

4.2 Método

4.2.1 Indutor de Aquecimento – Forjamento

O aquecimento dos blanks de aço foi realizado em um forno indutivo (**Figura 10**), com tempo aproximado de 30 segundos e temperatura média de 1175°C.



Figura 10. Forno indutivo utilizado para aquecimento dos blanks. Fonte: autor

4.2.2 Prensa de Forjamento

Para o forjamento foi utilizado uma prensa do fabricante Smeral, de 4000 tonf (Figura 11).



Figura 11. Prensa de forjamento e rebarbação. Fonte: autor.

4.2.3 Forno

Para o resfriamento controlado das amostras, se utilizou um forno com as características técnicas da Tabela 2. Para sua utilização nos ensaios se colocou um termopar novo, calibrado. O forno é apresentado na Figura 12.

Tabela 2. Características técnicas do forno.

Característica	Especificado
Tensão	380V - 60Hz
Potência	15 kW
Temperatura Máxima	1000°C



Figura 12. Forno da marca Brasimet, 15kW de potência. Fonte: autor.

4.2.4 Pirômetro

As medições de temperatura das peças foram realizadas com um pirômetro infravermelho *Raytek Raynger 3i®*, conforme Figura 13.



Figura 13. Pirômetro com capacidade de leitura no intervalo de 400 - 2000°C. Fonte: autor.

4.2.5 Durômetro

Os ensaios de dureza (superficial e núcleo) foram realizados em um durômetro Brinell (Figura 14) penetrador com esfera de tungstênio de 10mm de diâmetro e carga de 3000kgf aplicada durante aproximadamente 10 segundos, de acordo com a norma ABNT NBR ISO187.



Figura 14. Durômetro Brinell DUR-03. Fonte: autor.

4.2.6 Máquina de Tração

O equipamento de tração utilizado foi o MKU (Figura 15) da empresa Kratos. A máquina é capaz de realizar ensaios de tração e compressão. Os dados dos ensaios são enviados e coletados pelo software da empresa fabricante.



Figura 15. Máquina de tração Kratos. Fonte: autor.

4.2.7 Metalografia

As análises microestruturais das amostras selecionadas foram realizadas em um microscópio ótico, modelo Axiovert 40 MAT, da fabricante Zeiss (Figura 16). Acoplado ao microscópio se encontra uma câmera digital para aquisição de imagem, o software Axionvision 4.8.0.0 realiza a comunicação entre a câmera e o computador.



Figura 16. Microscópio ótico da fabricante Zeiss. Fonte: autor.

As amostras foram preparadas pelo método metalográfico tradicional após o corte, onde passaram pelo processo de embutimento em baquelite, lixadas até lixa 1200, polidas com alumina e atacadas com o reagente química Nital 3% (3ml de HNO_3 em 97ml de álcool etílico).

4.2.8 Espectrômetro

A composição química das amostras foi realizada com o espectrômetro de emissão ótica da marca Spectro, modelo SpectroLab. O software utilizado pelo equipamento é o Spark Analyzer 3.01.

4.3 Processo

4.3.1 Forjamento e Resfriamento

Para avaliar a influência da taxa de resfriamento nas propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço DIN 38MnVS6 após o forjamento a quente, 18 (dezoito) peças foram submetidas, de forma isolada, a diferentes ciclos térmicos conforme mostrada na **Tabela 3** abaixo.

Tabela 3. Ciclos térmicos utilizados nos ensaios.

Ciclo Térmico		Temperatura [°C]					
		100	200	300	350	400	450
Tempo [min]	8	1	4	7	10	13	16
	12	2	5	8	11	14	17
	16	3	6	9	12	15	18

Após o processamento das peças, estas foram retiradas da linha de produção para realização dos ensaios deste. A coleta das peças, para serem levadas ao forno (Figura 12), localizado atrás do grupo de forjamento, foi realizada após o fim da rebarbação, com o auxílio de uma tenaz. Com a utilização do pirômetro (**Figura 13**) realizou-se a medição de temperatura (entrada e saída) das peças sempre na mesma região, como indica a seta azul da **Figura 17**. Elas foram posicionadas dentro do forno sempre na mesma posição.

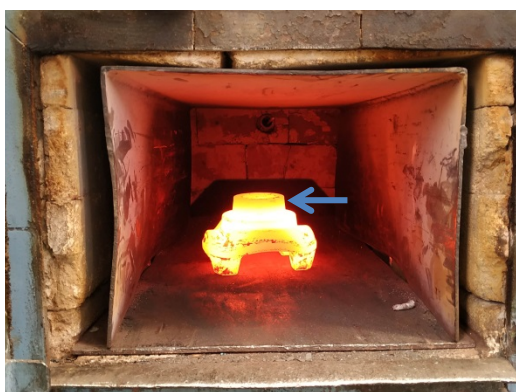


Figura 17. Peça posicionada dentro do forno. Seta azul indica região de medição de temperatura. Fonte: autor.

Com o fim da exposição ao ciclo térmico correspondente, as peças foram resfriadas ao ar até atingirem a temperatura ambiente, então foi realizado o ensaio de dureza Brinell na superfície da peça, e para verificar a homogeneidade da peça com relação a dureza, mediu-se em 3 (três) locais diferente, como mostra Figura 18.

REGIÕES PARA MEDIÇÃO DE DUREZA

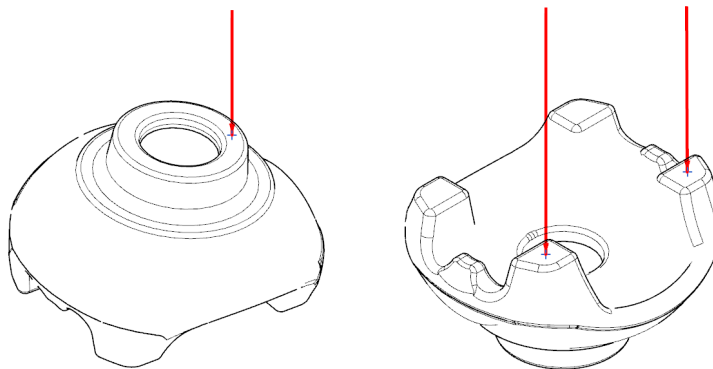


Figura 18. Croqui da peça ensaiada. Setas indicam local de medição de dureza.

