



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

BIBLIOTECA PROF. "CARLOS ALBERTO DE BUARQUE BORGES"

RODRIGO VELASCO CHRISTOVAM

**ANÁLISE DO PERFIL DE DUREZA E MICROESTRUTURA DE UM AÇO
FORJADO AISI A2 SUBMETIDO A TRATAMENTO TÉRMICO COM
RESFRIAMENTO EM ÁGUA**

GUARATINGUETÁ - SP

2015

RODRIGO VELASCO CHRISTOVAM

**ANÁLISE DO PERFIL DE DUREZA E MICROESTRUTURA DE UM AÇO
FORJADO AISI A2 SUBMETIDO A TRATAMENTO TÉRMICO COM
RESFRIAMENTO EM ÁGUA**

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

Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini

Guaratinguetá – SP

2015

C556a	Christovam, Rodrigo Velasco Análise do perfil de dureza e microestrutura de um aço forjado AISI A2 submetido a tratamento térmico com resfriamento em água / Rodrigo Velasco Christovam – Guaratinguetá, 2015. 54 f. : il. Bibliografia : f. 52-54 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini 1. Forjamento 2. Aço - Tratamento térmico 3. Processo de endurecimento superficial I. Título CDU 621.73
-------	--

RODRIGO VELASCO CHRISTOVAM

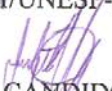
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

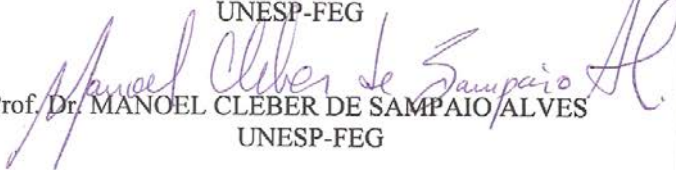
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CÂNDIDO DE SOUZA
UNESP-FEG


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP-FEG

Janeiro de 2016

DADOS CURRICULARES

Rodrigo Velasco Christovam

NASCIMENTO: 01.10.1991 – PRESIDENTE PRUDENTE / SP

FILIAÇÃO: Iris Maria Velasco Fernandes Christovam

Marcos Antônio Severino Christovam

2011/2015 Curso de Graduação

Engenharia Mecânica – UNESP/ Faculdade de Engenharia de
Guaratinguetá.

Dedico este trabalho a minha mãe e meu irmão que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela minha saúde e a de todos os meus familiares, pois sem eles nada disso seria possível.

Agradeço à minha mãe por todo o seu esforço para me proporcionar o melhor durante toda a minha formação.

Agradeço ao meu irmão por me apoiar e motivar em todos os momentos de minha vida.

Agradeço ao meu falecido pai, que deixou de herança a imagem de um homem guerreiro, honesto e amado por todos.

Agradeço a minha namorada Tatiane por toda paciência, compreensão, carinho e amor, e por me ajudar muitas vezes a solucionar meus problemas. Você foi a pessoa que compartilhou comigo os momentos de tristezas e alegrias.

Agradeço aos meus amigos que foram minha família fora do lar, que propiciaram diversos momentos inesquecíveis e que minimizaram os efeitos da distância, em especial aos integrantes da República 333 - Os 1/2 Abestados.

Agradeço ao meu orientador de estágio Rodrigo Yokoyama Xavier por transmitir seus conhecimentos e contribuir para a minha evolução profissional.

Agradeço ao meu Gestor Luís Fernando Marini Pereira pelas oportunidades e confiar a mim tantas responsabilidades.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini pela oportunidade de desenvolver este projeto e que com sabedoria soube dirigir-me os passos e os pensamentos para o alcance de meus objetivos.

Agradeço à toda equipe da FEG, professores e servidores, que possibilitaram meus estudos e desenvolvimento, tanto pessoal quanto profissional.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

CHRISTOVAM, R. V. **Análise do perfil de dureza e microestrutura de um aço forjado AISI-A2 submetido a tratamento térmico com resfriamento em água**, 2015. 51 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Devido à grande utilização do aço em diversos processos no mundo inteiro, tem-se a preocupação de cada vez mais buscar por novos materiais e/ou otimização e melhoria dos processos, visto a necessidade para se ter uma redução de custo e um aumento de produtividade nas indústrias de base, como é o caso das siderúrgicas. A laminação é o processo de transformação mecânica mais utilizado no mundo e com isso exige-se desenvolvimento de novas ferramentas em grandes volumes e com ótimas características para que possa suportar a demanda desse mercado. Cilindros forjados são utilizados na laminação. Estes cilindros passam por processos de tratamentos térmicos que têm como finalidade atingir as propriedades mecânicas adequadas para suportar as tensões e variáveis do processo de laminação. Neste trabalho será realizado um estudo do perfil de dureza e a microestrutura formada em um aço ferramenta da família do AISI A2, conhecido comercialmente como VC9, forjado em matriz aberta e submetido a um tratamento térmico com resfriamento em água. Os resultados encontrados permitiram plotar um perfil de dureza e realizar uma análise de microestrutura, e através desses confirmar que o tratamento térmico não se trata de uma têmpera, e sim de um beneficiamento do material pelo endurecimento de uma camada superficial, pois não há a formação de uma microestrutura martensítica. Portanto, este trabalho deu suporte a futuros estudos sobre a possibilidade de realizar melhorias neste tratamento térmico realizados nos cilindros produzidos na Gerdau de Pindamonhangaba.

Palavras chaves: AISI A2. Forjado. Dureza. Microestrutura. Tratamento térmico. Têmpera.

CHRISTOVAM, R. V. **Analysis of the hardness profile and microstructure of a forged steel AISI A2 subjected to heat treatment with water cooling**, 2015. 51 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

Due to the large use of steel in several processes around the world, there is the increasingly concern to find new materials and/or optimization and improvement of the processes, as the need to reduce the cost and a productivity increase in the primary industry, such as the siderurgy. The rolling is the most used mechanical process in the world and therefore is required the development of new tools in high volume and with optimum characteristics to support the market demand. Forged rolls used are for rolling. These rolls have heat treatment that has the purpose to achieve the appropriated mechanical properties to support the variables of the rolling process. The objective of this work is to analyze the hardness profile and the microstructure a tool steel similar to AISI A2, forged in an opened die process and submitted to heat treatment with water-cooling. The results allowed plotting a hardness profile and performing a microstructure analysis, and whereby to confirm that the heat treatment is not a quenching, but it is a material beneficiation by the hardening of superficial layer, since there is no martensitic microstructure. Therefore, this paper provides the support to future studies about the possibility to perform enhancements in this thermal heat made in the rolls produced at Gerdau Plant in Pindamonhangaba.

Key words: AISI A2. Forged. Hardness. Microstructure. Thermal Treatment Quenching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquemático do processo de Laminação	13
Figura 2. Cilindro de laminação	14
Figura 3. Tipos de cilindros de laminação	14
Figura 4. Planta da Gerdau em Pindamonhangaba	15
Figura 5. Classificação dos aços ferramentas	17
Figura 6. Esquemático de Forjamento	19
Figura 7. Etapas de fabricação de cilindros de laminação na GERDAU	22
Figura 8. Fluxograma de produção na forjaria.....	23
Figura 9. Lingote após tratamento térmico de soaking.....	23
Figura 10. Prensa DEMAG 8000 toneladas forjando LTF	24
Figura 11. Curva TTT para o aço ferramenta AISI A2	27
Figura 12. Blank durante o resfriamento com água	28
Figura 13. Máquina de têmpera pós forjamento.....	29
Figura 14. Blank durante o TPF na vista frontal	29
Figura 15. Método de medição de dureza Vickers	30
Figura 16. Curva de transformação das microestruturas	31
Figura 17. Microestrutura martensítica em ripas.....	32
Figura 18. Microestrutura bainítica.....	33
Figura 19. Microestrutura perlítica.....	34
Figura 20. Esquemático do local de retirada de amostra por usinagem	35
Figura 21. 2º etapa de retirada de amostra.....	36
Figura 22. Amostras cortadas em pedaços menores	36
Figura 23. Comparação entre os ataques	37
Figura 24. Microdurômetro Future Tech.....	38
Figura 25. Microscópio ótico Leica	39

Figura 26. Amostra 1 com ampliação de 16 x	43
Figura 27. Amostra 1 com ampliação de 200 x	44
Figura 28. Amostra 1 com ampliação de 100 x	45
Figura 29. Amostra 1 com ampliação de 200 x	45
Figura 30. Amostra 1 com ampliação de 500 x	46
Figura 31. Amostra 1 com ampliação de 1000 x	46
Figura 32. Amostra 6 com ampliação de 100 x	47
Figura 33. Amostra 6 com ampliação de 200 x	48
Figura 34. Amostra 6 com ampliação de 500 x	48
Figura 35. Amostra 6 com ampliação de 1000 x	49
Figura 36. Microestrutura perlítica em aço VC9 com aplicação de 5000 x.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do AISI A2	18
Tabela 2. Principais carbonetos formados no sistema ternário	18
Tabela 3. Classificação e características do forjamento quanto ao tipo de matriz	20
Tabela 4. Classificação e características do forjamento quanto a temperatura	21

SUMÁRIO

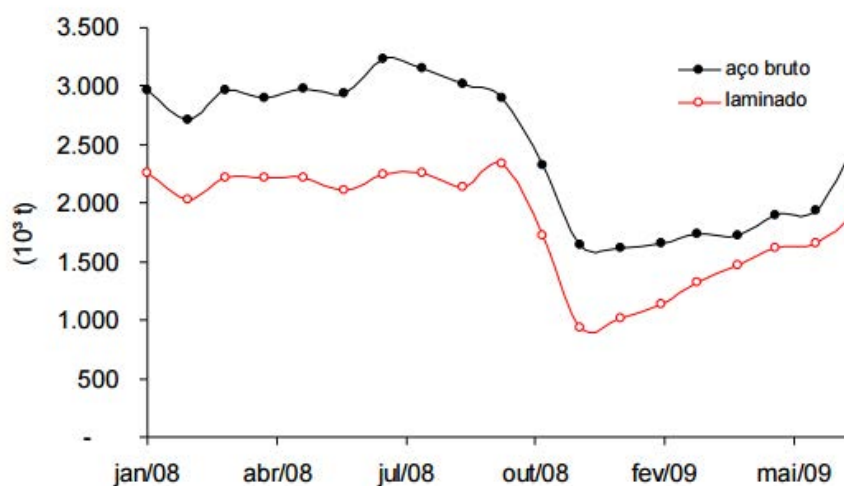
1. INTRODUÇÃO	12
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2. JUSTIFICATIVA	16
1.3. OBJETIVOS	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. AÇO FERRAMENTA AISI A2	17
2.2. FORJAMENTO	19
2.2.1. Processo de forjamento – GERDAU/Pindamonhangaba	22
2.3. TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA	25
2.3.1. Tratamento térmico de têmpera pós forjamento na GERDAU/Pindamonhangaba	28
2.4. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	30
2.4.1. Martensita	32
2.4.2. Bainita	33
2.4.3. Perlita	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS	35
3.2. RETIRADA DAS AMOSTRAS	35
3.3. PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA	37
3.4. CARACTERIZAÇÃO	38
3.4.1. CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE DUREZA	38
3.4.2. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1. ANÁLISE DO PERFIL DE DUREZA	40
4.2. ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	43
5. CONCLUSÕES	51
REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O processo de conformação mecânica dos metais mais utilizado no mundo é a laminação. Segundo o Instituto Aço Brasil, em 2008, 73% do aço bruto produzido no Brasil foi conformado por laminação.

Gráfico 1 - Produção de Aço Laminado

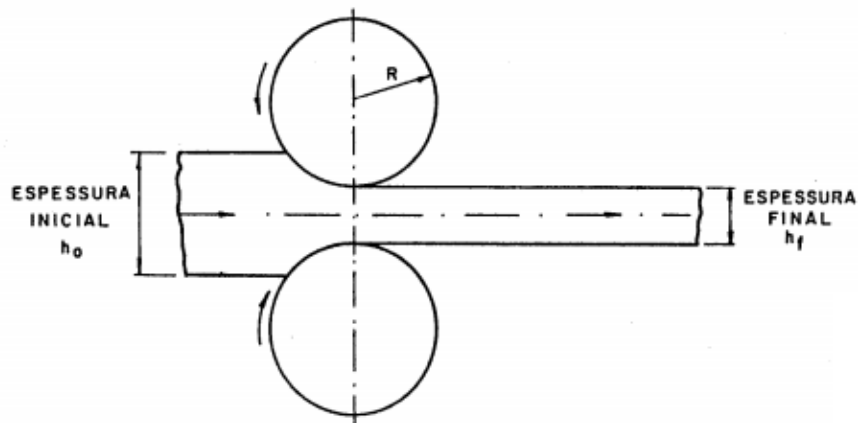


Fonte: (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2008)

Os principais tipos de produtos laminados são: chapas planas ou bobinadas, folhas, barras e discos. Esses produtos semimanufaturados são destinados a outros processos que visam atender mercados como o de transportes, construção civil, embalagens e bens de consumo, onde surgem os produtos vistos no cotidiano, como telhas, calhas, latas, painéis, rodas, elementos estruturais, etc. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2008)

O processo de conformação mecânica por laminação consiste essencialmente na passagem de um corpo sólido entre dois cilindros que giram em sentidos opostos, com determinada velocidade e certo espaçamento entre eles, conforme mostra a Figura 1. Dessa forma, tendo o corpo da peça inicial uma dimensão maior do que a distância entre os dois cilindros, durante o processo de laminação promove-se uma deformação plástica que resulta na redução de sua secção transversal e no aumento do seu comprimento e largura. O processo pode ser repetido várias vezes para se obter a dimensão desejada final.

