

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO COMPARATIVO DE AÇO-CARBONO MICROLIGADO E
AÇOS-CARBONO LIGADOS PARA FABRICAÇÃO DE PARAFUSOS
FORJADOS A FRIO**

Augusto Hassmann

Lajeado, Novembro de 2016.

Augusto Hassmann

**ESTUDO COMPARATIVO DE AÇO-CARBONO MICROLIGADO E
AÇOS-CARBONO LIGADOS PARA FABRICAÇÃO DE PARAFUSOS
FORJADOS A FRIO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Univates, como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Ricson Rocha de Souza

Lajeado, Novembro de 2016.

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho de conclusão de curso sempre envolve várias pessoas que, de uma forma ou de outra, ajudam em algum momento. Seja de forma direta ou indireta, cada uma delas é responsável por uma parte desta conquista.

Agradeço aos professores do Curso de Engenharia Mecânica da UNIVATES, aos Coordenadores de Curso e, em especial, ao professor Ricson Rocha de Souza, por auxiliar-me com prontidão e por empenhar-se na orientação deste trabalho.

À Metalúrgica Hassmann S.A., especialmente aos seus diretores, Carlos Hassmann e Peter Hassmann, que permitiram a realização deste projeto na empresa e a utilização dos seus equipamentos.

Aos senhores Gerson Severo e Ubiratan Tupinambas, que auxiliaram no fornecimento dos materiais.

Aos amigos e engenheiros Frederico Norberto Haberkamp e Bernardo Hausmann pelo incentivo de cursar engenharia.

Enfim, agradeço a cada um que, de alguma forma, contribuiu para a realização deste trabalho.

RESUMO

A elevada competitividade entre as indústrias do ramo automotivo tem acelerado a busca por soluções inovadoras na fabricação de componentes mecânicos. Assim, a necessidade por produtos de qualidade associado a um baixo custo de produção tem sido o foco principal de pesquisas e desenvolvimentos. É neste cenário que os aços microligados ganham importância, pois a sua utilização pode permitir a otimização de alguns processos produtivos, reduzindo custos e diminuindo impactos ambientais. Neste trabalho buscou-se testar a utilização do aço-carbono microligado ao vanádio 30MnVS6 no processo de forjamento a frio de parafusos milimétricos, visando obter valores de resistência mecânica equivalentes aos obtidos em aço-carbono ligados, sendo que estes, tipicamente, são submetidos aos processos de têmpera e revenimento. Desta forma, amostras de parafuso sextavado M16X2,0X55 foram fabricadas, conforme a norma ISO 4014. Além de amostras em aço-carbono microligado 30MnVS6, também foram produzidos parafusos em aço-carbono ligado PL22 e PL41. No que se refere à caracterização destes materiais, a composição química foi analisada pelo ensaio de espectrometria ótica. Já as propriedades mecânicas foram investigadas pelos ensaios de tração (resistência à tração, tração oblíqua, proof load, alongamento e estrição), dureza (dureza superficial, dureza de núcleo, carbonetação e descarbonetação), charpy (resistência ao impacto) e fadiga. Também foi utilizada a técnica de microscopia ótica para a análise microestrutural dos componentes fabricados. Como resultado do estudo, a utilização do aço-carbono microligado 30MnVS6 não foi viabilizada para produção a frio de parafusos milimétricos de alta classe de resistência mecânica, isto porque as amostras não atenderam plenamente todas as especificações da norma ISO 898-1:2013 para a classe de resistência mecânica 8.8. Em compensação, em alguns casos, pode possibilitar uma redução de etapas do processo de

fabricação, em função da eliminação do tratamento térmico e, portanto, de seus insumos, com um menor custo de produção.

PALAVRAS CHAVES

Aço; Aço-carbono; Microligado; Ligado; Redução; Custos; Forjamento; Parafusos; Ensaio; Classe; Resistência; Norma; Resultados;

ABSTRACT

The high competitiveness among the automotive industries has accelerated the search for innovative solutions in the manufacture of mechanical components. Thus, the need for quality products with low production cost has been the focus of researches and developments. It is on this scenario that the micro-alloyed steels gets relevant because its use could allow optimization of some production processes, reducing costs and reducing environmental impacts. This study aimed to test the use of vanadium micro alloyed carbon steel 30MnVS6 in the cold forging process of millimetric screws to obtain mechanical strength values equivalent to those obtained in related carbon steels, which are typically subjected to quenching and tempering processes. As mentioned, samples of hex head screw M16X2,0X55 were manufactured according to ISO 4014. In addition to samples in micro alloyed carbon steel 30MnVS6, pieces with carbon steel PL22 and PL41 were also produced. For characterization of these materials, the chemical composition was analyzed by optical spectrometry assay. The mechanical properties were also investigated by tensile tests (tensile strength, tensile test under wedge loading, proof load, elongation after fracture and reduction of area after fracture), vickers hardness (surface hardness, base metal hardness, carburization and non-carburization), charpy (impact strength) and fatigue test. A optical microscopy technique for microstructural analysis of the manufactured components was also used. As a result of the study, the use of micro alloyed carbon steel 30MnVS6 was not viable to produce cold forging screws in a high mechanical strength classes, this because the samples did not met all the ISO 898-1:2013 requirements for strength class 8.8. In contrast, in some special cases, the use of micro alloyed carbon steel can reduce some manufacturing process, due to the elimination of heat treatment process and its inputs, with a lower production cost.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos aços.....	24
Figura 2 – Classes e composição química dos aços microligados ao Vanádio.....	27
Figura 3 – Transformações de fase envolvendo a austenita.....	33
Figura 4 – Diagrama de equilíbrio Fe-C.....	34
Figura 5 – Representação esquemática da superposição das curvas de esfriamento no diagrama de transformação para resfriamento contínuo.....	35
Figura 6 – Transformações para o diagrama de equilíbrio do Fe-C.....	37
Figura 7 – Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado.....	38
Figura 8 – Estrutura cristalina cúbica de face centrada.....	38
Figura 9 – Fotomicrografia mostrando estrutura austenítica (ampliação 325 x).....	40
Figura 10 – Microestrutura da ferrita alfa α (ampliação 90 x).....	40
Figura 11 – Microestrutura de um aço com concentração de carbono de 1,4 %. A fase cementita pode ser vista no contorno de grão e no interior do grão, em forma de lamelas (ampliação de 1000 x)	41
Figura 12 – Fotomicrografia mostrando a estrutura lamelar da perlita (ampliação de 500 x).	42
Figura 13 – Fotomicrografia mostrando estrutura bainítica.....	43
Figura 14 – Fotomicrografia mostrando estrutura martensítica. É possível verificar claramente a estrutura tipicamente acicular desse constituinte (ampliação 1220 x)	43
Figura 15 – Laminação.....	49
Figura 16 – Esquema de representação de trem contínuo de laminação.....	49
Figura 17 – Ilustração do processo de extrusão direta.....	51
Figura 18 – Ilustração do processo de extrusão inversa.....	51