Fonte: autor.

Obtiveram-se taxas médias de resfriamento, para cada amostra, utilizando as temperaturas iniciais, finais e o tempo de forno estipulados na **Tabela 3**.

Para o cálculo das taxas médias de resfriamento (T_{mr}) [°C/s] das peças, utilizou-se a Equação 1.

$$T_{mr} = \frac{(T_i - T_f)}{t} \quad [1]$$

Onde:

- T_i = Temperatura de entrada no forno [°C];
- T_f = Temperatura de saída do forno [°C];
- t = Tempo de permanência no forno [s].

4.3.2 Ensaios Metalúrgicos e Propriedades Mecânicas

A partir dos resultados de dureza superficial, foram selecionadas 3 peças para a realização dos ensaios metalúrgicos (composição química e microestrutura) e ensaios das propriedades mecânicas (dureza de núcleo e ensaio de tração). As amostras selecionadas foram: amostra 9 (nove), amostra 15 (quinze) e amostra 18 (dezoito). Como o componente forjado possui duas regiões com geometria (espessura) e massas diferentes e essas regiões se encontram a um ângulo de 90°, os corpos de prova, para análise da microestrutura e durezas de núcleo, foram retirados de ambas as regiões (Figura 19).

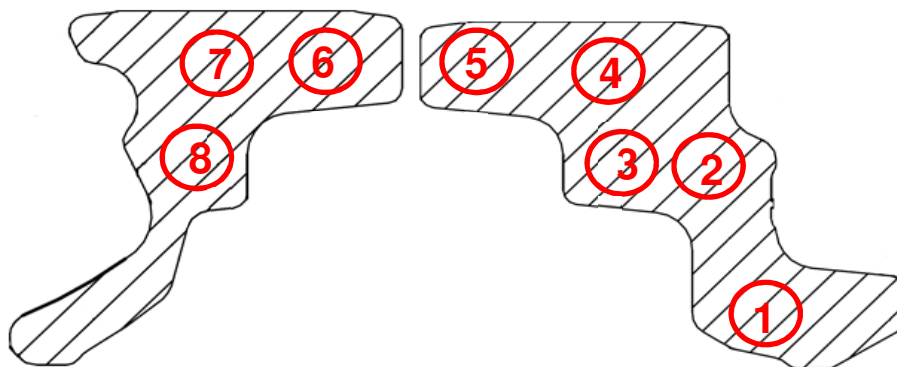


Figura 19. Croqui das regiões onde foram analisadas das durezas de núcleo e microestrutura. Pontos vermelhos representam locais de medição de dureza. Fonte: autor.

Devido às linhas de fibragem do componente forjado, foi possível retirar os corpos de prova da região indicada na Figura 20 com de 6mm de diâmetro (**Figura 21**), seguindo as dimensões da norma DIN 50125:2016-12.

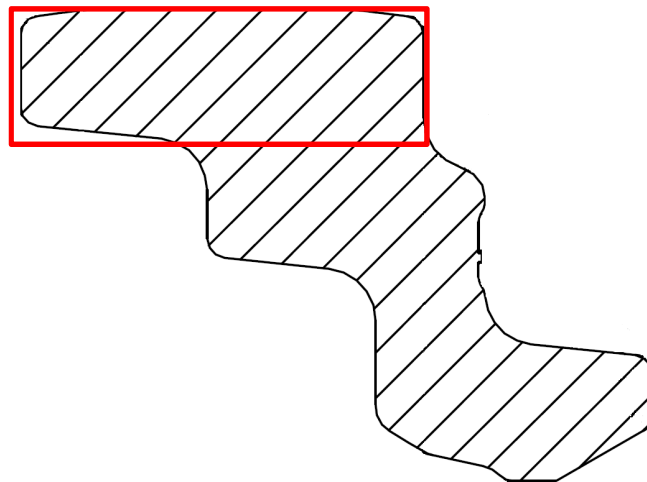


Figura 20. Croqui do perfil da peça indicando região de onde os corpos de prova para ensaio de tração foram retirados. Parte hachurada não representa as linhas de fibramento, Fonte: autor.



Figura 21. Corpos de prova para ensaio de tração. Da esquerda para direita: Peça 09, 15 e 18. Fonte: autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Composição Química

A **Tabela 4** apresenta as composições químicas encontradas nas corridas ensaiadas.

Tabela 4. Composição química, em % de massa, encontrada.

Elemento [%]	Especificado		Encontrado	
	Mín.	Máx.	Corrida A	Corrida B
C	0,34	0,41	0,36	0,37
Si	0,15	0,80	0,64	0,67
Mn	1,2	1,6	1,35	1,36
P	-	0,025	0,021	0,022
S	0,02	0,06	0,022	0,022
V	0,08	0,20	0,084	0,086
Cr	-	0,3	0,17	0,13
N	0,01	0,02	0,0121	0,012

A corrida A foi utilizada para as peças 1 (um) até 9 (nove), enquanto que a corrida B foi utilizada para as peças 10 até 18.

5.2 Taxas Médias de Resfriamento

Na **Tabela 5** é apresentada a numeração das peças junto com a temperatura de entrada, saída e o tempo de permanência no forno.

Tabela 5. Temperatura de entrada e saída das peças ensaiadas.