Figura 1 – Esquemático do processo de Laminação



Fonte: (CONFORMAÇÃO PLÁSTICAS DOS METAIS, 2011)

Dependendo das dimensões finais da peça, estrutura do material, qualidade superficial e outras características necessárias para o produto final, o processo de laminação pode ser conduzido a quente ou a frio.

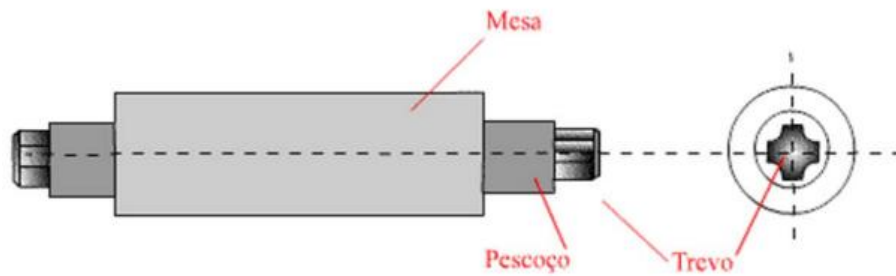
- **Laminação a quente** – Este processo é comumente aplicado em operações iniciais de laminação, onde se tem por objetivo grandes reduções de secção transversal.
- **Laminação a frio** - Este processo é aplicado em operações finais da laminação, com baixas porcentagens de deformação, boa precisão e responsável pelo acabamento final do produto.

O maquinário de um laminador consiste basicamente de cilindros, mancais, uma estrutura para fixar estas partes e um motor para fornecer potência aos cilindros e controlar a velocidade de rotação.

Os cilindros de laminação são os principais dispositivos do laminador, pois são eles que promovem o processo de conformação nas peças, atuando como as ferramentas de fabricação. (CONFORMAÇÃO PLÁSTICAS DOS METAIS, 2011)

As principais características físicas de um cilindro de laminação podem ser definidas em 3 partes básicas:

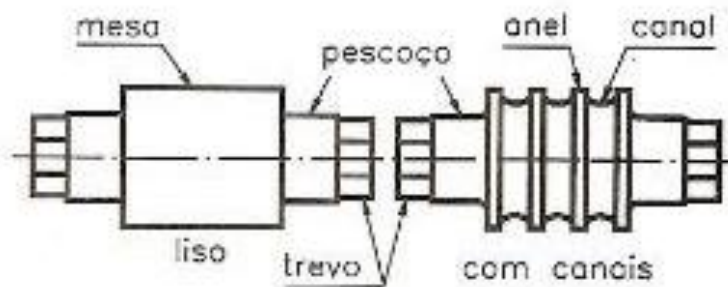
- **Corpo ou Mesa** - onde ocorre o processo de laminação da peça;
- **Pescoço** - onde o peso do cilindro e a carga de laminação devem ser suportados;
- **Trevo** - onde ocorre o acoplamento com o eixo motor;

Figura 2 - Cilindro de Laminação – Vista lateral

Fonte: (AUTOR DESCONHECIDO)

Em um laminador, os cilindros de laminação podem ser utilizados como cilindros de trabalho ou cilindros de encosto. Os cilindros de trabalho são aqueles que entram em contato direto com o material laminado, sofrendo as maiores solicitações de temperatura e desgaste. Já os cilindros de encosto são aqueles que estão em contato com o cilindro de trabalho, com a finalidade de impedir a sua flexão, sendo assim de maior porte.

Os cilindros de laminação podem ser fabricados com superfícies cilíndricas lisas, utilizados para a laminação de placas e chapas ou cilindros com ranhuras, destinados para a laminação de perfis e barras.

Figura 3 - Tipos de cilindros de laminação

Fonte: (AUTOR DESCONHECIDO)

As principais propriedades requisitadas para um cilindro para a laminação de são: resistência mecânica, resistência ao desgaste, resistência à fadiga térmica e oxidação. A fabricação de cilindros de laminação pode ocorrer através de dois processos:

- **Forjamento:** A mais antiga forma de conformação dos metais, o forjamento é um processo de transformação através da deformação plástica realizada por prensagem ou martelagem.
- **Fundição:** Este processo de fabricação acontece através do vazamento de metal líquido em moldes geralmente de areia com formatos e medidas das peças que se

deseja fabricar. Trata-se de um processo muito versátil devido a possibilidade de se trabalhar com diversos tamanhos e formatos. (YANG, 1993)

Um dos pontos importantes no processo de fabricação dos cilindros de laminação são os tratamentos térmicos a que estas peças são submetidas. O tratamento térmico é uma série de operações de aquecimento e resfriamento realizados sob o controle da temperatura, tempo, atmosfera de forno e velocidade de resfriamento.

O objetivo de se realizar um tratamento térmico é alterar as propriedades ou conferir características ao material tratado. O resultado final de um tratamento térmico depende diretamente da sua microestrutura. (VILLARES, 2003)

No Brasil, um dos principais fabricantes de cilindros de laminação é o Grupo Gerdau, o qual é 14º maior produtor de aço do mundo e líder no segmento de aços longos nas Américas. As plantas situadas nas cidades de Pindamonhangaba/SP e Charqueadas/RS possuem áreas específicas para a fabricação de cilindros de laminação forjados e fundidos.

Figura 4 – Planta da GERDAU em Pindamonhangaba



Fonte: (SISTEMA INTERNO GERDAU, S.D.)

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo analisar o perfil de dureza e qual a microestrutura encontrada ao longo da seção do pescoço de um cilindro de laminação forjado de aço ferramenta AISI A2, após ser submetido a um tratamento térmico com resfriamento em água.

1.3. JUSTIFICATIVAS

Para manter a competitividade de uma empresa sempre em alta são necessários produtos com a qualidade cada vez maior e com o menor custo de produção possível. Dado este contexto, procura-se cada vez mais mapear os processos em busca melhoria contínua.

O foco deste trabalho é mapear o resultado do tratamento térmico com resfriamento em água em cilindros de laminação de tiras a frio para conhecimento do processo e estudo de possíveis melhorias visando o aumento da eficiente no processo de fabricação.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 AÇO FERRAMENTA AISI A2

A designação de um aço é a identificação específica que o caracteriza em uma classe, através de um número, letra, símbolo ou nome. A composição química é, de longe, a base mais largamente utilizada para a classificação de aços e as principais normas que especificam materiais metálicos são a *Society of Automotive Engineers* (SAE) e a *American Iron and Steel Institute* (AISI). (HANDBOOK, 2005)

Para os aços ferramenta sua classificação está geralmente relacionada com as suas aplicações de trabalho e a capacidade de endurecimento. Na Figura 5 os principais grupos de aço ferramenta. (TOOL STEELS, 1980)

Figura 5 - Classificação dos aços ferramentas

→ Decrescem: Resistência ao Choque e Usinabilidade Crescem: Profundidade de Tempera, Resistência ao Amolecimento pelo Calor				
Cresce a Resistência à Abrasão. Decresce a Resistência ao Choque	Propriedades	Trabalho a Frio (Deformação TT é fator secundário)	Trabalho a Frio (Deformação TT é fator importante)	Trabalho a Quente (baixa deformação – resistência ao calor é o principal fator)
	Máxima Resistência à Abrasão	P2 W1 W2	D2 D3 D6	M2 M3 T5 T8
	Resistência à Abrasão Média (ferramentas de corte, em geral)	W1 W2	A2 O7	M1 M2 T1
	Baixa Resistência à Abrasão (matrizes em geral)	W1 W2	O1 O2 L6	E2365 H21 H12 H13
	Ferramentas Resistentes ao Choque	S1 E2342 E2550	S5 E2342	H11 H12 H13 E2714

Fonte: (TOOL STEELS, 1980)

O AISI A2 é um aço ferramenta para trabalho a frio com alto carbono e alto cromo (Fe- C – Cr). As principais características mecânicas deste tipo de aço é a alta resistência, alta tenacidade, alta temperabilidade, alta resistência mecânica e alta resistência ao desgaste.

Em função da composição química, este aço apresenta um ótimo balanceamento entre a resistência ao desgaste e a tenacidade.

A dureza superficial, na condição temperada, pode alcançar 65,0 HRC e tem sido amplamente utilizado em aplicações que exigem boa resistência à abrasão e precisão, pois no estado revenido o aço apresenta facilidade de usinagem e distorção mínima (HANDBOOK, 2005).

Tabela 1 – Composição química AISI A2

AISI	C	Si	Mn	Cr	V	Mo	W	Grain size
A2	1.00	0.60	0.70	5.00	0.30	1.10	-	143

Fonte: (DYNAMIC RECRYSTALLIZATION OF A2 AND M2 TOOL STEELS, 2000)

Com a listagem acima dos principais elementos químicos formadores do aço ferramenta AISI A2, é possível ter conhecimento da importância de cada um nas propriedades finais da liga metálica. Sendo os principais:

- Carbono (C): responsável pela formação do eutético na solidificação, pelo endurecimento da martensita na têmpera e pela precipitação de carbonetos no endurecimento secundário durante o revenimento.
- Cromo (Cr): responsável pela formação do eutético na solidificação, pela temperabilidade e pela precipitação de carbonetos no endurecimento secundário durante o revenimento.
- Molibdênio (Mo) e Vanádio (V): responsáveis pela precipitação de carbonetos no endurecimento secundário durante o revenimento. (NORMA MERCOSUL, 1997)

Tabela 2 – Principais carbonetos formados no sistema ternário (Fe-C-Cr)

Carboneto	Estrutura Cristalina	Símbolo	Observações
M_3C	Ortorrômbica	K_c	Dissolve até 18% de cromo
$M_{23}C_6$	Cúbica	K_1	Dissolve até 35% de ferro
M_7C_3	Hexagonal	K_2	Dissolve entre 30% a 50% de ferro

Fonte: (APAZA, 2011)

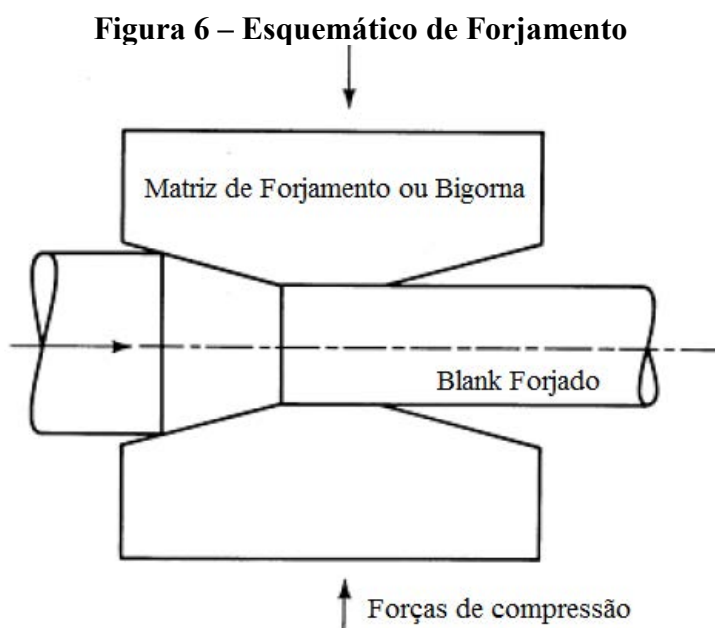
Este aço é comumente utilizado para a fabricação de ferramentas de corte, punções e matrizes para corte, matrizes para abrir roscas, ferramentas para conformação, laminas circulares de cisalhamento, mandris para tubos sem costura, ferramentas para trabalho em

madeira, cilindros laminadores, rolos retificadores e também para matrizes injetoras de plásticos. O principal processo de fabricação aplicado ao aço ferramenta AISI A2 é o forjamento. (VILLARES, 2003)

2.2 FORJAMENTO

O processo de forjamento é o mais antigo dos métodos de conformação mecânica, onde por meio desta técnica dava-se forma ao ouro através de martelamento, em meados de 8000aC. Foi no final do século 18, durante a revolução industrial que o processo de forjamento teve uma grande evolução, pois devido à alta demanda de produtos metálicos, teve-se o incentivo para o desenvolvimento de equipamentos como martelos a vapor de alta velocidade e posteriormente as prensas hidráulicas.

O Forjamento pode ser resumido ao um processo de conformação mecânica que altera a forma dos materiais devido a um conjunto de operações de forças externas de compressão, sem que ocorra retirada de material. (HANDBOOK, 1993)



Fonte: (HANDBOOK, 1993)

Este processo é muito utilizado para transformar matéria prima em produto semi-acabado, sem grandes perdas de material, com bom acabamento superficial e boas propriedades mecânicas. As principais características esperadas de um produto forjado são:

- Graus de deformação consideráveis;
- Alta tenacidade, alta ductilidade, resistência ao impacto a fadiga;
- Microestrutura homogênea e livre de porosidades;
- Dimensional uniforme. (SCHAEFFER, 2006).

O ferramental que entra em contato com o material deformado é conhecido como matriz de forjamento ou bigorna, as quais através de altas forças e energia dão ao material a forma desejada. Durante o forjamento as forças compressivas de impacto nas matrizes podem chegar a valores de 1000 MPa a 2000 MPa, por consequência de tais solicitações são necessários cuidados durante a fabricação de matrizes e o que justifica seu alto custo. O forjamento pode ser classificado de acordo com o tipo de matriz utilizada, podendo ser em matriz aberta ou fechada. (YANG, 1993)

Tabela 3 – Classificação e características do forjamento quanto ao tipo de matriz

Classificação quanto ao tipo de matriz	Pontos Positivos	Pontos Negativos
Aberta	- Peças de maiores dimensões -Menor custo -Grande faixa de tamanho	-Baixa produtividade -Menor precisão dimensional
Fechada	-Maior produtividade -Melhor homogeneidade -Peças com dimensões complexo -Reprodutividade das dimensões	-Elevado custo -Necessidade frequente de usinagem

Fonte: (METALS HANDBOOK, 1993, adaptado)

O Forjamento pode ainda ser classificado de acordo com a sua temperatura de conformação, sendo:

- Forjamento a quente: o processo ocorre a uma temperatura acima da temperatura de recristalização do material e geralmente aplica-se as peças de maior porte.