Figura 19 – Tensões de tração (σ_t) e de compressão (σ_c) aplicadas na trefilação.....	53
Figura 20 – Ângulos e regiões de uma fieira por trefilação	53
Figura 21 – Ângulos e regiões de uma fieira por trefilação	55
Figura 22 – Estampagem de chapas por embutimento	55
Figura 23 – Estampagem de chapas por estiramento	56
Figura 24 – Estampagem de chapas por dobramento.....	57
Figura 25 – Forjamento livre em matriz aberta.....	57
Figura 26 – Forjamento em matriz fechada.....	58
Figura 27 – Uniões formadas com parafusos.....	59
Figura 28 – Parafuso sextavado.....	60
Figura 29 – Bobinas ou rolos de arame para conformação de parafusos.....	61
Figura 30 – Prensa horizontal de cinco estágios para conformação de parafusos.....	62
Figura 31 – Etapas do forjamento a frio de parafusos.....	63
Figura 32 – Propriedades físicas e mecânicas.....	64
Figura 33 – Tabela de testes.....	66
Figura 34 – Resistência a tração X alongamento após ruptura.....	67
Figura 35 – Representação do corpo de prova.....	67
Figura 36 – Representação do diagrama tensão-deformação.....	70
Figura 37 – Curvas S-N do estudo de Wöhler.....	73
Figura 38 – Equipamento de ensaio.....	74
Figura 39 – Caracterização do impacto no ensaio de charpy.....	75
Figura 40 – Entalhes do ensaio de charpy.....	75
Figura 41 – Fluxograma representando a metodologia adotada no trabalho.....	79
Figura 42 – Sacma SP 48.....	82
Figura 43 – Primeiro estágio da conformação.....	83
Figura 44 – Segundo estágio da conformação mecânica.....	84
Figura 45 – Terceiro estágio da conformação mecânica.....	85
Figura 46 – Quarto estágio da conformação mecânica (posição inicial)	86
Figura 47 – Quarto estágio da conformação mecânica (remoção material)	86
Figura 48 – Linha contínua de têmpera e revenimento.....	87
Figura 49 – Esquematização da linha contínua de têmpera e revenimento.....	88
Figura 50 – Espectrômetro de emissão ótica.....	90
Figura 51 – MUEM Wolpert.....	91

Figura 52 – Parafuso sextavado 30MnVS6 acoplado no ensaio de tração.....	92
Figura 53 – Ensaio de tração oblíqua.....	93
Figura 54 – Corpo de prova para ensaio de tração.....	94
Figura 55 – Corpo de prova usinado para ensaio de estrição e alongamento e fratura do corpo de prova 30MnVS6 após ensaio de tração	95
Figura 56 – Máquina ensaio de fadiga.....	97
Figura 57 – Exemplo do teste de fadiga pelo método de staircase.....	99
Figura 58 – Distribuição da constante “t” student.....	101
Figura 59 – Estação de preparação metalográfica.....	102
Figura 60 – Microscópio óptico.....	102
Figura 61 – Amostra material microligado 30MnVS6 embutida no baquelite.....	103
Figura 62 – Estação de análise de dureza.....	104
Figura 63 – Determinação de dureza para teste de carbonetação e descarbonetação.....	105
Figura 64 – Fotomicrografia do aço-carbono microligado 30MnVS6 (ampliação de 500 X) ...	108
Figura 65 – Fotomicrografia do aço-carbono ligado PL22 (ampliação de 500 X)	108
Figura 66 – Fotomicrografia do aço-carbono ligado PL41 (ampliação de 500 X)	109
Figura 67 – Etapas do forjamento a frio das amostras com aço microligado 30MnVS6.....	110
Figura 68 – Amostras produzidas com aço-carbono ligado PL41.....	110
Figura 69 – Dimensões parafuso sextavado conforme ISO 4014:2011.....	111
Figura 70 – Níveis de tensão do blank do primeiro estágio (aço 30MnVS6)	112
Figura 71 – Níveis de tensão do blank do primeiro estágio (aço PL41)	113
Figura 72 – Níveis de tensões do blank do segundo estágio (aço 30MnVS6)	113
Figura 73 – Níveis de tensões do blank do segundo estágio (aço PL41)	114
Figura 74 – Níveis de tensões do blank do terceiro estágio (aço 30MnVS6)	115
Figura 75 – Níveis de tensões do blank do terceiro estágio (aço PL41)	115
Figura 76 – Níveis de tensões do blank do quarto estágio (aço 30MnVS6)	116
Figura 77 – Níveis de tensões do blank do quarto estágio (aço PL41)	116
Figura 78 – Gráfico tensão X deformação para aço 30MnVS6 (Amostra 4)	119
Figura 79 – Gráfico tensão X deformação para aço PL22 (Amostra 3)	119
Figura 80 – Gráfico tensão X deformação para aço PL41 (Amostra 5)	120
Figura 81 – Gráfico tensão X deformação quando em tração oblíqua para aço 30MnVS6 (Amostra 1)	121

Figura 82 – Gráfico tensão X deformação quando em tração oblíqua para aço PL22 (Amostra 5)	1 22
Figura 83 – Gráfico tensão X deformação quando em tração oblíqua para aço PL41 (Amostra 1)	1 22
Figura 84 – Resultado ensaio de impacto aço 30MnVS6.....	127
Figura 85 – Resultado ensaio de impacto aço PL22.....	128
Figura 86 – Resultado ensaio de impacto aço PL41.....	128
Figura 87 – Resultado staircase para aço-carbono microligado 30MnVS6.....	1 29
Figura 88 – Resultado staircase para aço-carbono ligado PL22.....	129
Figura 89 – Resultado staircase para aço-carbono ligado PL41.....	130
Figura 90 – Falha por fadiga 30MnVS6 x PL22.....	1 31