Peça	Temperatura de Entrada [°C]	Temperatura de Saída [°C]	Tempo [s]
1	960	640	480
2	985	583	720
3	990	518	960
4	940	640	480
5	980	610	720
6	970	541	960
7	980	655	480
8	955	618	720
9	950	555	960
10	920	643	480
11	940	624	720
12	970	586	960
13	950	647	480
14	940	641	720
15	980	608	960
16	970	653	480
17	980	650	720
18	930	614	960

A **Tabela 6** foi criada para melhor comparação das taxas de resfriamento, que foram calculadas através da Equação 1, com relação ao aumento da temperatura em cada um dos tempos. Observa-se que para o tempo de 480s, a taxa de resfriamento pouco foi influenciada pela temperatura. Para exposição de tempos maiores, o aumento da temperatura começa a ter influência na taxa de resfriamento.

Tabela 6. Taxas médias de resfriamento de cada peça.

	Tempo [s]					
	480		720		960	
Temperatura [°C]	Peça	Tmr [°C/s]	Peça	Tmr [°C/s]	Peça	Tmr [°C/s]
100	1	0,67	2	0,56	3	0,49
200	4	0,63	5	0,51	6	0,45
300	7	0,68	8	0,47	9	0,41
350	10	0,58	11	0,44	12	0,40
400	13	0,63	14	0,42	15	0,39
450	16	0,66	17	0,46	18	0,33

5.3 Ensaios de Dureza

Os valores dos ensaios de durezas realizados nas superfícies de todas as peças são apresentadas na **Tabela 7**. A solicitação do cliente é máximo 270 HB ao longo de todo componente. Para auxiliar na interpretação visual dos dados, foi adicionado um mapa de calor (escala de cor), onde as durezas mais baixas são apresentadas em tons de verde, as intermediárias em tons de amarelo e as mais altas em tons de vermelho.

Tabela 7. Tabela dos valores do ensaio de durezas realizadas na superfície das peças.

Temperatura [°C]	Tempo [s]								
	480			720			960		
	Peça	Dureza [HBW]	Média [HBW]	Peça	Dureza [HBW]	Média [HBW]	Peça	Dureza [HBW]	Média [HBW]
100	1	282	283	2	275	281	3	278	288
		283			283			293	
		285			286			293	
200	4	274	272	5	266	273	6	269	275
		271			285			277	
		272			268			280	
300	7	275	272	8	262	260	9	268	266
		278			256			269	
		263			262			262	
350	10	274	275	11	262	264	12	257	262
		272			266			265	
		280			265			263	
400	13	269	272	14	268	264	15	257	269
		268			257			271	
		278			268			280	
450	16	263	262	17	266	259	18	269	264
		263			252			260	
		260			259			262	

É possível notar que houve uma diminuição da dureza das peças com a diminuição da taxa de resfriamento.

A **Figura 22** mostra o gráfico de dispersão da relação Dureza x Temperatura, com ele é possível notar uma tendência de valores menores de dureza medidas na superfície das peças com o aumento da temperatura, logo uma diminuição da taxa de resfriamento.

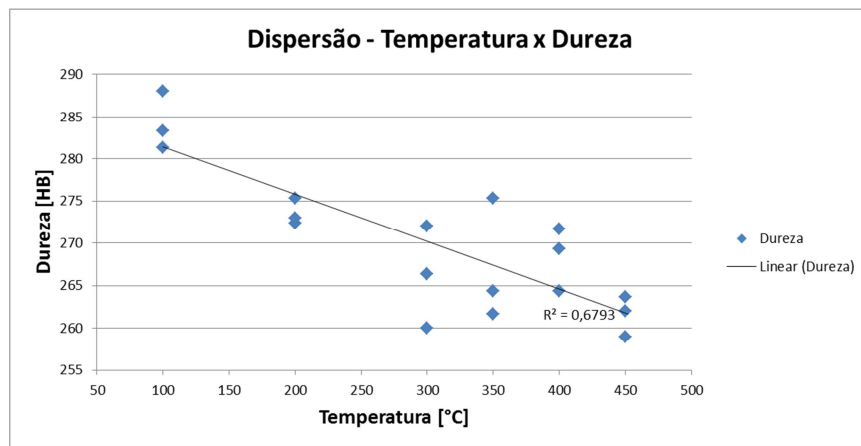


Figura 22. Gráfico de dispersão de Dureza x Temperatura. Fonte: autor.

Nas durezas de núcleo, mostradas na **Tabela 8**, foi possível observar o mesmo comportamento encontrado nas durezas superficiais, durezas mais baixas em peças expostas a taxa de resfriamento menor. O coeficiente de determinação (R^2) retornou um valor de 0,679, o que significa que a temperatura afeta em aproximadamente 68% a variância da dureza. Na empresa em que o este trabalho foi executado, um valor de $R^2 = 0,5$ é considerado alto e a variável em questão possui grande impacto no resultado do processo.

Tabela 8. Durezas de núcleo das peças selecionadas.

Característica	Região	Resultado		
		Peça 9	Peça 15	Peça 18
Dureza de Núcleo [HBW]	1	275	259	266
	2	271	268	266
	3	271	270	270
	4	277	270	270
	5	278	270	260
	6	277	266	263
	7	283	260	263
	8	272	270	269
	Média	276	267	266
	Desv. Padrão	4	4	3

Faz-se notar que a dureza de núcleo da peça 9 (nove) foi maior do que a dureza superficial encontrada e encontra-se fora da máxima solicitada. As razões para esse fenômeno se encontram na seção **Microestrutura**.

5.4 Microestrutura

Como esperado, com um aumento na temperatura do forno e o tempo de permanência, a taxa média de resfriamento diminuiu. Com tais taxas de resfriamento, a microestrutura esperada é Perlita + Ferrita, como demonstra o diagrama CCT do aço (**Figura 23**).