- Forjamento a frio: o material é conformado em temperaturas abaixo do ponto de cristalização, o que não provoca seu recozimento, apresentando-se no estado de encruamento.

Tabela 4 – Classificação e características do forjamento quanto a temperatura

Classificação do Forjamento	Pontos Positivos	Pontos Negativos
A Quente	-Menores forças de Forjamento -Maiores Deformações -Peças grandes -Formas complexas	-Menor precisão dimensional -Pior acabamento superficial -Menores propriedades mecânicas
A Frio	-Maior precisão dimensional -Melhor acabamento superficial -Peças com maiores propriedades mecânicas	-Maiores forças no forjamento -Menores deformações -Peças pequenas -Maior número de trincas

Fonte: (METALS HANDBOOK, 1993, adaptado)

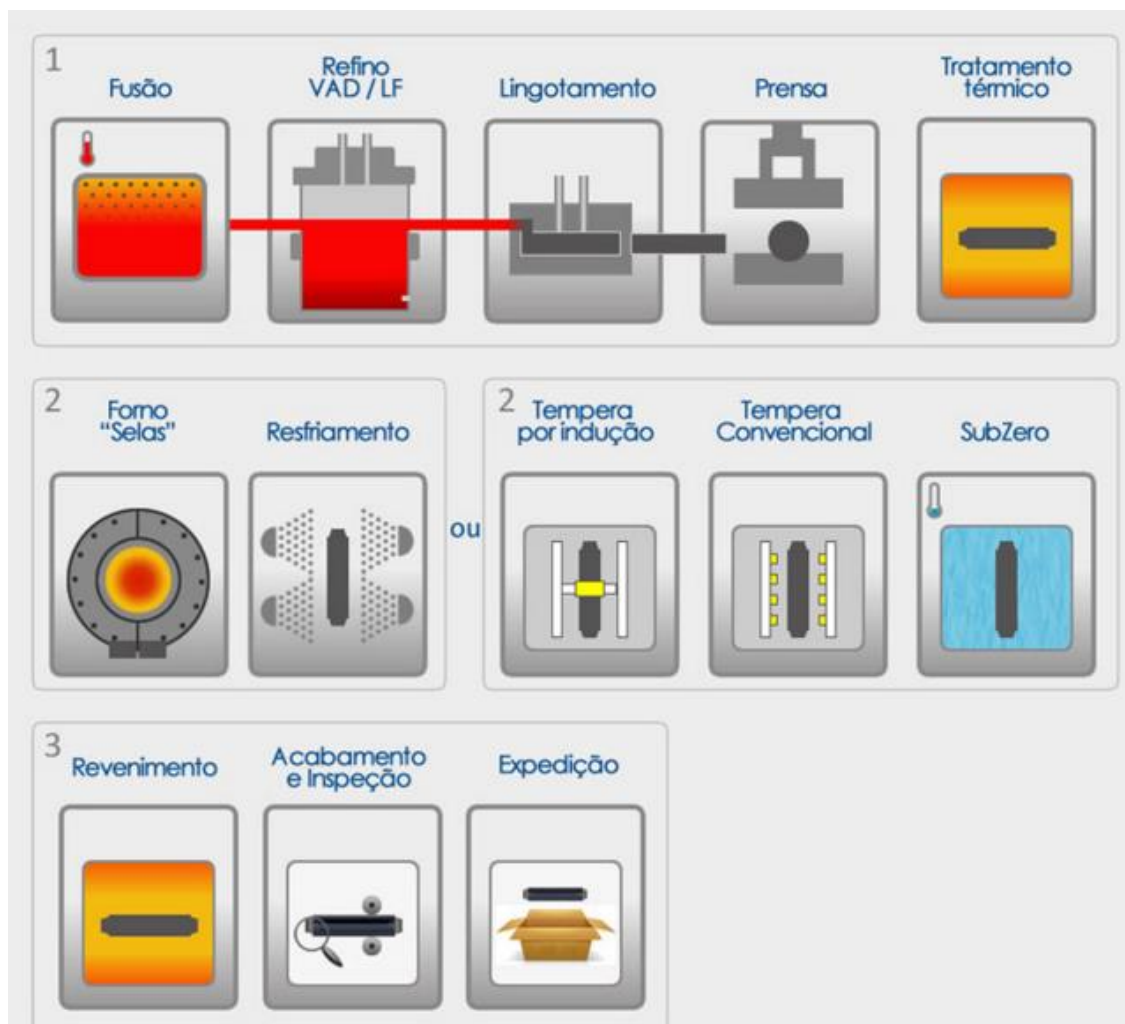
Os produtos forjados também apresentam defeitos típicos do processo. São os principais:

- Trincas superficiais: causadas por trabalho excessivo em temperatura baixa ou por alguma fragilidade a quente;
- Trincas internas: originam-se no interior da peça em consequência de tensões originadas por grandes deformações ou defeitos do lingote;
- Dobras: originam-se do forjamento sobre superfície irregular;
- Falta de redução: caracteriza pela penetração incompleta do metal na cavidade da ferramenta;
- Incrustação de óxidos: causadas pela camada de óxidos que se forma durante o aquecimento;
- Amassamento: deformação além do dimensional especificado;
- Descarbonetação: caracteriza-se pela perda de carbono na superfície do aço, causada pelo aquecimento do metal. (FARIA; CARBONE; PIVETTA, 2013)

2.2.1- Forjamento na GERDAU- Pindamonhangaba

Na usina da GERDAU em Pindamonhangaba, o processo de fabricação de cilindros de laminação forjado é realizado em diversas etapas e pode ser explicado através da imagem abaixo, desde a fusão do aço na aciaria até a embalagem dos cilindros para expedição.

Figura 7 – Etapas de fabricação de cilindros de laminação GERDAU



Fonte: (VILLARES, 2003)

Para cada etapa demonstrada no fluxograma acima, existe uma área e equipe responsável pela a operação, podendo ser citadas:

- Etapa 1: Aciaria, lingotamento e forjaria;
- Etapa 2: Tratamentos térmicos;
- Etapas 3: Usinagem, inspeção e expedição.

As etapas do processo fabricação que acontecem na forjaria, podem ser resumidos através do fluxograma abaixo:

Figura 8 – Fluxograma de produção da forjaria



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Após o estripamento no Lingotamento, os lingotes são enviados para a forjaria e enforados a altas temperaturas. Uma vez que os lingotes atingem a temperatura de forjamento, dá-se início ao ciclo de tratamento térmico de homogeneização, conhecido como encharcamento (soaking em inglês). Os principais objetivos desta etapa é homogeneizar a temperatura em todo o lingote e melhorar um pouco a homogeneidade da composição química.

Figura 8 – Lingotes após tratamento térmico de soaking



Fonte: (GERDAU, S.D)

O forjamento acontece após a finalização do soaking e é sempre feito em altas temperaturas (forjamento a quente), sendo realizado em uma prensa hidráulica DEMAG de 8000 toneladas e em matriz aberta. Caso ocorra uma perda de temperatura muito grande durante o forjamento, há possibilidades de ocorrer trincamento, por isso sempre que necessário é realizado um reaquecimento. (GERDAU, S. D.)

Figura 9 – Prensa DEMAG 8000 toneladas forjando LTF



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Posteriormente ao forjamento, os blanks são submetidos a tratamentos térmicos dentro da própria forjaria, os quais podem ser:

- Normalização: Consiste em um aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona crítica, seguida de um resfriamento ao ar. Tem o objetivo de reduzir as tensões induzidas no forjamento, melhorar a homogeneidade microestrutural, proporcionar dureza e resistência ao aço. As peças normalizadas, geralmente são acompanhadas posteriormente de um revenimento, para ajudar a reduzir as tensões e um melhor controle das propriedades mecânicas.
- Revenimento: Consiste no aquecimento do aço a uma temperatura abaixo da zona crítica, próximo de 500°C. Este tratamento térmico além de reduzir tensões internas, corrige as excessivas durezas e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque.

- Têmpera: Consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à crítica, linha A1 para os hipereutetóides. Este resfriamento pode ser realizado através de água, óleo, salmoura ou até mesmo o ar e o principal objetivo é a formação de martensita. (CHIAVERINI, 1988). Como o objetivo deste trabalho é estudar o efeito deste tratamento térmico, este está detalhado no item 2.3.

2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS DE TÊMPERA

A grande aplicação do aço em diversos setores da engenharia, deve-se ao fato da possibilidade de variar suas propriedades mecânicas, através de ajustes na microestrutura. Os tratamentos térmicos adequadamente escolhidos são a melhor forma de conseguir as propriedades mecânicas desejadas para a aplicação do produto. O conhecimento dos mecanismos de transformação de fase, bem como das variações microestruturais resultantes dos tratamentos térmicos é fundamental para produção e utilização de ligas de aço. (CALLISTER, 2008)

O endurecimento superficial dos aços é uma propriedade buscada em diversas aplicações mecânicas, pois através deste efeito é possível ter uma superfície dura e de grande resistência ao desgaste e à abrasão, enquanto o núcleo apresenta valores consideráveis de tenacidade. O método mais utilizado para impor tais propriedades mecânicas no aço, é o tratamento térmico de têmpera superficial.

O tratamento térmico de têmpera visa a formação de uma estrutura martensítica, entretanto na têmpera superficial, o resfriamento é localizado e a formação de martensita é somente em uma camada da superfície. Um dos motivos pela preferência do endurecimento superficial em relação a um endurecimento total, é a possibilidade de controlar a variação de dureza ao longo da secção.

As propriedades resultantes de uma têmpera superficial são:

- Superfície com alta dureza e resistência ao desgaste;
- Boa resistência a fadiga;
- Boa capacidade para resistir a cargas de contato;
- Resistência satisfatória ao empenamento. (CHIAVERINI, 1988)

Para se obter sucesso em uma têmpera superficial é necessário impor uma taxa de resfriamento severa, de tal forma que durante a transformação de fase na superfície não ocorra a formação de perlita fina. A capacidade do aço de endurecer, depende diretamente da sua composição química, e é chamada de temperabilidade.

A temperabilidade de um aço não pode ser relacionada com a sua máxima dureza obtida, pois está é basicamente em função do teor de carbono e sim relacionada com máxima tenacidade obtida com a microestrutura formada durante o resfriamento. Alguns fatores podem influenciar na temperabilidade do aço tanto para mais como para menos, são eles:

Fatores que diminuem a temperabilidade:

- Granulação fina da austenita;
- Inclusões não dissolvidas.

Fatores que aumentam a temperabilidade:

- Elementos dissolvidos na austenita;
- Granulação grosseira da austenita;
- Homogeneidade da austenita. (CHIAVERINI, 1988)

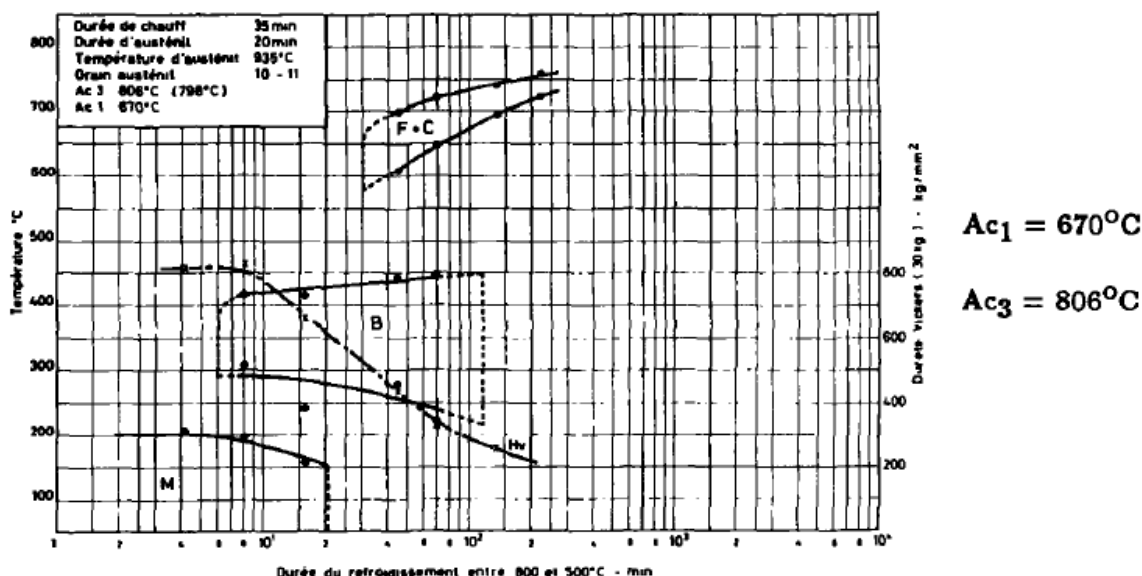
Os fenômenos que ocorrem no aço quando esfriado a diferentes velocidades são analisados através das curvas de transformação isotérmicas TTT. Neste tipo de diagrama o tempo é levado em escala logarítmica e marca-se para cada temperatura os pontos iniciais das transformações de fase, com isso tem-se uma série de pontos de início e fim de transformação, originando as chamadas curvas em “C” ou TTT (tempo – temperatura – transformação).