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Cronograma de execução do trabalho de conclusão.....	22
Quadro 2 – Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços.....	46
Quadro 3 – Limites de composição química, materiais e tratamentos térmicos	65
Quadro 4 – Composição química do aço 30MnVS6.....	80
Quadro 5 – Composição química dos aços-carbono ligados e sua aplicação.....	81
Quadro 6 – Dados do processo de tratamento térmico dos aços-carbono ligados.....	89
Quadro 7 – Cargas mínimas de ruptura para roscas métricas normais ISSO.....	91
Quadro 8 – Características do ensaio de tração oblíqua.....	93
Quadro 9 – Carga de ensaio para teste de proof load em roscas métricas normais.....	96
Quadro 10 – Cálculo carga estática.....	99
Quadro 11 – Composição química dos aços utilizados.....	106
Quadro 12 – Resultado dimensional das amostras.....	111
Quadro 13 – Força de forjamento.....	117
Quadro 14 – Valores médios de resistência à tração e escoamento aço 30MnVS6.....	118
Quadro 15 – Valores médios de resistência à tração e escoamento aço PL22.....	118
Quadro 16 – Valores médios de resistência à tração e escoamento aço PL41.....	118
Quadro 17 – Resistência à tração oblíqua (inclinada)	121
Quadro 18 – Alongamento para aço-carbono microligado 30MnVS6.....	123
Quadro 19 – Alongamento para aço-carbono ligado PL22.....	123
Quadro 20 – Alongamento para aço-carbono ligado PL41.....	124
Quadro 21 – Estricção para aço-carbono microligado 30MnVS6.....	124
Quadro 22 – Estricção para aço-carbono ligado PL22.....	125
Quadro 23 – Estricção para aço-carbono ligado PL41.....	125

Quadro 24 – Ensaio de carga de prova (Proof Load) aço 30MnVS6.....	126
Quadro 25 – Ensaio de carga de prova (Proof Load) aço PL22.....	126
Quadro 26 – Ensaio de carga de prova (Proof Load) aço PL41.....	126
Quadro 27 – Valores médios de dureza de núcleo.....	127
Quadro 28 – Resultado cargas dinâmicas para 50 % probabilidade de sobrevivência das peças.....	130
Quadro 29 – Desvio padrão das cargas dinâmicas para 50 % probabilidade de sobrevivência das peças.....	130
Quadro 30 – Resultado cargas dinâmicas para 99 % probabilidade de sobrevivência das peças.....	131
Quadro 31 – Resultados gerais aço-carbono microligado 30MnVS6.....	133
Quadro 32 – Análise de Viabilidade Econômica.....	134
Quadro 33 – Método da dureza superficial para o aço 30MnVS6.....	137
Quadro 34 – Carbonetação pelo método da dureza superficial para o aço PL22.....	138
Quadro 35 – Carbonetação pelo método da dureza superficial para o aço PL41.....	138
Quadro 36 – Descarbonetação pelo método da dureza de pontos para aço-carbono ligado PL22.....	139
Quadro 37 – Descarbonetação pelo método da dureza de pontos para o aço-carbono ligado PL41.....	139

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação de Hall-Petch.....	30
Equação 2 – Coeficiente de Estricção ou Redução de Área (φ)	68
Equação 3 – Alongamento específico (δ)	68
Equação 4 – Lei de Hooke.....	69
Equação 5 – Carga estática para ensaio de fadiga.....	98
Equação 6 – Carga dinâmica para 50 % de probabilidade de sobrevivência da peça.....	100
Equação 7 – Desvio padrão da carga média de resistência.....	100
Equação 8 – Carga dinâmica para 99 % de probabilidade de sobrevivência da peça.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	<i>Alumínio</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ARBL	<i>Alta Resistência Baixa Liga</i>
B	<i>Boro</i>
C	<i>Carbono</i>
CCC	<i>Cúbica Corpo Centrado</i>
CFC	<i>Cúbica Face Centrada</i>
Co	<i>Cobalto</i>
COR-TEM	<i>Corrosion Resistance e Tensile Strength</i>
Cr	<i>Cromo</i>
Cu	<i>Cobre</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
Fe-C	<i>Ferro Carbono</i>
GPa	<i>Giga Pascal</i>
HB	<i>Escala de Dureza Brinell</i>
HRC	<i>Escala de Dureza Rockwell C</i>
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i>
HV	<i>Escala de Dureza Vickers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
Kg	<i>Quilograma</i>
Kgf/mm ²	<i>Quilograma Força / Milímetros Quadrados</i>

kN	<i>Quilo Newton</i>
Le	<i>Limite de Escoamento</i>
Li	<i>Comprimento Inicial</i>
Lf	<i>Comprimento Final</i>
Lrt	<i>Limite de Resistência à Tração</i>
MH	<i>Metalúrgica Hassmann S/A</i>
mm/min	<i>Milímetros / Minuto</i>
Mn	<i>Manganês</i>
Mo	<i>Molibdênio</i>
MPa	<i>Mega Pascal</i>
MUEM	<i>Máquina Universal de Ensaio Mecânicos</i>
N	<i>Nitrogênio</i>
Nb	<i>Nióbio</i>
Ni	<i>Níquel</i>
P	<i>Fósforo</i>
Pb	<i>Chumbo</i>
PDA	<i>Pulse Height Distribution Analysis</i>
S	<i>Enxofre</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
Si	<i>Silício</i>
Ti	<i>Titânio</i>
ULSAB	<i>Ultra-Light Steel Auto Body</i>
V	<i>Vanádio</i>
W	<i>Tungstênio</i>
α	<i>Fase Alfa</i>
γ	<i>Fase Gama</i>
σ	<i>Tensão de Engenharia</i>
σ_t	<i>Tensão de Tração</i>
σ_c	<i>Tensão de Compressão</i>
ϵ	<i>Deformação</i>
ϕ	<i>Estricção</i>
λ	<i>Alongamento</i>
μm	<i>Micrometro</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos do Trabalho.....	20
1.2 Justificativa e Relevância do Trabalho.....	20
1.3 Cronograma.....	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1 Aços.....	23
2.1.1 Aços Microligados (ARBL)	25
2.2 Mecanismos de Aumento de Resistência dos Aços.....	29
2.2.1 Endurecimento por Refino de Grão.....	29
2.2.2 Endurecimento por Solução Sólida.....	30
2.2.3 Endurecimento por Trabalho a Frio.....	31
2.2.4 Endurecimento por Precipitação.....	31
2.2.5 Endurecimento por Transformação de Fase.....	32
2.2.5.1 Relação entre Estrutura Cristalina e Microestrutura.....	37
2.3 Fases e Constituintes dos Aços.....	39
2.3.1 Austenita.....	39
2.3.2 Ferrita.....	40
2.3.3 Cementita.....	41
2.3.4 Perlita.....	41
2.3.5 Bainita.....	42
2.3.6 Martensita.....	43