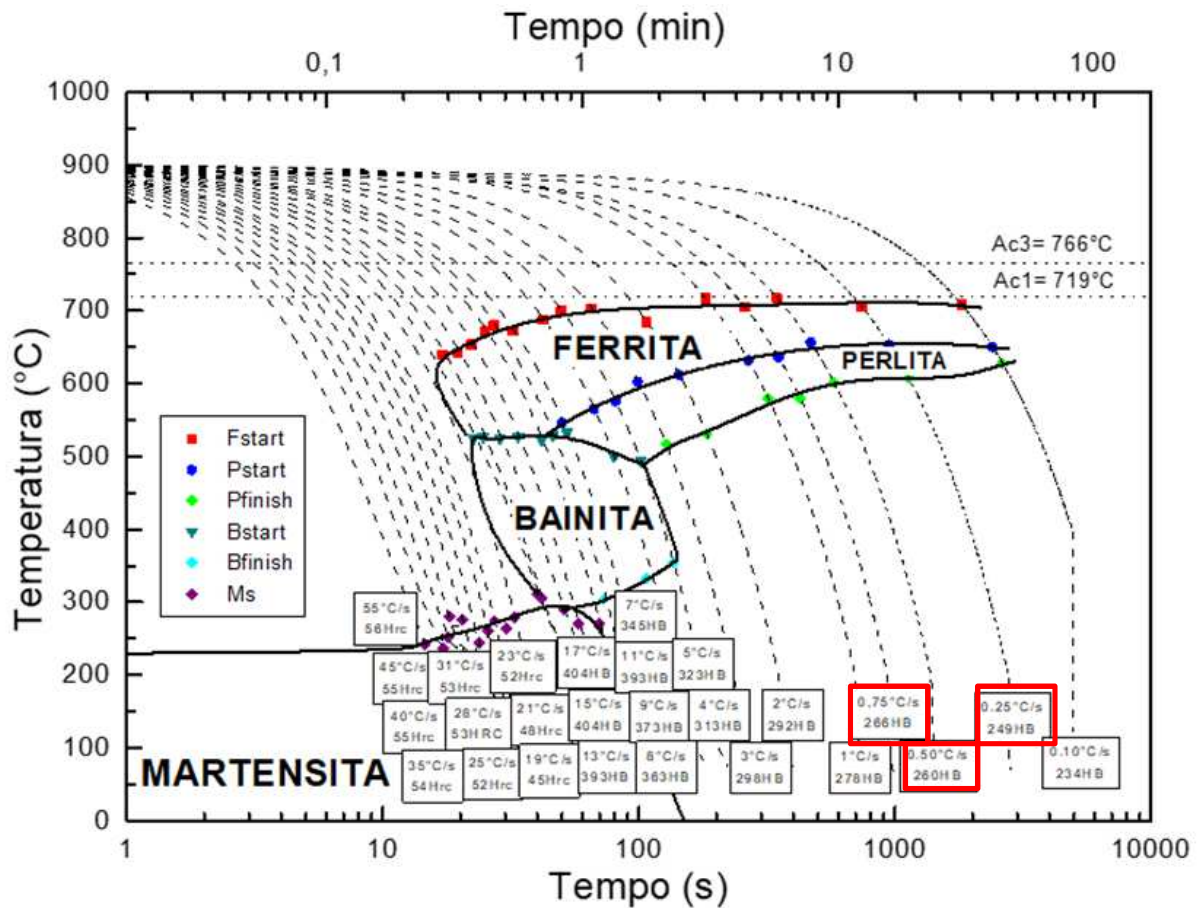


Figura 23. CCT do aço. Em destaque encontram-se as curvas com os valores próximos encontrados no ensaio. Fonte: Elaborado pela Gerdau.

As microestruturas encontradas são apresentadas na **Figura 24**, (a) e (b) são referentes a peça 9, (c) e (d) referentes a peça 15 e (e) e (f) referentes a peça 18.