É importante ressaltar que para cada tipo de liga de aço tem-se uma curva TTT característica e alguns fatores têm influência direta na posição das linhas de início e fim de transformação das curvas TTT. O teor de carbono altera consideravelmente a curva, o tamanho dos grãos e a homogeneidade da austenita também podem influenciar no diagrama. Além disso, com o aumento da porcentagem dos elementos de liga, desloca-se as curvas de início e fim da transformação para a direita (com exceção do cobalto), o que significa que o processo será mais demorado. (TOTTEN, 2007)

A consequência mais importante do deslocamento da curva TTT para a direita é o retardamento nas transformações, consiste na maior facilidade de obter a estrutura martensítica. Dependendo dos elementos de liga presentes, pode-se obter quase que somente martensita, mesmo com esfriamento lento. Abaixo a curva TTT para o aço ferramenta AISI A2. (HANDBOOK, 1991)

Figura 10 – Curva TTT para o aço ferramenta AISI A2

290 (AISI A2 Tool Steel)
Composition: 0.95% C - 0.50% Mn - 0.24% Si - 0.011% S -
 0.018% P - 0.26% Ni - 4.90% Cr - 1.03% Mo - 0.22% Cu - 0.02%
 Al Grain size: 10-11 Austenitized at 935°C (1715°F) for 20 min



Fonte: (TOOL STEELS, 1980)

A interpretação das curvas TTT são realizadas através da análise da temperatura em que a peça se encontra e qual a taxa de resfriamento imposto a ela. As siglas F, C, B e M indicam a fase cementita, ferrita, bainita e martensita respectivamente. Além de encontrar qual a microestrutura formada, pode-se relacionar qual a faixa de dureza esperada.

As principais características de cada constituinte indicados na curva TTT acima são:

- Ferrita: Este constituinte está formado por uma solução sólida de inserção de carbono em ferro alfa.
- Cementita: É o constituinte que aparece em fundições de aços. É o carboneto de ferro, de fórmula Fe₃C.
- Perlita: Formada por uma mistura eutetóide de duas fases, ferrita e cementita.
- Bainita: É o constituinte que se obtém na transformação isotérmica da austenita quando a temperatura do banho de resfriamento é de 250 a 500 °C.
- Martensita: É uma solução sólida, intersticial, supersaturada de carbono em ferro alfa. É o constituinte estrutural da têmpera dos aços e sua microestrutura apresenta-se na forma de agulhas cruzadas. (BROOKS, 1966 ; CHIAVERINI, 1986 ; COLPAERT, 1983)

Com o conhecimento do material e tendo em mãos a sua curva TTT, dimensiona-se o processo de aquecimento e resfriamento para se obter a microestrutura e perfil de dureza desejado. Dependendo também da geometria e tamanho da peça tem-se a necessidade de processos mais bem elaborados para atingir o objetivo do tratamento térmico de têmpera.

2.3.1 Tratamento térmico de Têmpera pós Forjamento -GERDAU/Pindamonhangaba

Após o forjamento, os blanks são enviados para a área de tratamento térmico dentro da própria forjaria, onde os mesmos são enfiados em fornos de atmosfera controlada para um aquecimento acima da temperatura de austenitização (temperatura $> 850^{\circ}\text{C}$) por um tempo suficiente para homogeneizar a temperatura por toda peça.

Finalizado o aquecimento, o blank é enviado logo em seguida para uma máquina rotativa de resfriamento com água, equipada com um par de rolos cilíndricos que apoiam e giram o blank durante o resfriamento e duas fileiras de bicos que liberam água a alta pressão. Este processo é conhecido na área produtiva como TPF, sigla para têmpera pós forjamento.

Figura 11 – Blank sendo posicionado na máquina de TPF e durante o resfriamento



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

O resfriamento com água é realizado de forma contínua por toda a superfície e por um curto tempo ($t < 30$ minutos), de forma que o núcleo da peça ainda se encontre em altas temperaturas após o término do jateamento com água. Finalizado o processo de resfriamento, o blank dá início ao tratamento térmico de revenimento, realizado em temperaturas superiores a 450°C por um longo período de tempo ($t > 10$ horas).

Figura 12 – Máquina de têmpera pós forjamento (TPF)



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Figura 13 – Blank durante o TPF na vista frontal



Fonte: (VILLABÓN, 2015)

Os mecanismos de funcionamento da máquina garantem que o resfriamento com água seja realizado de forma homogênea por toda a superfície, sendo possível ainda controlar a região em que se deseja resfriar com água.

2.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

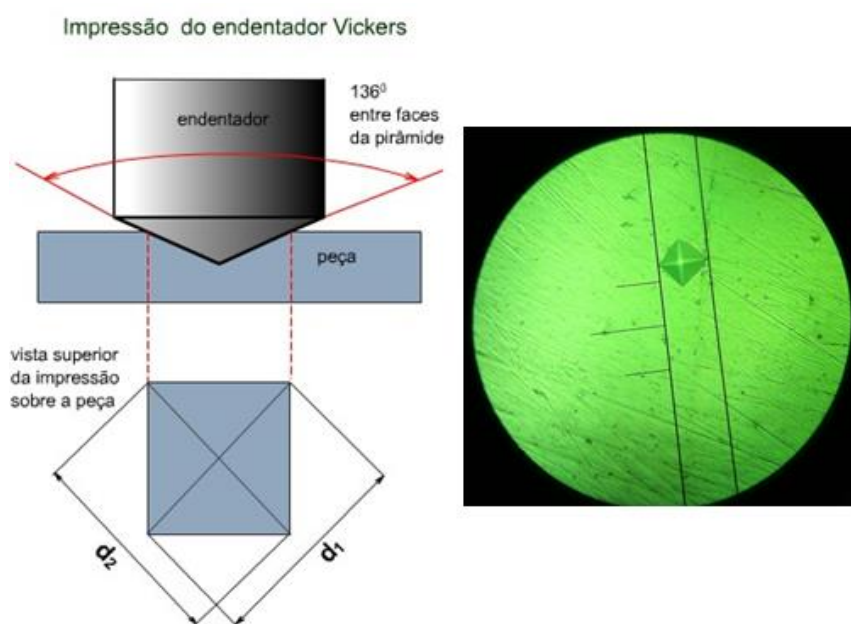
As propriedades físicas são características dos materiais e dependentes de uma série de fatos. Ter conhecimento sobre essas propriedades é de fundamental importância para selecionar, especificar e produzir um determinado material.

Uma propriedade mecânica importante para os aços é a dureza, largamente utilizada na especificação e comparação das diversas ligas metálicas. Para o conceito de dureza são atribuídos diferentes significados, tais como a medida da resistência do material a ações de esforços mecânicos sobre sua superfície, resistência à penetração, à deformação plástica e ao risco.

O método mais comum de obtenção do valor de dureza é medir a endentação, usando-se para tal uma força definida, aplicada durante um tempo específico. É a determinação da dureza por penetração e são diversas as técnicas de medição, sendo a dureza Vickers utilizada neste trabalho.

Quando há necessidade de analisar microestruturas para verificar diferentes fases, faz-se o uso de microdurezas, as quais possuem uma endentação menor e por consequência precisão na escolha do local desejado, entretanto podem apresentar pequenas oscilações de valores entre as medições. (SOUZA, 1974)

Figura 14 – Método de medição de dureza Vickers e endentação amostra 1



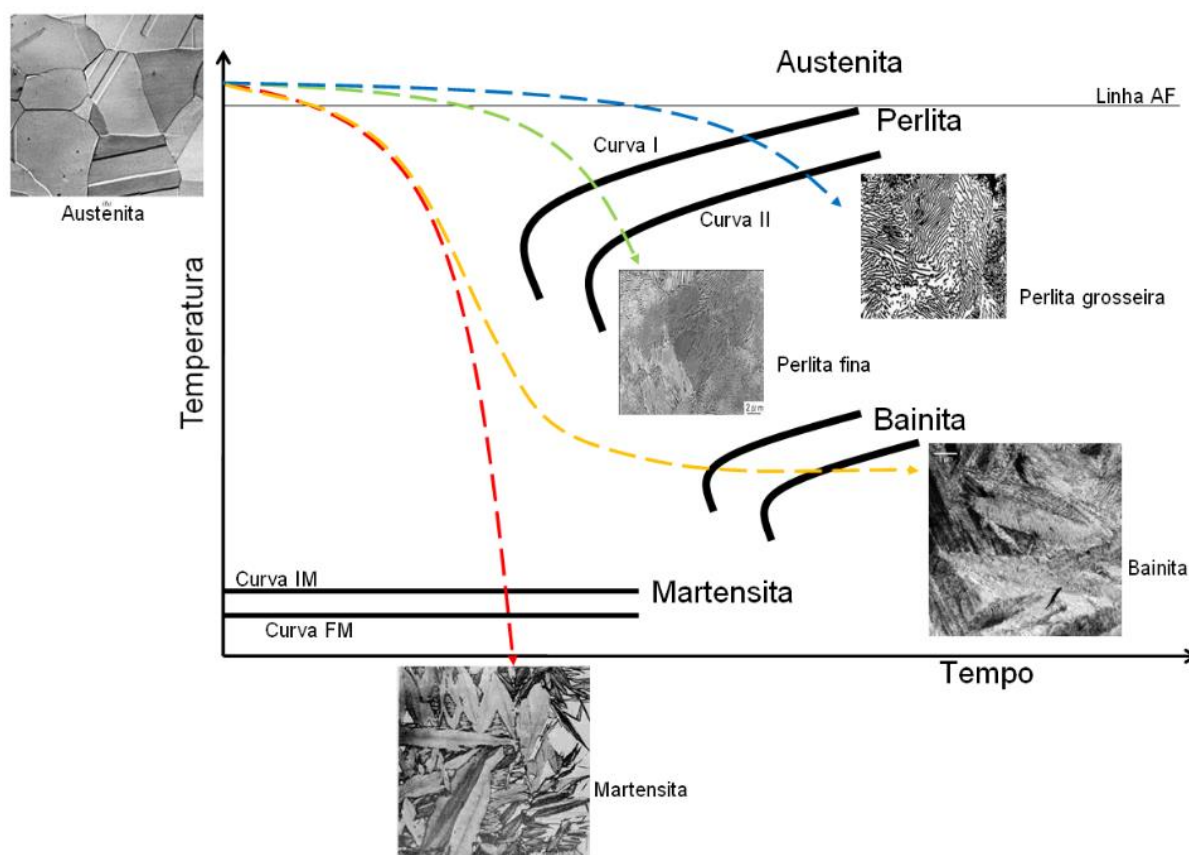
Fonte: (GERDAU, S.D. ; PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Outra característica importante de se ter conhecimento dos materiais é a microestrutura, está tem relação com os valores de dureza coletado e é consequência principalmente do material utilizado e do processo de fabricação.

Essa determinação metalográfica é comumente feita com o auxílio de microscópio em secções do material, polidas e atacadas com reativos adequados. Através deste tipo de análise, verifica-se homogeneidade da peça, certas impurezas, granulação do material e etc. (DIETER, 1981).

As microestrutura e durezas obtidas para cada tipo de resfriamento estão indicadas no gráfico TTT, conforme a figura abaixo:

Figura 15 - Curvas mostrando a formação das microestruturas perlítica, bainítica e martensítica.



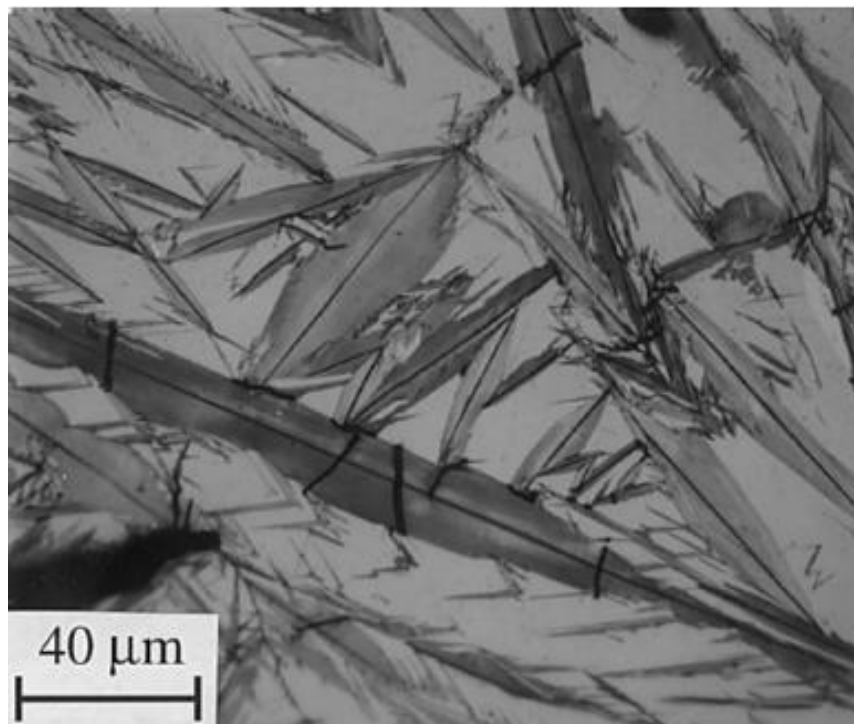
Fonte: (GERDAU, S.D.)