2.4 Influências dos Elementos de Liga nas Propriedades dos Aços.....	43
2.5 Conformação Mecânica dos Metais.....	47
2.5.1 Laminação.....	48
2.5.2 Extrusão.....	50
2.5.3 Trefilação.....	52
2.5.4 Estampagem.....	54
2.5.5 Forjamento.....	56
2.6 Parafusos.....	58
2.6.1 Tipos de Parafusos.....	59
2.6.1.1 Parafusos Sextavados.....	60
2.6.2 Conformação de Parafusos.....	60
2.6.3 Propriedades Mecânicas.....	63
2.6.3.1 Ensaio de Tração.....	66
2.6.3.2 Ensaio de Dureza.....	70
2.6.3.3 Ensaio de Fadiga.....	72
2.6.3.4 Ensaio de Impacto.....	73
2.6.3.5 Análise Composição Química.....	76
2.6.3.6 Teste com Carga de Ensaio (Proof Load)	76
2.6.3.7 Análise Metalográfica.....	76
3 METODOLOGIA.....	78
3.1 Materiais.....	79
3.2 Conformação dos Materiais.....	81
3.3 Tratamento Térmico dos Aços Ligados.....	86
3.4 Caracterizações dos Materiais Metálicos.....	89
3.4.1 Análise Composição Química.....	89
3.4.2 Ensaio de Tração.....	90
3.4.3 Ensaio de Impacto (Charpy)	95
3.4.4 Teste com Carga de Ensaio (Proof Load)	96
3.4.5 Ensaio de Resistência à Fadiga.....	97
3.4.6 Análises Metalográficas.....	101
3.4.7 Ensaio de Dureza.....	103

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	106
4.1 Análise da Composição Química dos Materiais.....	106
4.2 Análise Metalográfica.....	107
4.3 Conformação das Amostras.....	109
4.4 Ensaio de Tração.....	117
4.4.1 Resistência à Tração.....	118
4.4.2 Resistência à Tração Oblíqua.....	120
4.4.3 Alongamento.....	123
4.4.4 Estricção.....	124
4.4.5 Proof Load (Ensaio de Carga de Prova)	125
4.5 Ensaio de Dureza.....	126
4.6 Ensaio de Impacto (Charpy)	127
4.7 Ensaio de Fadiga.....	129
4.8 Resultados Gerais.....	132
4.9 Análise Preliminar de Viabilidade Econômica.....	133
5. CONCLUSÃO.....	135
6. ANEXOS.....	137
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140

1. INTRODUÇÃO

Segundo Ianni (1999), o desenvolvimento extensivo do capital criou uma nova divisão do trabalho e de produção, espalhando unidades produtivas por todo o mundo, informatizando processos e modificando estrutura das classes operárias, o que fez com que o mundo se transformasse numa imensa e única fábrica.

A competitividade entre empresas, originada pela globalização dos mercados consumidores, vem forçando o desenvolvimento de seus produtos e processos internos. Quando se analisa o cenário econômico automotivo, torna-se cada vez mais visível esta disputa. Ser competitivo tornou-se um desafio para os empresários da cadeia de subfornecedores das montadoras automotivas.

A exigência por parte das montadoras de automóveis por produtos de maior qualidade, faz com que a indústria de autopeças concentrasse esforços na busca por processos que sejam capazes de satisfazer tais exigências, e por materiais alternativos, com propriedades mecânicas iguais ou superiores aos materiais atuais, porém com custos menores. É nesse contexto que os fabricantes de elementos de fixação automotivos estão inseridos, sendo que estes são tipicamente produzidos através de processos de conformação mecânica.

Segundo Machado (2009) a conformação dos metais ocorre quando um dado material, normalmente de geometria simples, é transformado em um produto através de um processo de fabricação. A conformabilidade é a capacidade de deformação plástica de um material sem o seu rompimento frágil. Esta técnica está atrelada às condições existentes durante o processo

de deformação, tais como a taxa de deformação e a temperatura, e às variáveis do aço utilizado, tais como: composição química, presença de defeitos e microestrutura.

Acompanhando a tendência mundial e o crescente desenvolvimento da indústria automobilística que exige inovações tecnológicas na área de ciência dos materiais, a utilização de aços microligados surge como uma alternativa. Estes aços são denominados de ARBL, que significa *alta resistência mecânica e baixa liga*, sigla advinda de HSLA (*high strength low alloy*).

Segundo Colaço (2005), ao invés da utilização dos aços-carbono, no qual o aumento da resistência é conseguido à custa do aumento do teor de carbono, nos aços ARBL, a adição dos elementos de liga provoca o endurecimento por solução sólida e por precipitação de finas dispersões de carbonetos, o que conduz ao refinamento da microestrutura do aço. Como resultado tem-se um excelente compromisso entre tensões de escoamento elevadas e ductilidade.

Segundo estudos de Erisir (2012), na a indústria automotiva, a utilização de aço microligado 30MnVS6 para conformação de peças forjadas à quente possibilita reduzir o tempo de processamento dos componentes. Isto acontece porque a dureza e a resistência das peças forjadas utilizando aços microligado são obtidas através dos mecanismos de refinamento do grão e de endurecimento por precipitação, causados pelos elementos de liga durante a conformação mecânica, possibilitando desta forma, a eliminação do processo subsequente de tratamento térmico. O 30MnVS6 é conhecido por ser um aço microligado ferrítico-perlítico muito utilizado pela indústria de autopeças na fabricação de componentes com classes de resistência que variam de 800 a 1000 MPa. Segundo a norma alemã DIN (*Deutsches Institut für Normung*) EN 10267, seu teor de carbono deve variar de 0,26 % mínimo a 0,33 % máximo, e seus principais elementos de liga são manganês, com teor mínimo de 1,2 % e máximo de 1,6 % e vanádio, com teor mínimo de 0,08 % e 0,2 % máximo.

É de especial interesse a utilização de aços microligados da classe 30MnVS6 na manufatura de parafusos, visando alcançar propriedades mecânicas equivalentes aos aços ao carbono temperados sem a necessidade de tratamento térmico posterior à conformação mecânica. Deste modo, o tempo do processo de fabricação e, eventualmente, os custos de produção poderiam ser reduzidos. Portanto, o objetivo deste trabalho é utilizar o aço

microligado 30MnVS6 para a fabricação de parafusos de alta resistência mecânica, quando comparados aos aços-carbono ligados que passam pelo processo de tratamento térmico. Para tanto, foram analisadas as propriedades mecânicas e microestruturais dos elementos de fixação produzidos pelos diferentes materiais, além de um estudo de viabilidade econômica.