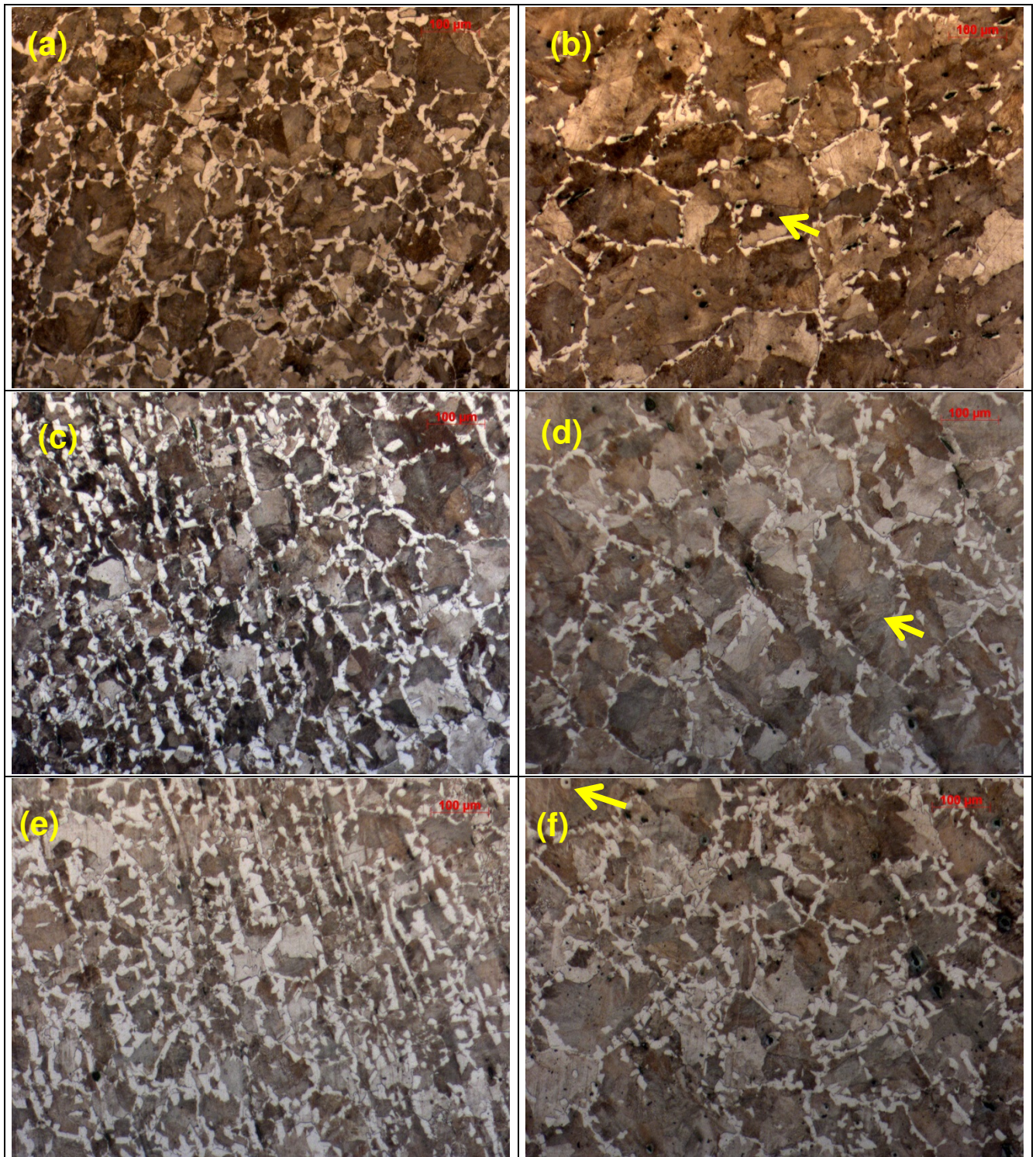


Figura 24. Microestruturas. Peça 9: (a) superfície e (b) núcleo. Peça 15: (c) superfície e (d) núcleo. Peça 18: (e) superfície e (f) núcleo. A presença ferrita idiomórfica está destaca com as setas amarelas. Fonte: autor.

As microestruturas encontradas nas amostras analisadas são compostas por Perlita + Ferrita, como previsto pelo CCT do aço mostrado na Figura 23. Nota-se um aumento gradual da fração de ferrita com a diminuição da taxa de resfriamento, além disso, nas regiões com tamanho de grão mais grosseiro observa-se uma presença maior da ferrita idiomórfica quando comparados as regiões com um grão mais refinado (Figura 24).

É possível notar na microestrutura da amostra 9 (nove) (Figura 24) que a superfície possui uma microestrutura mais refinada, com uma fração de ferrita superior a encontrada no núcleo (Figura 25), pois a superfície é justamente a região que sofre maior conformação durante o processo de forjamento (CIMM, 2021) e o núcleo, região de menor deformação plástica, possui uma região mais grosseira e possui uma fração de ferrita menor, por consequência, uma maior fração de perlita.

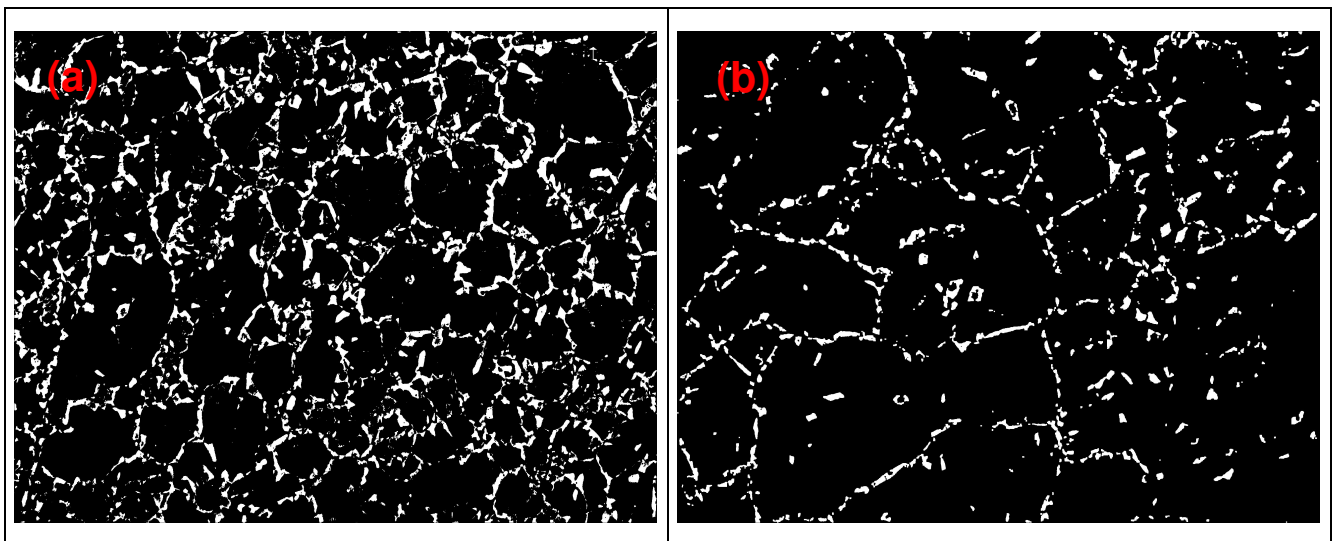


Figura 25.(a) Superfície da peça 9 com aproximadamente 15% de ferrita. (b) Núcleo da peça 9 com aproximadamente 5% de ferrita. Dados obtidos através do software ImageJ.