2.4.1 – Martensita

A martensita implica em uma mudança de fase cristalina para outra por mecanismos de cisalhamento. Esta microestrutura é formada quando ligas Fe-C, austenitizadas, são resfriadas rapidamente até uma temperatura relativamente baixa. A transformação martensítica não envolve difusão, de forma que a martensita tem exatamente a mesma composição da fase parente austenita. (KRAUSS, 1999)

A martensítica é a microestrutura presente em componentes que necessitam elevada resistência ao desgaste, esta é obtida através de tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, e comumente encontrada com durezas na faixa de 400 HV até 900 HV, dependendo do teor de carbono. Sua microestrutura é caracterizada pela aparência agulhar. (COLPAERT, 1983)

Figura 16 – Microestrutura de martensita em uma liga com Fe-C 1,86%



Fonte: (KRAUSS, 1999)

2.4.2 – Bainita

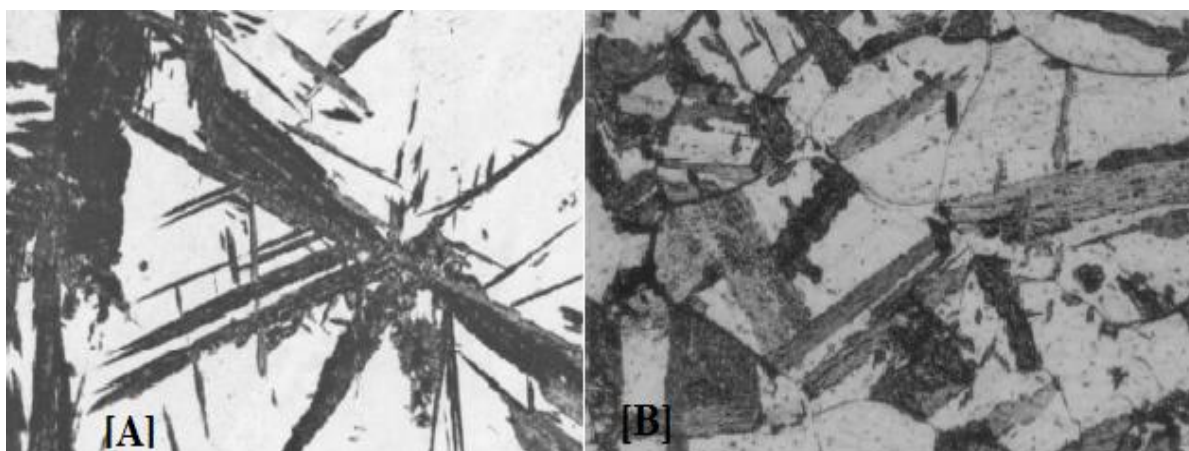
A bainita é uma estrutura acicular que se forma em uma região intermediária entre a perlita e a martensita. Em médio e alto carbono, semelhante a perlita, a bainita é uma mistura de ferrita e cementita, e portanto depende da difusão controlada do carbono, entretanto a mesma não está presente em matrizes lamelares. Semelhante a martensita, a bainita pode apresentar-se na forma de cristais aciculares. (KRAUSS, 1999)

Devido a morfologia acicular da bainita, ela pode ser facilmente confundida com a martensita na observação por microscopia ótica, sendo assim, a melhor maneira de realizar a diferenciação exata da bainita é através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Existe duas morfologias conhecidas para essa microestrutura, isto é, a bainita superior (ripas) que se forma a temperaturas próximas de 540°C e a bainita inferior (placas), que se forma a menores temperaturas 215 °C. Frequentemente, os aços são sujeitos a tratamentos isotérmicos para formar bainita, ao invés de têmpera para produzir martensita. Com isso, reduzem-se as tensões que podem gerar trincas de têmpera.

Essa microestrutura é caracterizada por apresentar valores consideráveis de dureza e conciliado com boa tenacidade, se comparado com a martensita e sendo assim muito desejada em componentes com alta solicitação mecânica e boa resistência ao desgaste. Sua dureza pode variar entre 390 HV até 520 HV. (CHIAVERINI,1986 ; COLPAERT,1983)

Figura 17 – Microestrutura de [A] bainita superior e [B] bainita inferior



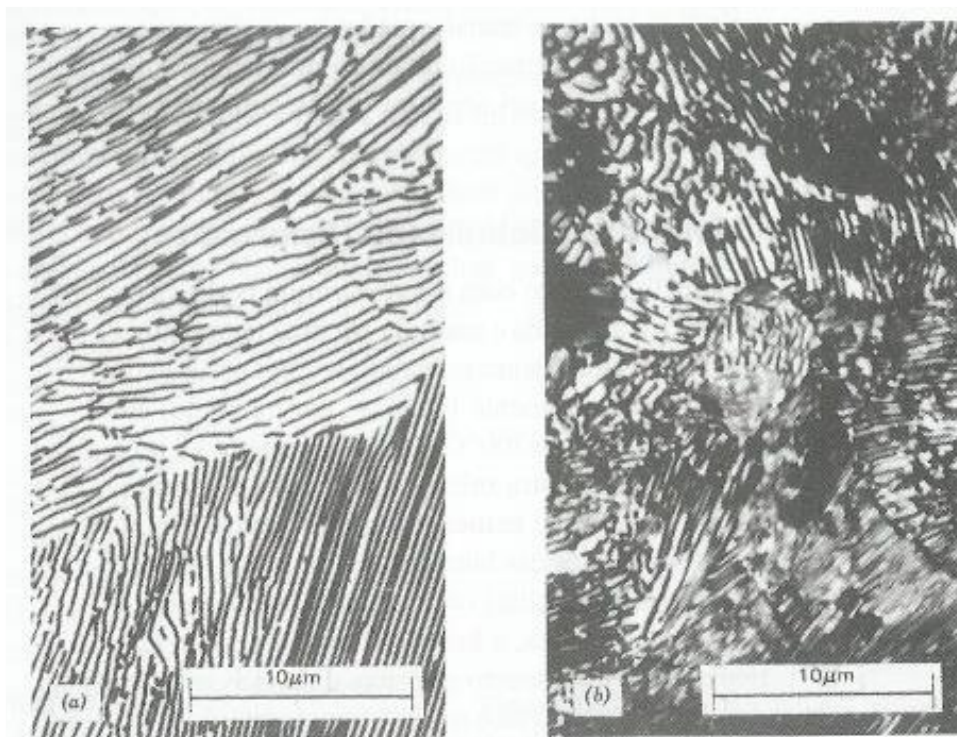
Fonte: (KRAUSS, 1999)

2.4.3 – Perlita

É um constituinte micrográfico formado por finas lamelas justapostas de ferrita e cementita e que ocorre abaixo de 723°C nas ligas de ferro-carbono. As lamelas são próximas de paralelas, podendo ser planas, curvas ou ondeadas e seu afastamento depende principalmente da velocidade do resfriamento. Quando o resfriamento é próximo à temperatura de austenitização, leva-se a formação da perlita grosseira, em contraponto, quando a temperatura de transformação é menor, tem-se a formação de perlita fina.

A dureza esperada para uma microestrutura perlítica está entre 250 e 300 Brinell (HB), o que convertendo para a escala de microdureza Vickers (HV), nos dá um valor de 260 a 315 HV. (CALLISTER,2008 ; DIETER,1981 ; COLPAERT,1983)

Figura 18 - (a) perlita grosseira e (b) perlita fina



Fonte: (CALLISTER, 2008)

3- MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATERIAIS UTILIZADOS

O material utilizado para as análises deste trabalho, foi uma seção do pescoço de um cilindro de laminação de tiras a frio, produzido na forjaria da Gerdau Aços Especiais, unidade de Pindamonhangaba – SP. O aço ferramenta utilizado é conhecido comercialmente como VC9 e com a sua composição química é semelhante ao AISI-A2. Abaixo a tabela da composição química segundo catalogo do fabricante.

Quadro 1 – Composição química comercial do aço ferramenta VC9

Composição Química		C	Si	Mn	Cr	Mo	V
GRUPO 1 (VC9)	Min.	0,75	0,18	0,18	2,2	0,18	0,04
	Máx.	1	0,7	0,7	4,5	0,5	0,4

Fonte: (CATÁLOGO VILLARES, 2003)

3.2 – RETIRADA DAS AMOSTRAS

A primeira etapa do processo de retirada de amostra aconteceu posteriormente aos tratamentos térmicos de TPF (Têmpera pós forjamento) e Revenimento. O corte foi realizado por usinagem e foi mantido a característica na superfície do estado bruto de forjamento. Os cortes realizados estão exemplificados em linhas tracejadas e vermelhas na imagem abaixo:

Figura 19 – Esquemático do local de retirada de amostra por usinagem

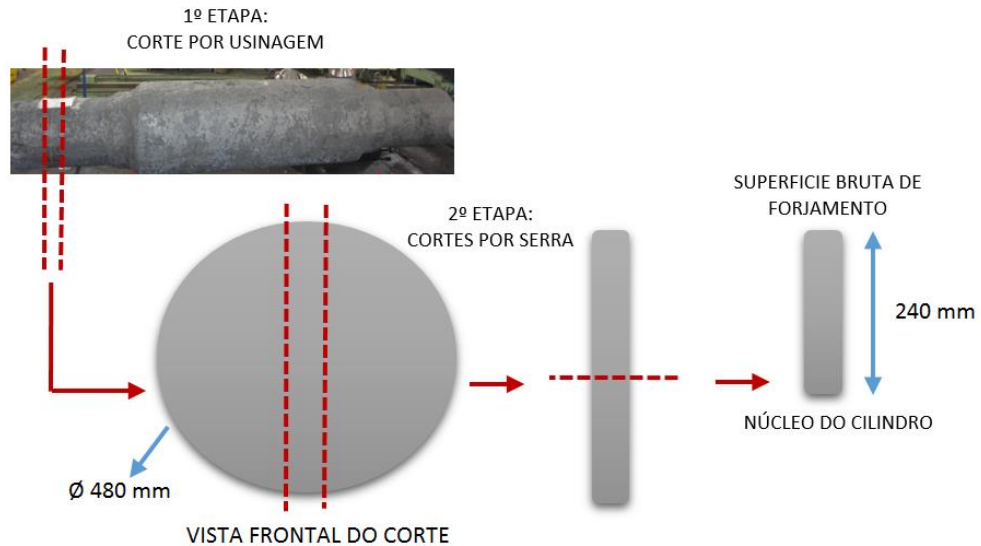


Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

A segunda etapa de retirada das amostras consistiu em cortes realizados em serra com fluido refrigerante. A intenção dos cortes era obter uma amostra em que fosse possível encontrar todas as propriedades do aço, desde a superfície bruta até o núcleo. Para atender a

tais condições, foram realizados 3 cortes em serra, conforme indicados em linhas tracejadas e vermelhas, na figura abaixo:

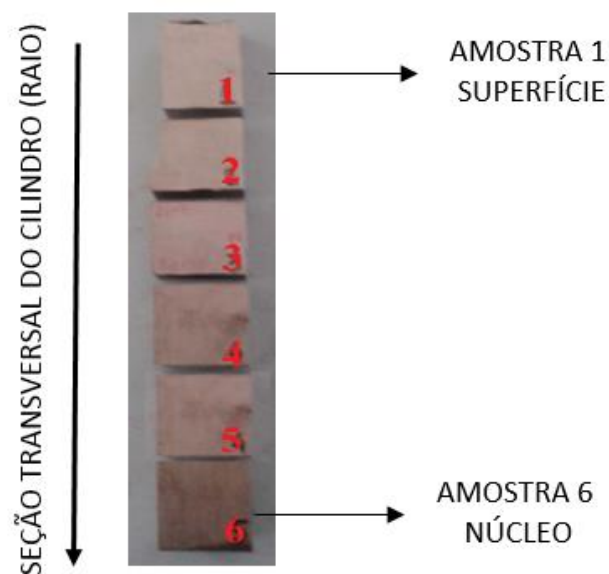
Figura 20 – 2º Etapa de retirada de amostra com cortes em serra



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

A terceira e última etapa do processo de retirada de amostras, foi realizada através de uma máquina conhecida como *cut-off*, onde foi possível dividir a amostra de 240 mm em 6 pedaços menores, a fim de facilitar a preparação e visualização no microscópio ótico.

Figura 21 – Amostras cortadas em pedaços menores por *cut-off*



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Durante todo o processo de retira das amostras, desde o corte por usinagem até a utilização do *cut-off* foram tomados os devidos cuidados para não aquecer excessivamente as amostras e prejudicar as análises, portanto, todos os cortes foram feitos juntamente com fluidos refrigerantes.

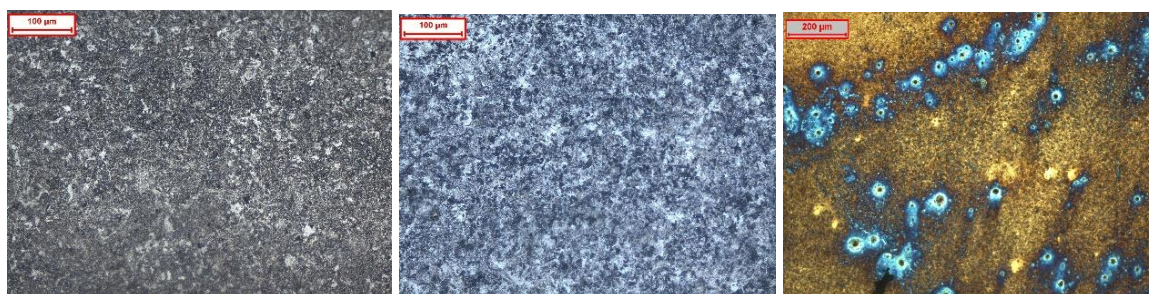
3.3 – PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

Devido ao tamanho das amostras optou-se por não realizar embutimento em resina de cura a frio. As amostras foram preparadas metalograficamente com lixas de granulometria de 120, 220, 320, 400 e 600 mesh, utilizando água como fluido refrigerante. Tomou-se o cuidado de girar a amostra de 90° em cada troca de lixa, até desaparecer os riscos da lixa anterior. O polimento final foi obtido sequencialmente com suspensões abrasivas de diamante de granulometrias médias de 6µm e 1µm.

Em seguida as amostras passaram por ataques metalográficos por imersão em Nital (5%), Vilella e Lepera a fim de investigar o melhor ataque para revelar as diferentes fases. Após a realização dos testes com os diversos ataques, foi verificado que o Nital, tem um maior poder de revelação da microestrutura do aço VC9, sendo testado ainda com imersão em 3 segundos e 5 segundos, sendo o último com maior poder de revelação.