1.1 Objetivos do trabalho

Estudar dois tipos de aços utilizados na fabricação de fixadores de alta resistência mecânica. O primeiro, um aço-carbono ligado, que exige um processo de tratamento térmico para atingir as propriedades mecânicas estabelecidas por norma. E o segundo material a ser utilizado, um aço-carbono microligado, visando alcançar as propriedades mecânicas estabelecidas pela norma, sem a necessidade do processamento térmico.

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser descritos como:

- Fabricar parafusos de alta resistência mecânica em aço-carbono ligado e aço-carbono microligado;
- Comparar as propriedades mecânicas e microestruturais dos dois materiais utilizados, através de análises e ensaios mecânicos, baseados na norma ISO (*International Organization for Standardization*) 898-1;
- Analisar a viabilidade econômica dos dois materiais utilizados;

1.2 Justificativa e Relevância do Trabalho

Nas últimas décadas, pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos, vêm assumindo novas formas no sentido de uma concepção sistêmica e integrada. De uma maneira geral o que mais chama atenção no campo dos materiais, é a grande variedade de descobertas de propriedades dos novos usos e da variedade de aplicações desenvolvidas. O resultado final é o número muito grande de materiais alternativos aos que vinham sendo tradicionalmente utilizados.

Por este motivo, um dos principais desafios de engenheiros ao redor do mundo é achar as melhores alternativas para desenvolvimento de um produto, levando em conta diversos fatores importantes nas suas características. Sendo assim, um produto não repousa mais sobre

um dado material, ao contrário, diversos materiais passam a competir entre si para assumir determinada função, a um determinado custo, promovendo a inversão na lógica da produção.

Nos dias de hoje, o desenvolvimento de novos materiais para indústria automotiva é evidente e irreversível. A eletrônica embarcada, a melhoria no desempenho dos motores e de sua eficiência, componentes com propriedades mecânicas avançadas, além das adaptações necessárias para atender às exigências ambientais e de segurança que têm sido crescentes, são motivos que tem levado à substituição dos materiais componentes de todas as partes do automóvel numa competição constante entre os materiais.

Ao mesmo tempo em que estas melhorias estão sendo alcançadas, o mercado de autopeças está se tornando altamente competitivo, sendo direcionado para um mercado cada vez mais global. É por este motivo, que a redução de custos de produção juntamente com o desenvolvimento de novos materiais é fundamental para tornar-se uma empresa do ramo, competitiva.

É neste cenário que o presente trabalho está englobado. Espera-se que, com o desenvolvimento da pesquisa, seja possível sugerir uma forma alternativa para a produção de parafusos, componente insubstituível na indústria automotiva, reduzindo significativamente o tempo de operação, diminuindo os custos relativos envolvidos.

Para a Instituição de Ensino, este trabalho se justifica, pois, poderá ser utilizado como fonte de pesquisa para outros acadêmicos que tenham interesse em aprofundar seus conhecimentos sobre o presente tema, ou para profissionais que tenham interesse no assunto e que procurem alguma sugestão de melhoria de processo.

1.3 Cronograma

O cronograma apresentado no Quadro 1 detalha as etapas de execução do trabalho proposto.

Quadro 1 – Cronograma de execução do trabalho de conclusão

Período	Mar. /16		Abr. /16		Maio /16		Jun. /16		Jul. /16		Ago. /16		Set. /16		Out. /16		Nov. /16		Dez. /16	
	1ª quinz	2ª quinz																		
Reunião inicial de TCC	X																			
Definir tema do trabalho	X																			
Definir orientador para o trabalho	X																			
Elaborar introdução, referencial teórico e metodologia		X	X	X	X				X	X	X	X	X	X						
Realizar correção						X														
Entregar trabalho para avaliação							X													
Fabricação das peças								X												
Realização dos Ensaio									X	X	X									
Coletar dados										X		X								
Analisar dados										X		X								
Apurar resultados/ conclusões													X							
Redigir documento final														X						
Efetuar a revisão ortográfica															X					
Entregar monografia																X				
Defender monografia																	X			
Efetuar correções solicitadas na banca																	X			
Entrega da versão final da monografia																		X		

Fonte: Do autor (2016).

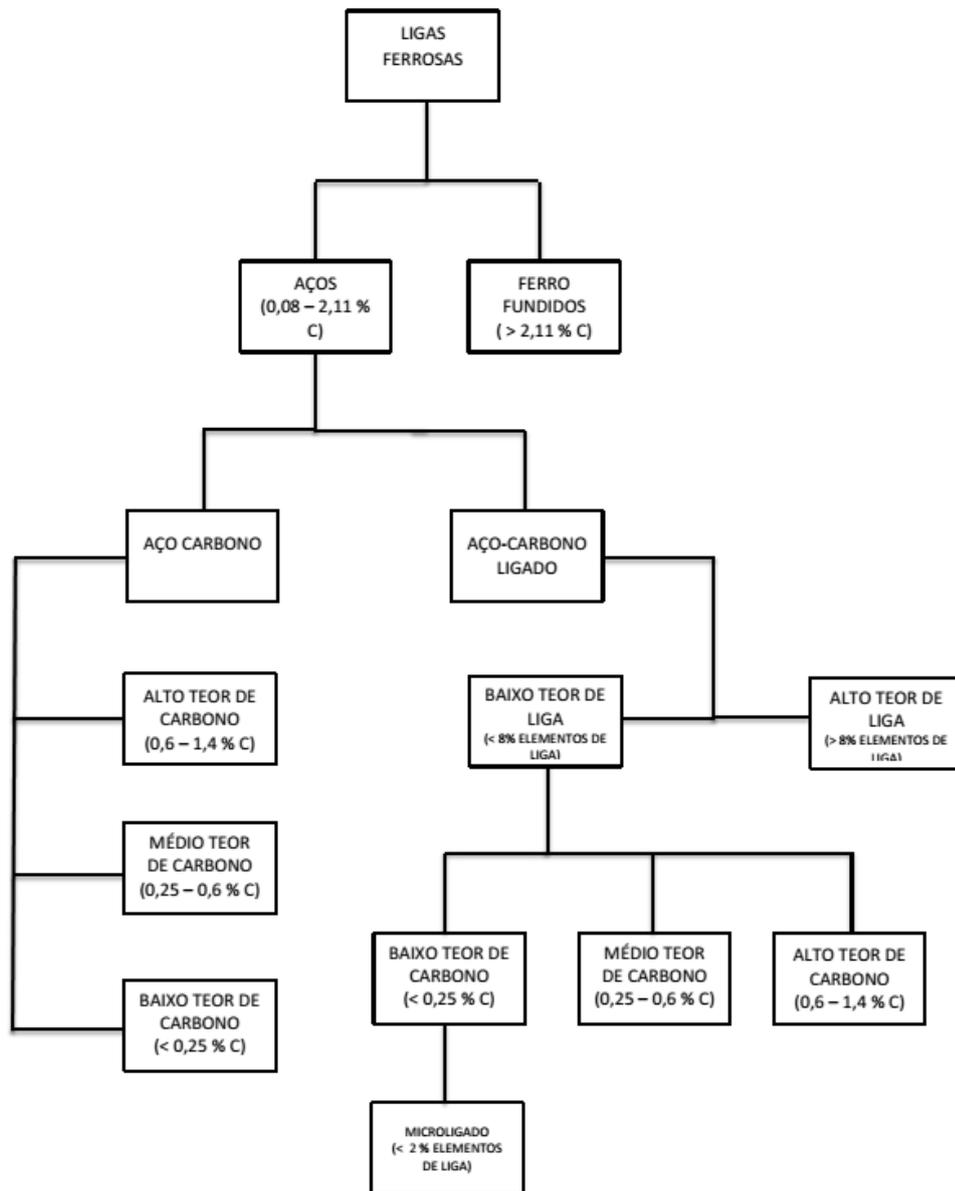
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aços