Li (2013) mostra que em regiões com tamanho de grão maior, a fração de perlita aumenta, resultando em um aumento de resistência mecânica. Como a nucleação da ferrita ocorre preferencialmente no contorno de grão, tamanhos de grãos menores favorecem a sua formação. Durante o forjamento, os grãos austeníticos são refinados por deformação e em seguida sofrem recuperação dinâmica, ocasionando um maior refino no grão (Li, 2013). Lagneborg (1999) cita

que diversos estudos, através de análises com microscópio eletrônico, já comprovaram a ocorrência da precipitação de carbonetos e nitretos de vanádio (V(C,N)) na perlita e que, devido ao fato da formação da perlita nuclear em temperaturas menores, seus precipitados são mais finos. Sabe-se que precipitados finos são eficientes ancoradores de descontinuidades e que sua presença aumenta a resistência do material. Tal combinação, de maior fração de perlita no núcleo e maior fração de ferrita na superfície, explicaria a dureza superficial da amostra 9 ser menor do que a dureza de núcleo.

Assim como na amostra 9, as amostras 15 e 18 também apresentaram fração de ferrita maior na superfície do que no núcleo, entretanto a diferença encontrada foi menor. A amostra 15 teve aproximadamente 15% de ferrita na superfície e 11% no núcleo, enquanto que a amostra 18 teve 16% na superfície e 12% no núcleo, como mostra a **Figura 26**.

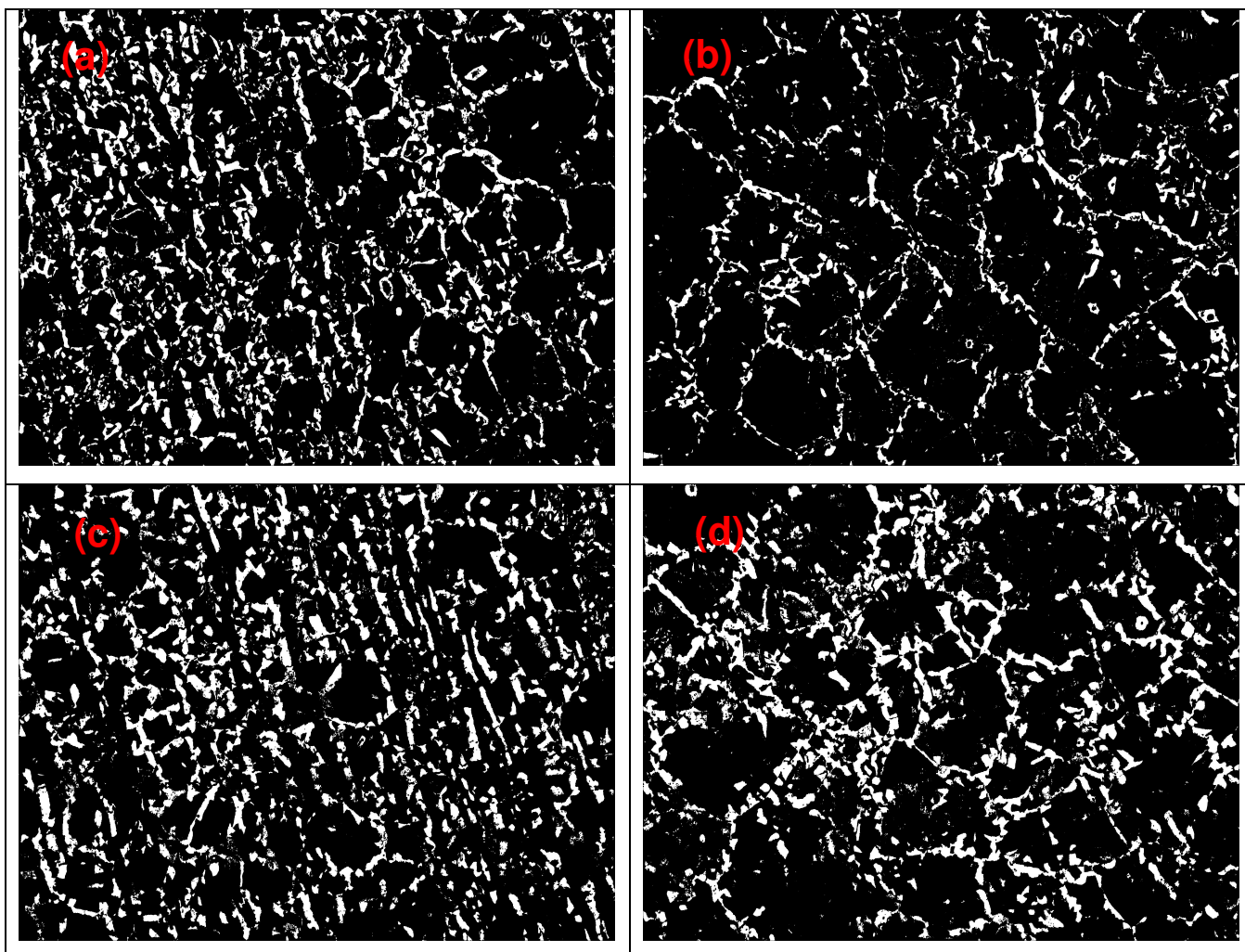


Figura 26. (a) Superfície a amostra 15 com aproximadamente 15% de ferrita. (b) Núcleo da amostra 15 com aproximadamente 11% de ferrita. (c) Superfície da amostra 18 com aproximadamente 16% de ferrita. (d) Núcleo da amostra 18 com aproximadamente 12% de ferrita. Fonte: autor. Dados obtidos através do software ImageJ.

5.5 Ensaio de Tração

A Tabela 9 refere-se aos valores encontrados nos ensaios de tração realizados nas amostras 9, 15 e 18, também encontra-se valores utilizados na indústria para componentes forjados em DIN 38MnVS6. No caso do componente do projeto, esses valores servem apenas como referência.