Os equipamentos utilizados para lixamento e polimento foram politrizes PRAZZIS APL-4, instaladas no Laboratório Metalúrgico e Metalográficos da GERDAU em Pindamonhangaba.

Figura 22 – Comparação entre os ataques - Nital, Vilella, Lepera respectivamente



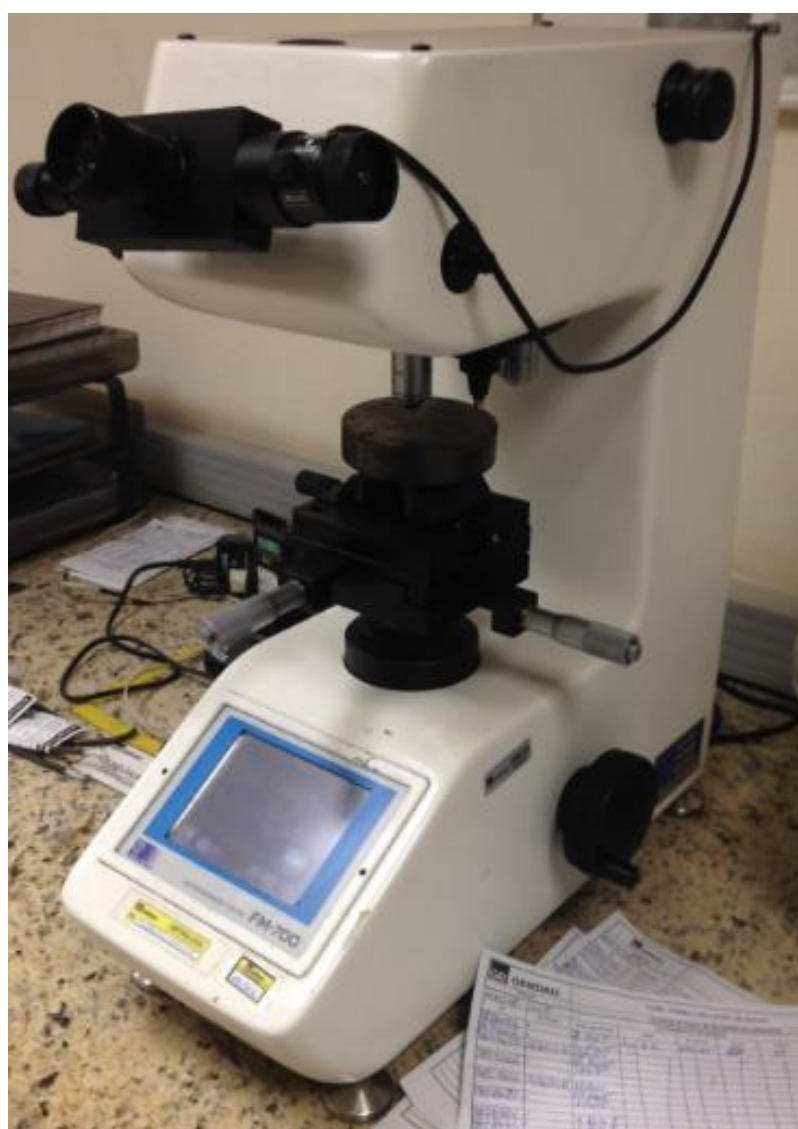
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

3.4 – CARACTERIZAÇÃO

3.4.1 – Caracterização do perfil de dureza

A caracterização do perfil de dureza ao longo da seção transversal do cilindro de laminação de tiras a frio, foi realizado através de microdurezas Vickers com a carga de 500 kgf, durante 15 segundos. Para a realização do ensaio foi utilizado o aparelho de microdureza Future Tech, modelo FM 700, representado na figura abaixo.

Figura 23 - Microdurômetro Future Tech, modelo FM 700



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

3.4.2 – Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural foi feita logo após o ataque com Nital, afim de minimizar os efeitos da oxidação e prejudicar a qualidade das imagens. A ampliação realizada foi de 16, 100, 200, 500 e 1000 vezes, tendo como auxílio um microscópio ótico Leica modelo DMLM com luz polarizada. Para a aquisição das micrografias, foi utilizado um software analisador de imagem acoplado ao próprio microscópio e conectado a um computador.

Figura 24 – Microscópio ótico Leica modelo DMLM



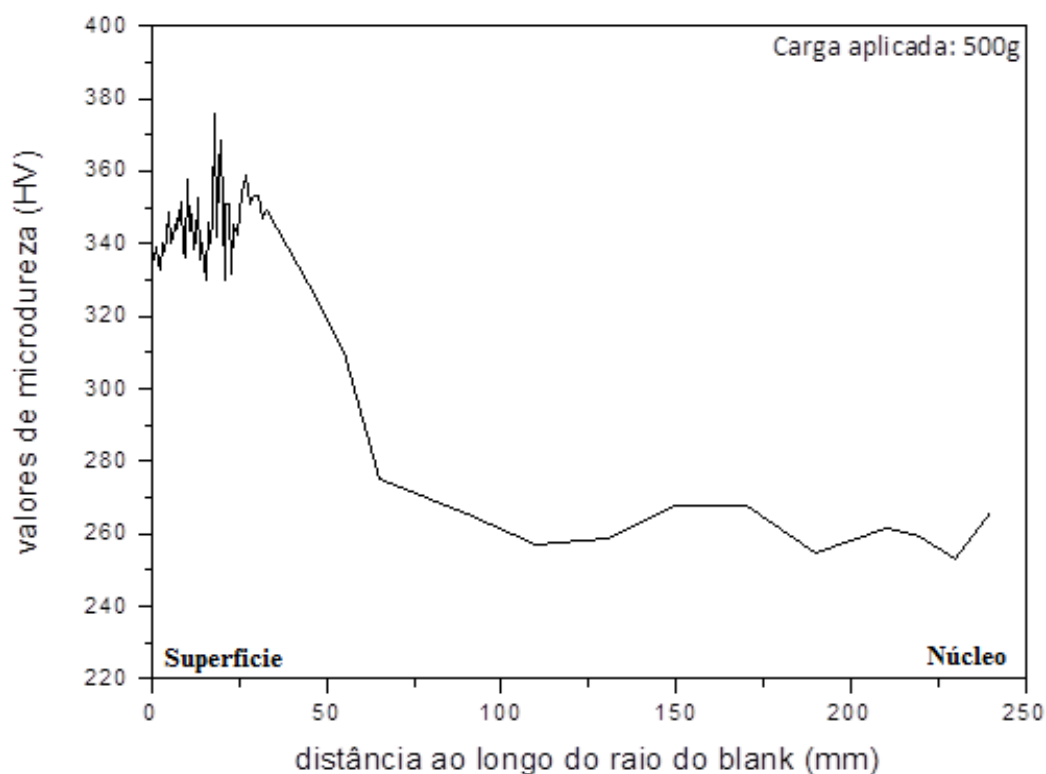
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – ANÁLISE DO PERFIL DE DUREZA

Com a realização de mais de 50 medições de microdureza Vickers, desde a extrema superfície até a região central do núcleo do cilindro, foi possível plotar uma curva do perfil de dureza do pescoço do cilindro de laminação, fazendo o uso do software gráfico ORIGIN8©.

Gráfico 2 – Perfil de dureza do pescoço do cilindro de laminação submetido ao TPF

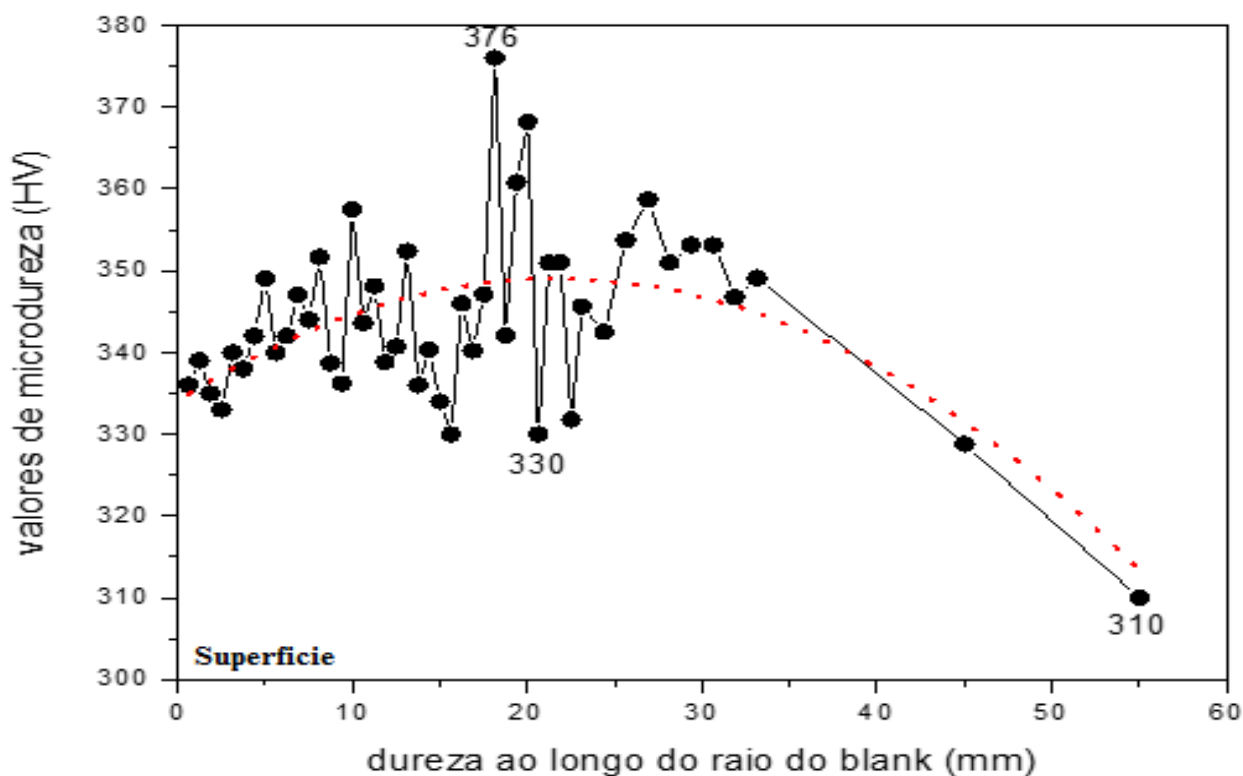


Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

O gráfico acima mostra duas regiões com perfis de dureza diferentes, onde é possível perceber que houve um endurecimento superficial, devido aos efeitos do tratamento térmico com resfriamento em água. Dentre as duas regiões do gráfico, os valores de dureza maiores próximos a superfície ficaram na ordem de 350 HV e conforme se caminha para o centro da peça, os resultados de dureza vão decaindo até se estabilizar com valores próximos de 260 HV.

Como o gráfico anterior indicou que existe uma região superficial endurecida, optou-se por apresentar outro gráfico com os valores de dureza obtidos somente da região superficial.

Gráfico 3 – Perfil de dureza próximo a superfície



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

As análises detalhadas dos valores de dureza superficiais mostram variação que pode ser atribuída tanto ao método de medição (SOUZA,1974), quanto a variações da microestrutura.

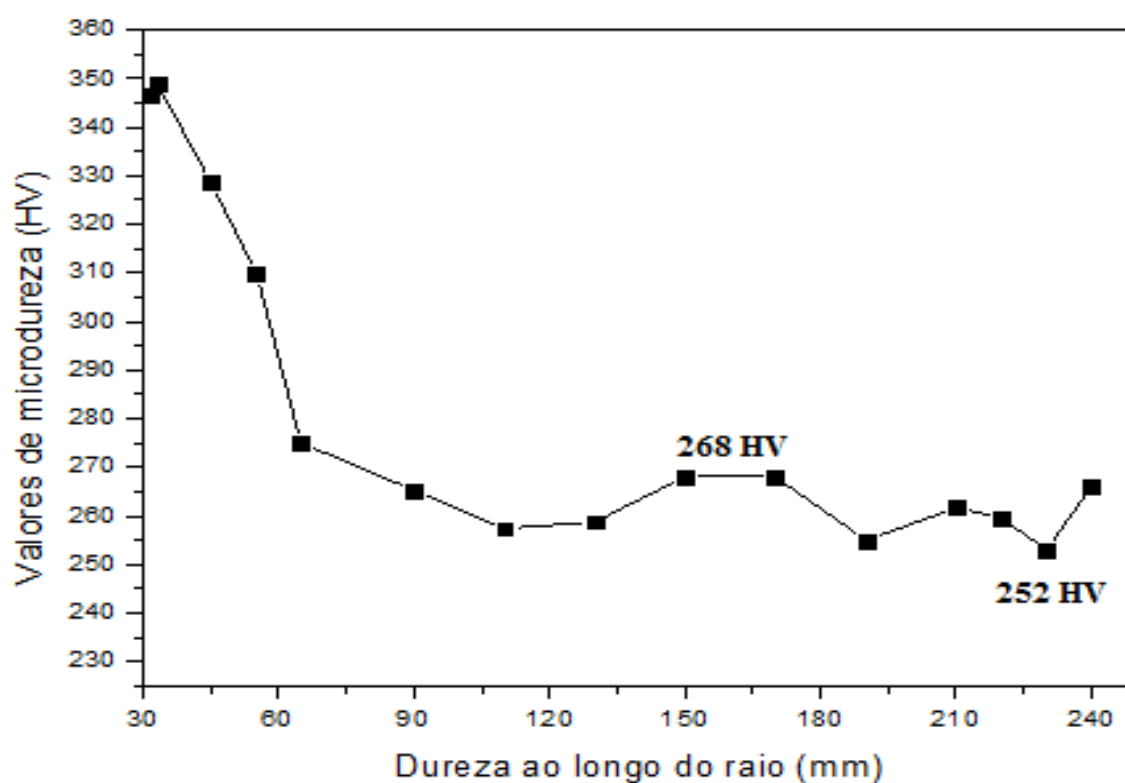
O gráfico 3 mostra que a região que sofreu um endurecimento superficial no pescoço do cilindro tem espessura de aproximadamente 50 mm e sua dureza variou entre 330 HV e 380 HV. Após os 50 mm, nota-se que ocorre uma queda de dureza, mostrando que a partir deste ponto ocorre uma alteração microestrutural.