Chiaverini (2005) define aço como uma liga ferro-carbono que contém 0,008 % a 2,11 % de teor carbono além de certos elementos residuais. O limite inferior a 0,008 % corresponde à máxima solubilidade do carbono no ferro à temperatura ambiente e o limite superior 2,11 % corresponde à máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro a 1140 °C.

O aço-carbono pode ser subdividido em três grupos conforme sua concentração de carbono, sendo eles: aços de alto teor de carbono, aços de médio teor de carbono e aços de baixo teor de carbono. Já o aço-liga, por sua vez, pode ser dividido em dois grupos, conforme as concentrações de elementos de liga: aços de alto teor de liga e aços de baixo teor de liga. Todo aço-liga é um aço carbono com determinados elementos de liga. O fluxograma representado na Figura 1 abaixo esquematiza a classificação dos aços.

Figura 1 – Classificação dos aços



Fonte: Do autor (2016)

Segundo Callister (2011), dentre todos os aços carbonos, os aços de alto teor são os que apresentam maior dureza e maior resistência mecânica, apesar de serem menos dúcteis, com uma concentração de teor de carbono variando entre 0,60 % e 1,4 %. São normalmente utilizados em uma condição temperada e revenida, tornando-os assim resistentes ao desgaste e à abrasão. Ainda, são comumente encontrados em aços para ferramentas de corte e matrizes para conformação de materiais, além de lâminas, molas e arames com alta resistência.

Os aços com médio teor de carbono possuem concentrações entre aproximadamente 0,25 % e 0,60 %. Estas ligas também podem ser tratadas termicamente por processos de austenitização, têmpera e revenimento para obter melhores resultados nas propriedades mecânicas e por isso, são frequentemente encontrados na condição microestrutural de martensita revenida. As suas aplicações incluem rodas, engrenagens, virabrequins, entre outros componentes estruturais de alta resistência mecânica.

Já, os aços com baixo teor de carbono possuem em sua composição um teor inferior a 0,25 %. A sua microestrutura típica é composta pelas fases ferrita e perlita, apresentando alta ductilidade e tenacidade, porém com baixa resistência mecânica. Em geral, dentro das propriedades mecânicas destes aços, seu limite de escoamento encontra-se em 275 MPa, limite de resistência a tração entre 415 e 550 MPa e ductilidade de aproximadamente 25 %. Dentre os exemplos usuais de aplicação, é possível encontrá-los em carcaças de automóveis, formas estruturais como vigas e canaletas, chapas para tubulações, pontes, etc.

Quanto ao teor de elementos de liga em um aço-carbono, considera-se acima de 8 % um aço com alto teor de liga e abaixo de 8 % um aço com baixo teor de liga. Dentre os aços de baixo teor de carbono e baixa teor de liga podemos encontrar os aços ARBL. Estes materiais combinados, também conhecidos como aços microligados, contêm alguns elementos de liga, tais como o cobre, o vanádio, o níquel, molibdênio, titânio, nióbio, entre outros, em concentração bastante específicas, a fim de promover um aumento de resistência mecânica, comparando com os aços comuns contendo baixo teor de carbono. CHIAVERINI (2005)

2.1.1 Aços Microligados (ARBL)

Segundo Perini (2008), a necessidade do desenvolvimento de novos aços, com alta resistência mecânica, elevada soldabilidade, alta ductilidade e alta tenacidade, para atender a demanda da indústria metalomecânica, principalmente a indústria automobilística, possibilitou o crescimento da utilização de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL).

Matlock (2009) afirma que dentro desta classe de aços estão os aços microligados, no qual a adição de elementos microligantes como o nióbio (Nb), o titânio (Ti) ou o vanádio (V), por exemplo, juntamente com o processamento termomecânico (laminação controlada), resulta em aços de alta resistência e baixa liga. Os teores de elementos ligantes são muito menores do

que em aços de outras categorias, como aços inoxidáveis, ou aços ferramenta, por exemplo, no qual a soma dos elementos de liga geralmente não ultrapassa 2 %, e o teor de carbono situa-se abaixo de 0,25 %.

Segundo o ASM Handbook (American Society for Metals) (2001) a utilização dos primeiros aços microligados ocorreu em 1930 nos Estados Unidos com a denominação de CORTEN (Marca da USX Corporation, abreviação de resistência à corrosão “corrosion resistance” e resistência à tração “tensile strength”). Sua resistência mecânica era cinco vezes maior comparado aos aços utilizados até então. Conforme PERINI (2008), a partir da década de 70, a indústria automobilística buscava intensamente o desenvolvimento de novos materiais, devido principalmente à crise do petróleo. Nesta época, a redução do peso dos veículos era o principal objetivo de projetistas, engenheiros e metalurgistas, que estavam envolvidos no desenvolvimento de novos produtos. Como exemplo, o projeto ULSAB (ultra light steel auto body), desenvolvido por várias companhias siderúrgicas como: Arcelor Mittal, Kobelco, SSAB, Nippon Steel Corporation, Usiminas, Thyssenkrupp Stahl, previa a utilização dos aços de baixa liga e alta resistência mecânica, desenvolvendo a parte estrutural e coberturas de um automóvel, buscando elevados índices de segurança, redução de massa e aplicação de aços com limites de escoamento que variam entre 400 MPa e 1400 MPa.