A amostra 9 apresentou valores de resistência máxima e tensão de escoamento maiores do que as demais amostras.

Tabela 9. Resultados do ensaio de tração.

Propriedade	Referência		Encontrado								
			Amostra 09			Amostra 15			Amostra 18		
	Mín.	Máx.	CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média	CP1	CP2	Média
Resistência Máxima [MPa]	800	950	924	917	920	903	895	899	901	904	902
Tensão de Escoamento [MPa]	520	-	649	630	640	642,5	621	631,8	633	616,5	624
Alongamento [%]	12	-	12,5	12,5	12,5	12,5	13,5	13	12,5	14	13,25
Redução de Área [%]	25	-	32	32,5	32,25	34	38	36	34	34,5	34,25

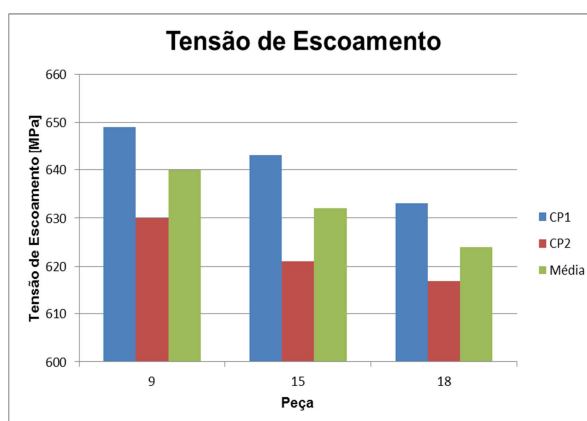
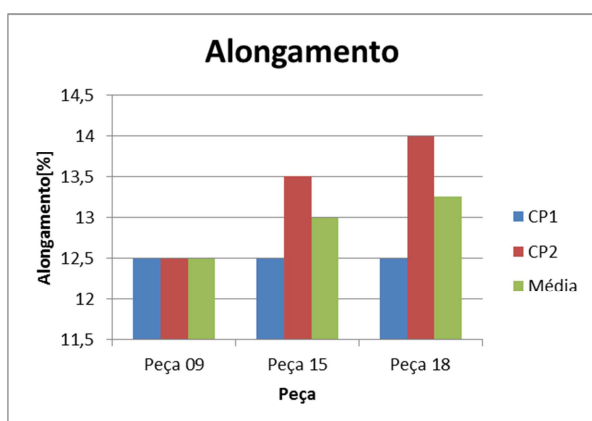
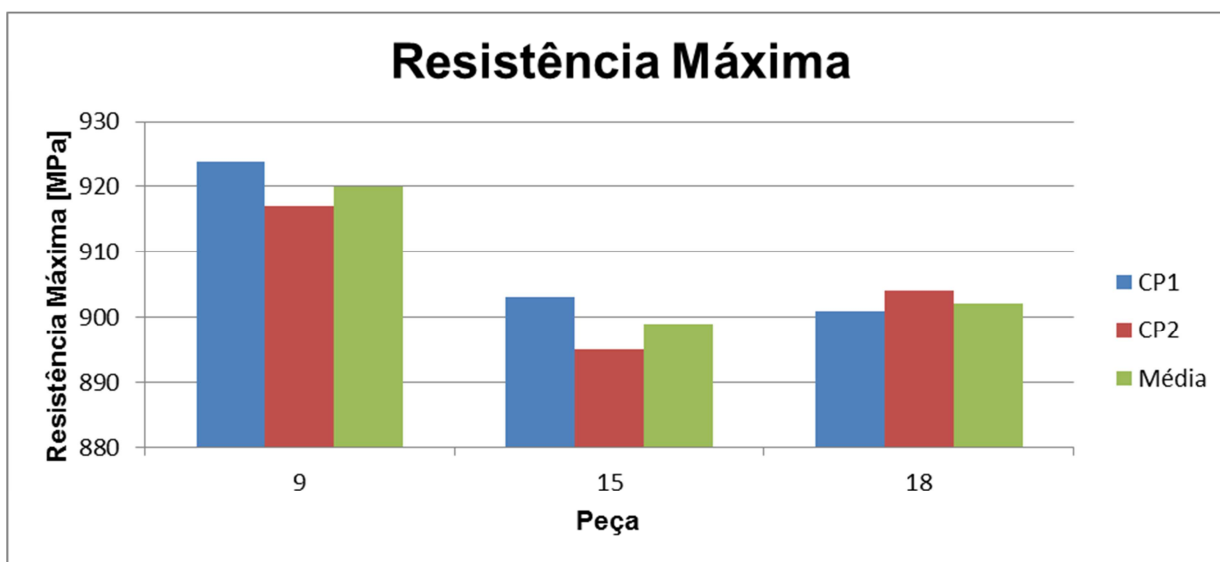


Figura 27. Gráficos com resultados dos ensaios de tração. Fonte: autor.

Rodrigues (2000) fala que com a diminuição da taxa de resfriamento durante a formação da perlita, a difusão atômica ocorre de forma acelerada durante um período de tempo maior, produzindo lamelas de perlita mais grosseiras e mais espaçadas, logo, a fração de ferrita será maior, diminuindo a resistência do aço. Sendo assim, os valores encontrados na Tabela 9 são coerentes com o que se espera ao comparar taxas de resfriamentos. É possível notar que há uma perda da resistência máxima e tensão de escoamento com uma diminuição da taxa de resfriamento. As peças 15 e 18 apresentaram valores semelhantes em todas as propriedades do ensaio de tração.

Na **Figura 27** é possível notar que os valores de tensão de escoamento e tensão máxima são compatíveis com os ensaios de dureza, visto que a peça com a maior dureza de núcleo foi justamente a peça com a maior resistência mecânica encontrada, 9, enquanto que as peças 15 e 18 ficaram com valores semelhantes em todos os ensaios.