Outro detalhe observado no gráfico 3, é a presença de uma região descarbonetada na superfície propriamente dita, visto que se esperava os maiores valores de dureza na superfície imediata do cilindro, porém os valores encontrados apresentaram um perfil crescente nos primeiros 10 mm da superfície. A descarbonetação é perda de carbono nas camadas mais periféricas do aço, ela ocorre quando o metal é aquecido em um ambiente

onde o oxigênio está presente, levando ao metal à oxidação e à perda de carbono. Como resultado da descarbonetação, o material apresenta menor resistência mecânica, menor endurecibilidade. (FARIA; CARBONE; PIVETTA, 2013)

Na região estável do gráfico 2, que compreende quase que a totalidade da secção transversal do cilindro, é possível visualizar uma baixa oscilação nos valores de dureza, indicando que esta região apresenta uma única microestrutura, a qual possui baixos valores de dureza, na faixa de 250 HV à 275 HV. O gráfico 4 mostra a região estável de dureza, compreendida desde os 65 mm da superfície até o núcleo.

Gráfico 4 - Variação da dureza nas regiões centrais da seção transversal do blank



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

4.2 – ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Após a seleção do Nital como reagente para revelar a microestrutura, fez-se o estudo metalográfico com ataque de imersão por 3 segundos. Este ataque não possibilitou a revelação completa da microestrutura, porém revelou algumas características interessantes do material, conforme demonstrado nas figuras abaixo.

Figura 25 – Amostra 1_ com ampliação de 16 x

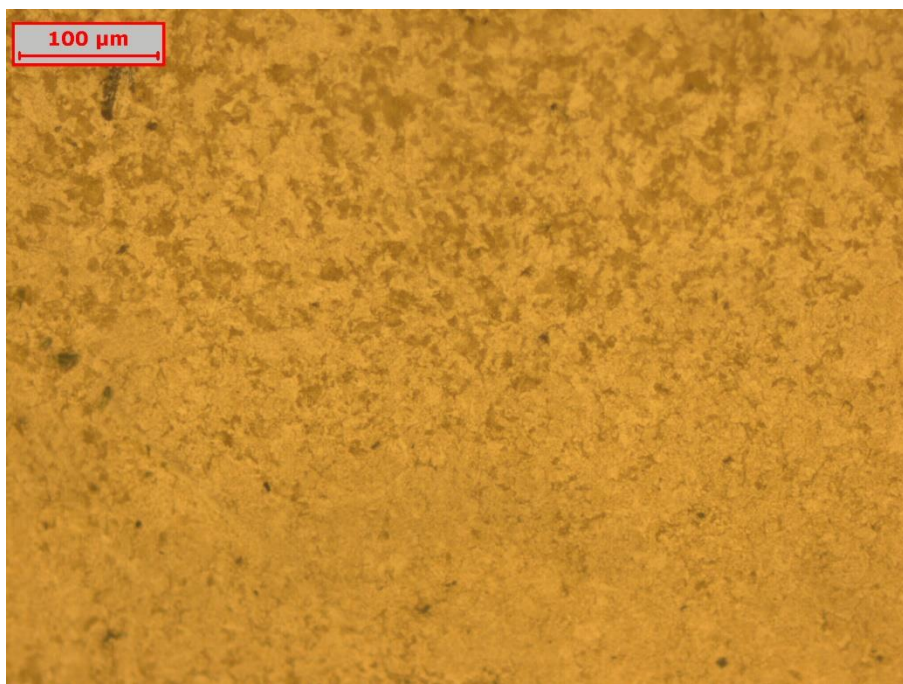


Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Uma característica desta microestrutura que se destaca é a presença de bandas alternadas em cores claras e escuras e que vão aumentando seu espaçamento conforme se distancia da superfície, esta característica é consequência do processo de conformação plástica de forjamento que leva ao bandeamento de micro segregações vindas do processo de solidificação, e fora do escopo de estudo deste trabalho.

Realizando um estudo com uma maior ampliação, verificou-se a presença de outra fase, a partir da profundidade de 50 mm, fato esperado e coerente com os valores de dureza encontrados. A nova fase encontrada aparece em cor escura na Figura 27.

Figura 26 – Micrografia da Amostra_1_200 x

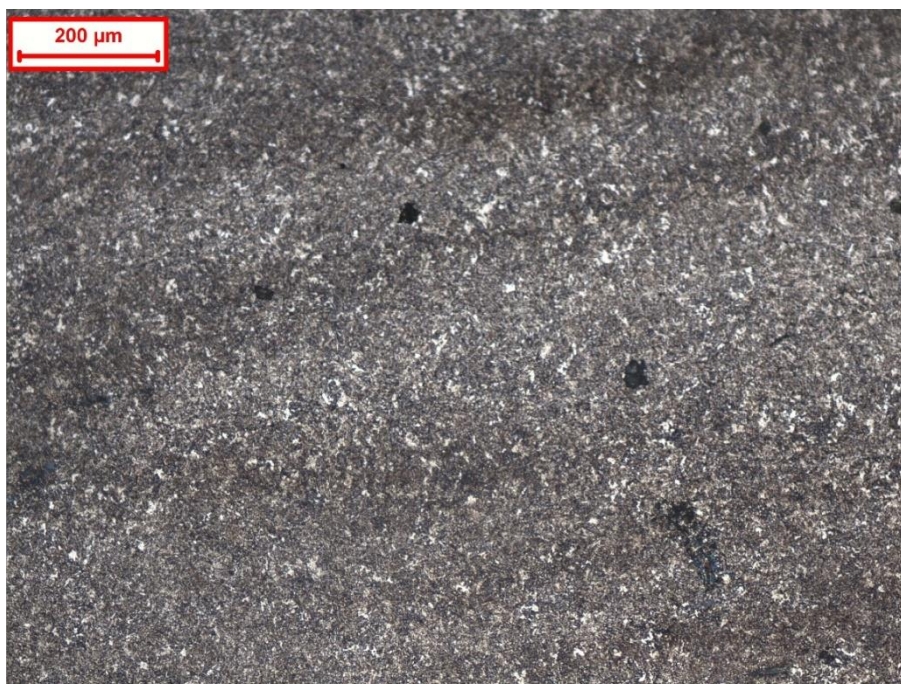


Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

A análise microestrutural das demais amostras, todas retiradas das regiões mais centrais do pescoço do cilindro, não indicou a presença de bandas de deformação, permanecendo homogênea e de caráter semelhante por toda a extensão.

Afim de identificar qual a microestrutura presente ao longo da secção transversal do blank, fez-se o ataque em Nital com 5 segundo de imersão, atingindo um maior poder de revelação. As microestruturas encontradas foram:

Figura 27 – Amostra_1 com ampliação de 100 x



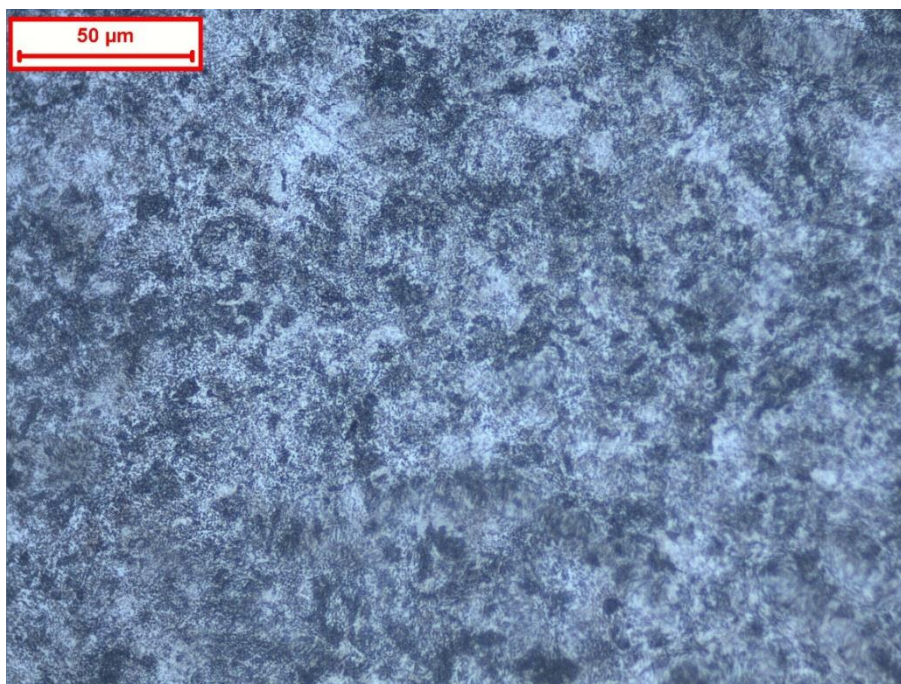
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Figura 28 – Amostra_1 com ampliação de 200 x



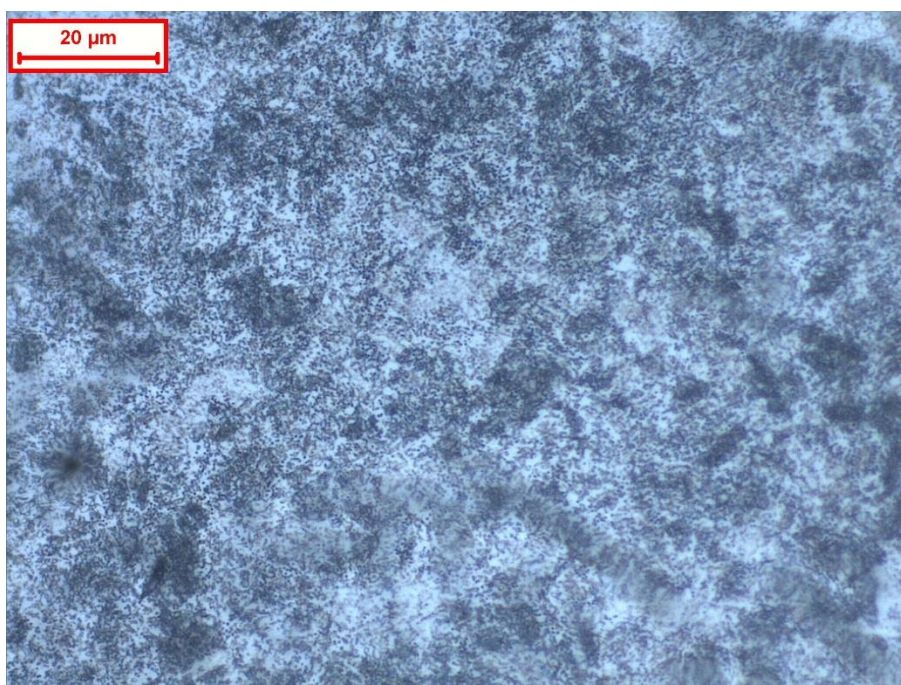
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Figura 29 – Amostra_1 com ampliação de 500 x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Figura 30 – Amostra_1 com ampliação de 1000 x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

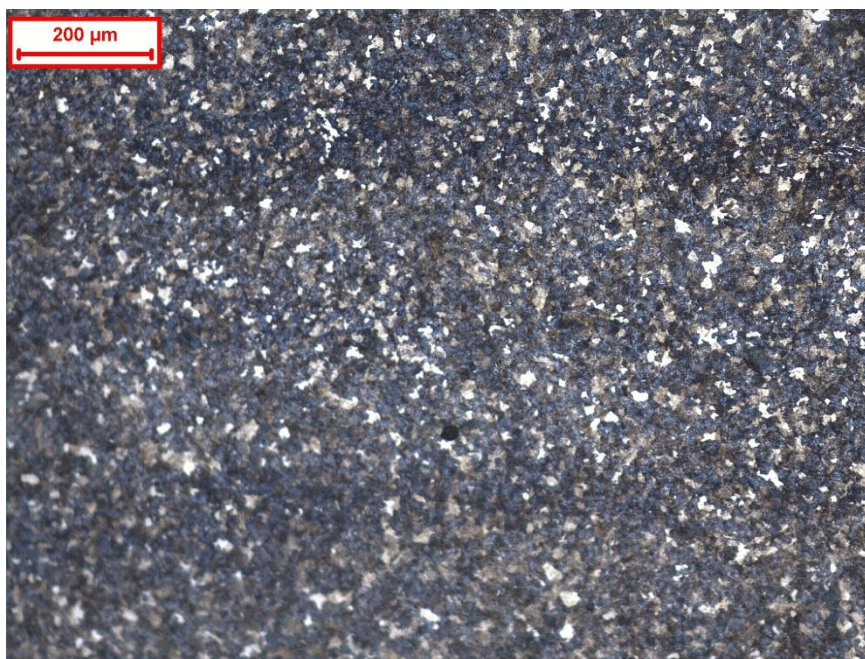
Nota-se que com este ataque foi possível identificar os contornos de grãos em uma microestrutura refinada e homogênea.

Com o aumento da ampliação visto nas Figuras 30 e 31, encontra-se o início do efeito de esferoidização, o qual deve-se ao revenimento, onde o material é aquecido abaixo da linha A1 por um longo período, realizado logo após tratamento térmico com resfriamento em água. A esferoidização consiste em um tratamento térmico aplicado para melhorar as condições de usinagem em aços alto carbono, onde torna-se a cementita presente na perlita em formato esférico. (CHIAVERINI, 1986)

Tomou-se conhecimento que fazendo o uso somente da microscopia ótica não seria possível identificar qual o tipo de microestrutura, sendo portanto, necessário o uso de equipamentos mais sofisticados como o microscópio eletrônico de varredura (MEV). Devido a esta dificuldade, para identificar a microestrutura realizou-se interpretações da curva TTT para o AISI A2 e comparações dos valores de dureza encontrados e informados pela bibliografia e as análises indicaram a presença de uma microestrutura bainítica.