Siciliano E Ono (2006) explicam que esta alta resistência mecânica se deve às variações microestruturais obtidas nestes aços, principalmente, no controle do tamanho de grão. O efeito refinador de grão dos elementos de liga está relacionado com o efeito em retardar a recristalização da austenita por solução sólida e, principalmente, pela precipitação de carbonetos, nitretos e/ou carbonitretos durante a laminação a quente. A precipitação retarda a recristalização da austenita nos estágios finais da laminação, promovendo a formação de grãos alongados, que darão origem à grãos ferríticos muito refinados após transformação.

Gladmann (1997) afirma que os aços microligados apresentam, na sua forma original mais simples, uma microestrutura do tipo ferrita-perlita e os elementos microligantes promovem diferentes efeitos sobre a microestrutura. O vanádio, por exemplo, por ser um elemento que apresenta maior solubilidade, é normalmente adicionado para promover o endurecimento da matriz ferrítica por precipitação. O titânio forma nitretos estáveis a altas temperaturas, que contribuem no controle do crescimento de grão austenítico durante o reaquecimento no processamento termomecânico. Já o nióbio possui uma solubilidade

intermediária e influencia fortemente a cinética de recristalização, que resulta usualmente no refino de grão ferrítico após a transformação da fase gama (γ) para fase alfa (α).

O processo de fabricação também tem grande influência nas propriedades mecânicas finais dos aços microligados. No processo termomecânico, as etapas de conformação conferem propriedades mecânicas superiores em comparação aos aços com mesmo nível de elementos de liga submetidos a processos convencionais, além de proporcionar boa tenacidade e soldabilidade.

Milbourn (1996) afirma que aços microligados ao vanádio (V) são amplamente utilizados em componentes automotivos com aplicações severas, podendo alcançar até 1100 MPa de resistência à esforços de tração e limites de escoamento que variam de 420 a 700 MPa. Sua utilização acontece desde 1970, quando o primeiro aço microligado ao vanádio, o 49MnVS3, foi desenvolvido na Alemanha. O endurecimento por precipitação é o principal mecanismo de endurecimento destes aços. Pelo fato do vanádio apresentar maior solubilidade na austenita, é preferível sua utilização quando comparado ao nióbio ou ao titânio como elemento microligante em aços de médio carbono. Ainda, para peças forjadas a quente, seus estudos provaram que a solubilidade do vanádio na austenita permite o uso de temperaturas baixas de aquecimento, o que significa menores custos de produção.

A norma DIN EN 10267 representa as diversas classes de aços ferríticos-perlíticos microligados ao vanádio, para forjamento. Na Figura 2, podemos encontrar estas diferentes classes e sua composição química respectiva, destes materiais conhecidos globalmente. A seleção da classe, respectivamente com sua composição química, depende das propriedades mecânicas requeridas na aplicação final.

Figura 2 – Classes e composição química dos aços microligados ao vanádio

Grade	C	Si	Mn	P	S	V	N
19MnVS6	0.15/0.22	0.15/0.80	1.20/1.60	≤0.025	0.020/0.060	0.08/0.20	0.01/0.02
30MnVS6	0.26/0.33	0.15/0.80	1.20/1.60	≤0.025	0.020/0.060	0.08/0.20	0.01/0.02
38MnVS6	0.34/0.41	0.15/0.80	1.20/1.60	≤0.025	0.020/0.060	0.08/0.20	0.01/0.02
46MnVS6	0.42/0.49	0.15/0.80	1.20/1.60	≤0.025	0.020/0.060	0.08/0.20	0.01/0.02
46MnVS3	0.42/0.49	0.15/0.80	0.60/1.00	≤0.025	0.020/0.060	0.08/0.20	0.01/0.02

Fonte: Norma DIN EN 10267 de 1999

Para Milbourn (1996), o aumento nos teores de carbono (C) destes aços faz com que se obtenham maiores durezas. Já o elevado nível de manganês (Mn) é importante para se obter o

endurecimento por solução sólida e reduzir as temperaturas de transformação, o que promove uma combinação de resistência mecânica, dureza e ductilidade. O silício (Si) também é utilizado na maioria dos aços microligados para forjamento, aumentando a porção de ferrita, logo, também sua dureza. As adições de enxofre (S) são realizadas para melhorar a usinabilidade do material. Em alguns casos, também com a finalidade de aumentar a resistência ao desgaste do componente, o endurecimento por refinamento do grão pode ser obtido com pequenas adições de titânio (Ti), na faixa de 0,010 % a 0,015 %.

Segundo Campbell (2008), a resistência à fadiga é, geralmente, o critério de performance para peças automotivas forjadas, visto que, as fraturas por fadigas correspondem a 90 % das falhas mecânicas. As realizações de ensaios de fadiga em componentes automotivos demonstraram que os aços microligados ao vanádio possuem propriedades semelhantes aos aços carbono. Babu et. al (1986) conduziram testes de fadiga em ambos os aços microligados ao vanádio e aço carbono de alto teor, e constataram um comportamento mecânico semelhante.

Para peças semiacabadas, que necessitam ser usinadas após o forjamento, foi comprovado, por estudos de Ebrahimi e Moshksar (2009), que os aços microligados ao vanádio possuem melhor usinabilidade quando comparados aos aços carbono ligados de mesmos níveis de dureza, devido a sua estrutura ferrítica-perlítica. Este fato contribui significativamente para potenciais reduções de despesas, visto que, a usinagem é um processo de elevado custo, podendo alcançar até 50% do valor total da peça.

Já na indústria automotiva, segundo estudos de Erisir (2012), a utilização do aço 30MnVS6 microligado ao vanádio, para conformação de peças forjadas à quente, possibilitou reduzir o tempo de processamento dos componentes. Isto acontece porque a dureza e a resistência das peças forjadas com este material são obtidas através dos mecanismos de refinamento do grão e endurecimento por precipitação causada pelos elementos de liga, possibilitando desta forma, a eliminação do processo subsequente de tratamento térmico.

O aço 30MnVS6 é conhecido por ser um aço microligado ao vanádio de microestrutura ferrítica-perlítica, muito utilizado pela indústria de autopeças para fabricação componentes com limites de resistência mecânica que variam entre 800 e 1000 MPa. Segundo a norma alemã DIN EN 10267 (1999), seu teor de carbono deve variar de 0,26 % mínimo a 0,33 % máximo, e seu principal elemento de liga são vanádio, com teor mínimo de 0,08% e 0,2% máximo e manganês, com teor mínimo de 1,2% e máximo de 1,6%.