6 CONCLUSÕES

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

- A máxima taxa de resfriamento que deve ser utilizada para o aço estudado é $0,39^{\circ}\text{C/s}$, visto que em taxas maiores a dureza encontrada no núcleo da peça se encontrava fora do especificado pelo cliente de máximo 270 HB;
- O valor de dureza medido na superfície das peças decresce juntamente com a taxa de resfriamento;
- A amostra 9 apresentou valores de dureza superficial de acordo com o especificado pelo cliente, entretanto os valores de durezas medidos no núcleo se encontravam fora.
- No ensaio de tração, todas as peças se encontram dentro dos valores utilizados como referência. Como esperado, utilizando como base o ensaio de dureza de núcleo, a tensão máxima e de escoamento da amostra 9, foram superiores as demais amostras, porém seu alongamento e, principalmente, sua redução de área tiveram resultados piores as amostras 15 e 18.
- As análises metalográficas mostraram a microestrutura formada por perlita + ferrita em todas as amostras. A taxa de resfriamento e regiões de maiores deformações mecânicas, durante o forjamento, mostraram ter influência no tamanho de grão e fração de cada uma das fases. Para a amostra 9 observa-se que o núcleo possui um tamanho de grão austenítico prévio grosseiro, com uma fração menor de ferrita, como reflexo disso, os valores de dureza encontrados na região foi maior do que o valor encontrado quando medido na superfície da peça. No ensaio de tração as amostras 15 e 18 tiveram resultados melhores para alongamento e redução de área, enquanto que a amostra 9 teve valores maiores na tensão máxima e tensão de escoamento. A maior fração de ferrita presente nas amostras 15 e 18 lhes concedeu maior tenacidade, enquanto que para amostra 9, a maior fração de perlita no núcleo lhe garantiu maior resistência mecânica.

7 SUGESTÃO DE TRABALHO FUTUROS

- Realizar o estudo com um número amostral maior;
- Avaliar o desenvolvimento de uma esteira aquecida para atingir a taxa de resfriamento sugerida por este trabalho;
- Avaliar em MET os precipitados formados para cada condição de resfriamento apresentada neste trabalho.
- Avaliar o impacto na microestrutura ao utilizar diferentes temperaturas de forjamento;
- Avaliar o impacto do percentual de vanádio em uma mesma taxa de resfriamento.

8 REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR NM ISO187. **Papel, cartão e pastas celulósicas – Atmosfera normalizada para condicionamento e ensaio e procedimento de controle da atmosfera e condicionamento das amostras:** 2000.

ALTAN, T.; NGAILE, G.; SHEN, G. **Cold and hot forging.** ASM International, Materials Park, OH, 2005.

ASM INTERNATIONAL. **Forming and Forging, Vol. 4.** ASM International, Materials Park, OH, 1993.

ASM INTERNATIONAL. **Heat Treating, Vol. 4.** ASM International, Materials Park, OH, 1991.

CAPDEVILA, C. et al. **The role of inclusions and austenite grain size on intragranular nucleation of ferrite in medium carbon microalloyed steels.** Materials Transactions, v. 45, n. 8, p. 2678–2685, 2004.

CBCM. **O Tixoforjamento na Produção de Micropeças em Ligas de Alumínio AA 7075.** Disponível em: <<http://www.cbcm-metalforming.com/pesquisa/semisolido/tixo.htm>>; Acessado em 30/04/2021

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** ABM; 7^o ed., SP, 2012.

CIMM. **Trabalho a Quente.** Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6472>. Acessado em: 27/04/2021.

DEARDO, A. J. **Metallurgical basis for thermomechanical processing of microalloyed steels.** Ironmaking and Steelmaking, v. 28, n. 2, p. 138–144, 2001.

DIN (Deutsches Institut für Normung) 50125. **Testing of metallic materials - Tensile teste pieces:** 2009.

DOS SANTOS, Rezende Gomes. **Transformações de fases em materiais metálicos**. Fundação de Desenvolvimento da Unicamp-Funcamp (UNICAMP), 2017.

Estácio. **Aula 5: Ligas Metálicas Ferrosas**. Disponível em: <<http://estacio.webaula.com.br/cursos/go0224/aula5.html>>. Acessado 30/04/2021.

FORGING. **Forgings Where, Why, How?**. Disponível em: <<https://www.forging.org/about/forgings-where-why-how>>. Acessado em: 27/04/2021

GÜNDÜZ, S.; COCHRANE, R. C. **Influence of cooling rate and tempering on precipitation and hardness of vanadium microalloyed steel**. Materials and Design, v. 26, n. 6, p. 486–492, 2005.

KAYNAR, A.; GÜNDÜZ, S.; TÜRKMEN, M. **Investigation on the behaviour of medium carbon and vanadium microalloyed steels by hot forging test**. Materials and Design, v. 51, p. 819–825, 2013.

LAGNEBORG, R. et al. **Role of vanadium in microalloyed steels**. Scandinavian Journal of Metallurgy, v. 28, n. 5, p. 186–241, 1999.

LI, YU MILBOURN, D. **Vanadium Microalloyed Forging Steels**. The Proceedings of the Vanitec Symposium, Beijing, ..., p. 1–15, 2013.

Milwaukee Forge. **Open-Die Forging vs. Closed-Die Forging**. Disponível em: <<https://www.milwaukeeforge.com/difference-between-open-die-and-closed-die-forging/>>. Acessado em 30/04/2021

MITCHELL, B. S. **An Introduction to Materials Engineering and Science**. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2004.

RODRIGUES, P. C. M.; PERELOMA, E. V.; SANTOS, D. B. **Mechanical properties of an HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling**. Materials Science and Engineering A, v. 283, n. 1–2, p. 136–143, 2000.

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.