Dando continuidade no estudo das micrografias, encontrou-se o mesmo resultado do primeiro ataque, onde a partir dos 50 mm de profundidade, até o núcleo, a característica microestrutural se mantém muito semelhante. As microestruturas que representam as amostras dessa faixa seguem abaixo:

Figura 31 – Amostra_6 com ampliação de 100 x



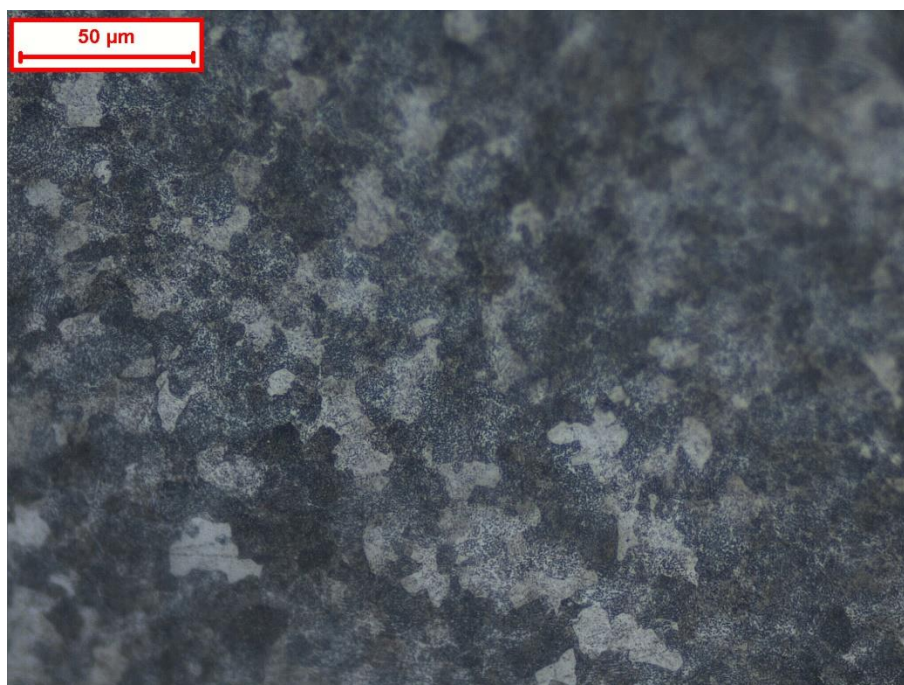
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Figura 32 – Amostra_6 com ampliação de 200 x



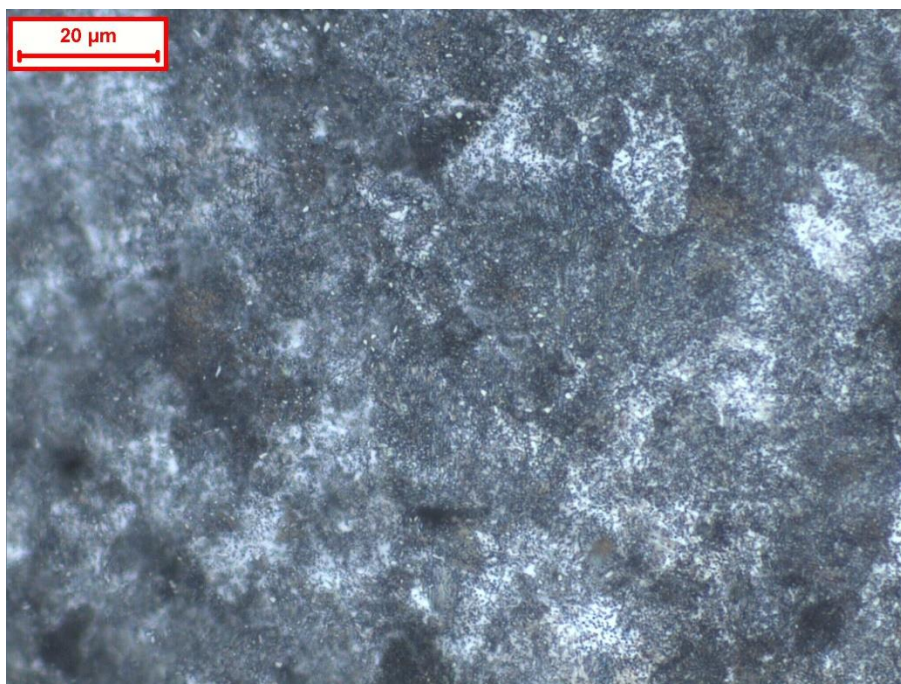
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Figura 33 – Amostra_6 com ampliação de 500 x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Figura 34 – Amostra_6 com ampliação de 1000 x



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

Cerca de 73% da seção transversal do pescoço do cilindro apresenta uma microestrutura com a mesma aparência das micrografias da amostra 6, sendo está refinada, homogênea e com diferentes tonalidades de claro e escuro.

Na micrografia com ampliação de 1000 vezes, Figura 35, foi possível encontrar uma microestrutura com tendência lamelar, o que induz a previsão de uma microestrutura perlítica.

Para confirmar essa hipótese, primeiramente comparou-se os valores de dureza encontrados e conforme citado na referência bibliográfica, uma estrutura perlítica tem uma dureza entre 260 HV e 315 HV, que estão de acordo com os valores encontrados nas medições realizadas nas amostras, mostrando que o material possui uma estrutura perlítica, como esperada. Posteriormente, buscou-se fontes de estudo interno à GERDAU, validando que se trata de uma microestrutura perlítica.

Abaixo, na Figura 36, a imagem de uma microestrutura perlítica observada em microscópio eletrônico de varredura com 5000 vezes de aumento, em um aço com liga idêntica a estudada neste trabalho e fonte de estudo interno da empresa.

A diferença da coloração da perlita em regiões claras e escuras, ocorre pelos grãos estarem situados em planos de deslizamento diferentes, o que reflete uma coloração de luz variada no microscópio ótico.

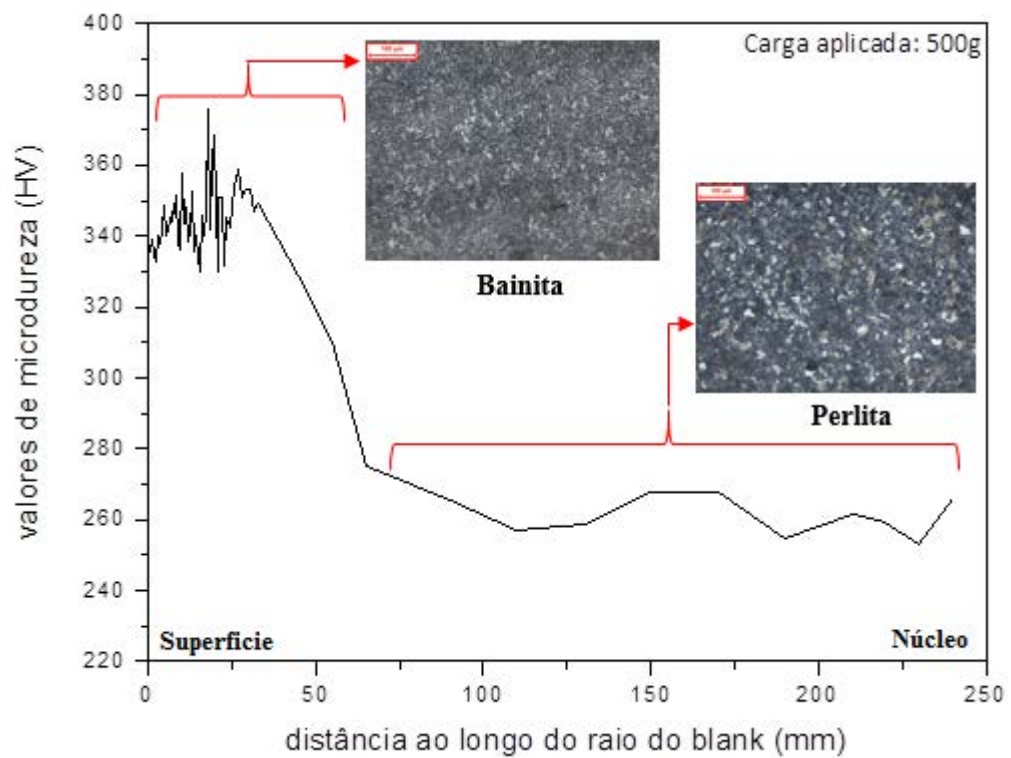
Figura 35 – Microestrutura perlítica em aço VC9 com ampliação de 5000 x



Fonte: (GERDAU, 2010)

Combinando os resultados encontrados no estudo da dureza e microestrutura, foi possível gerar o gráfico 5 abaixo:

Gráfico 5 - Resultado combinado de dureza e microestrutura



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR, 2015)

5. CONCLUSÕES

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi necessário comparar os resultados encontrados com a bibliografia, juntamente com o conhecimento interno da empresa, visto que houve dificuldade de encontrar referências bibliográficas sobre a liga estudada. Em contrapartida, os resultados encontrados durante o desenvolvimento do trabalho, se mostraram satisfatórios e foi possível concluir que:

- ✓ O tratamento térmico com resfriamento em água não é agressivo o suficiente para temperar o material e formar martensita;
- ✓ Os valores de dureza encontrados na região endurecida superficialmente garantem ao cilindro de laminação boa resistência ao desgaste a abrasão e resistência à fadiga térmica;
- ✓ A camada endurecida superficialmente apresenta espessura de 50 mm, garantindo as propriedades necessárias para a aplicação;
- ✓ A microestrutura superficial é bainítica até 50 mm e nas demais regiões centrais é perlítica;
- ✓ O cilindro apresenta menores valores de tensão comparado a um processo de têmpera, o que é vantajoso para as etapas posteriores do processo de fabricação;
- ✓ O tratamento térmico de revenimento, posterior ao tratamento térmico com resfriamento em água, abaixa os valores de dureza e gera uma microestrutura esferoidizada, o que melhora as condições de usinagem;
- ✓ O cilindro apresenta uma região descarbonetada de aproximadamente 10 mm.

Por fim, o conhecimento adquirido neste trabalho, favorece o crescimento da equipe de cilindros e abre portas para novas oportunidades de melhoria no processo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals Handbook**, Forging and Casting, 8ª Ed. v. 5, Material Park: ASM, 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals Handbook**, Heat Treating, 9ª Ed. v. 4, Material Park: ASM, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals Handbook**, Materials Selection and Design, 10ª Ed. v. 20, Material Park: ASM, 2005.

APAZA, Edgar, HUALLPA, **Caraterização da transformação martensítica em temperaturas criogênicas**, 2011, 110 f. Dissertação de mestrado em Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica de São Paulo, 2011.

BROOKS, C. E., **Principles of the heat treatment of plain carbon and low alloy steels**, Ed. ASM Int., p.43-86, 1966.

CALLISTER, Jr W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. p. 4-250.

CHIAVERINI, V., **Aços e Ferros fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 1988.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica v.2: **Processos de fabricação e tratamento**, 2ª Ed. McGraw-Hill. 1986.

COLPAERT, Humberto. **Metalógrafia dos produtos siderúrgicos comuns**, 3º Ed. São Paulo, Editora Edgar Blucher, 1983.

DIETER G. E., **Metalurgia Mecânica**, 4 Ed., Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois, 653p. 1981.

FARIA, R. C., CARBONE C. L., PIVETTA A. L, **Mecânica, métodos e processos industriais**, São Paulo, 2º Ed. Editora LTC tecnologia, 2013.

GERDAU, Sistema de Capacitação Industrial - **Tratamento Térmico**, Pindamonhangaba, Sem Data Definida.

KRAUSS, G. Martensite in steel: strength and structure. **Materials Science and Engineering**; Colorado, v A273 – 275, p. 40-57, 1999.

NM 122:07, Aços Ferramenta: Classificação, Designação e Composição Química. **Norma Mercosul**, 1ª Ed.,1997.

PADILHA, A.F. SICILIANO JUNIOR, F. **Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura**. 3ª Ed. São Paulo, ABM Livros, 2005.

ROBERTS, G.A.; CARY, R.A. **Tool steels**. 4. Ed. Material Park: ASM, 1980. p. 628-791.

SCHAEFFER, L. **Forjamento: Introdução ao processo**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2006.

SILVA, I. B., **Conformação Plástica dos metais**, 6º Ed, Editora da Unicamp, 1997 383p., 2011.

SOUZA, S.A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos**. São Paulo, Edgard Blucher LTDA, 3ª Ed, 1974.

TOTTEN, GEORGE E., **Steel Heat Treatment Handbook**, Taylor & Francis Group, 2ª Ed. Material Park: ASM, 2007.

VILLABÓN, Leonardo V., Trabalho interno GERDAU: **Efeito do tratamento térmico na microestrutura e propriedades mecânicas do aço AISI 4340 usado na fabricação de grandes eixos**, Pindamonhangaba, 2015.

VILLARES ROLLS. **Cilindros de Trabalho para Laminadores de tiras a frios**. Disponível em: < <https://www.villaresrolls.com/web/pt/produtos/Paginas/produto2.aspx>> . Acesso em: 6 out. 2015.

WANG, J. et al. Dynamic Recrystallization behavior of a2 and m2 tool steels. **Journal of Iron and Steel Research International**, Montreal, 15, p. 88-103, 2001.

YANG, G. and Osakada K., **A Review of Expert System for Process Planning of Cold Forging**, **Manufacturing Review**, Fukuoka v.6, n.2, June 1993.