2.2 Mecanismos de Aumento de Resistência dos Aços

Para Gladman (1997), a elevação das propriedades mecânicas nos aços ARBL deve-se a cinco principais mecanismos de endurecimento, que podem atuar juntos ou separadamente, sendo eles:

1. refino do grão;
2. endurecimento por solução sólida;
3. trabalho a frio (encruamento);
4. precipitação;
5. transformação de fase.

Nas palavras de Callister (2011), todos estes mecanismos possuem o mesmo princípio que é a habilidade de aumentar a resistência aplicada requerida para iniciar a deformação plástica do material. Para metais monofásicos, refino do grão, endurecimento por solução sólida e trabalho a frio são mecanismos de aumento de resistência. Metais que contêm múltiplas fases, além dos três mecanismos citados anteriormente, podem endurecer por precipitação ou ainda por transformação de fase.

2.2.1 Endurecimento por Refino de Grão

Segundo Gladman (1997), em um material cristalino, os limites entre os grãos são regiões de energia mais elevada do que no seu próprio interior. Estas regiões, conhecidas como contorno de grão, podem ser de baixo ou alto ângulo, dependendo da orientação cristalográfica existente entre os grãos. Estes contornos de grão de alto ângulo são os de mais alta energia de superfície. Este fator faz com que nestas regiões se propiciem as reações no estado sólido, como a difusão, transformação de fase e reações por precipitação.

O tamanho de grão e, por consequência, a quantidade de contornos de grãos, influencia diretamente nas propriedades mecânicas do material analisado. Um material com granulação refinada tende a apresentar maior dureza e ser mais resistente mecanicamente do que um material que apresenta granulação grosseira, em função da maior área total de contornos de grão que dificulta o movimento das discordâncias.

Para os aços microligados, este é o mecanismo de endurecimento mais importante ao se definir processos metalúrgicos, pois é a única forma capaz de aumentar resistência aos esforços mecânicos e tenacidade simultaneamente. A Equação de Hall-Petch (1), descrita abaixo, mostra que a tensão de escoamento é inversamente proporcional a raiz quadrada do diâmetro do grão:

Equação 1 – Equação de Hall-Petch

$$\sigma_e = \sigma_0 + K_Y d^{-1/2} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_e =$ Tensão escoamento

$\sigma_0 =$ Tensão interna do material

$K_Y =$ Resistência ao movimento das discordâncias devido ao contorno de grão

$d =$ Diâmetro do grão

Segundo Callister (2011), ajustes nas taxas de solidificação a partir da fase líquida do ferro gusa, adições de elementos controladores de tamanho de grão (alumínio e o nióbio, por exemplo) ou a deformação plástica seguida de um tratamento térmico adequado são formas de controlar o tamanho do grão.

2.2.2 Endurecimento por Solução Sólida

Segundo Gorni (2009) o endurecimento por solução sólida é decorrente da presença de átomos de elementos de liga solubilizados no reticulado do elemento solvente, como o ferro. Com exceção do fósforo (P), todos os demais elementos ligantes provocam dilatação no reticulado. Para Callister (2011), este mecanismo de endurecimento pode se apresentar de duas formas: solução sólida substitucional ou solução sólida intersticial.

Dieter (1981) explica que, se os átomos de soluto e solvente são similares em tamanho, os átomos de soluto vão ocupar parte da rede cristalina do átomo solvente, dando origem à solução substitucional. Já, quando os átomos de soluto são menores que os átomos de solvente, estes vão ocupar posições intersticiais na rede cristalina do solvente. Estas interações do campo

de deformação da rede cristalina entre as discordâncias e estes átomos de impureza restringem o movimento das discordâncias, aumentando o endurecimento da liga.

2.2.3 Endurecimento por Trabalho a Frio

Segundo Dieter (1981) endurecimento por trabalho a frio, também conhecido como encruamento, pode ser definido como “o aumento da tensão necessária para produzir deslizamento de planos devido à deformação plástica prévia do material”. Ou seja, o encruamento é um fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e resistente mecanicamente quando submetido a uma deformação plástica.

Segundo Callister (2011), a maioria dos metais encrua a temperatura ambiente, e quando estes são deformados a frio, ocorre a formação de novas discordâncias, que interagem entre si e atuam como barreiras ao movimento das demais, criando o mecanismo de endurecimento. Os efeitos deste encruamento podem ser removidos mediante a tratamento térmico de recozimento.

2.2.4 Endurecimento por Precipitação

A precipitação de partículas de segunda fase¹ pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas de um metal. Segundo Callister (2011), quanto mais finos e uniformemente distribuídos forem os precipitados, maior será o incremento nas propriedades mecânicas do metal base. As obtenções destas características especificam acontece através de transformações de fases que são induzidas por tratamentos térmicos apropriados.

Segundo Militzer, et. al (1998), para que uma liga possa endurecer por precipitação, o seu diagrama de fases deve apresentar, obrigatoriamente, limite de solubilidade elevado do elemento soluto no elemento solvente. A sua composição química e o tempo de exposição à determinada temperatura são fundamentais para se avaliar a dissolução dos elementos microligantes e o seu comportamento.

¹ O endurecimento por segunda fase decorre da presença de mais de uma fase ou constituinte na microestrutura do aço, como a perlita, por exemplo.

Callister (2011) explica que para que ocorra o endurecimento por precipitação, a liga deve ser submetida aos tratamentos térmicos de solubilização, precipitação ou envelhecimento. Durante a solubilização, o metal é aquecido a uma temperatura superior a temperatura de austenitização, para que os átomos de soluto sejam dissolvidos na rede cristalina do metal base, formando uma solução sólida monofásica. Posteriormente, é realizado um resfriamento rápido, geralmente até a temperatura ambiente, para se obter uma estrutura homogênea. No entanto, a taxa de difusão do carbono é bem maior do que os elementos de liga, e por isso, para materiais que contêm pequenos percentuais de elementos formadores de carbonetos (elementos de liga), a sua dissolução durante a austenitização deve ser feita a temperatura e tempo controlados para que se garanta a estrutura homogênea.

O endurecimento por precipitação é muito comum nos aços microligados, em função das partículas extremamente finas que se precipitam na ferrita durante o resfriamento lento desses aços após laminação a quente ou tratamento térmico. A intensidade desse endurecimento depende das características das partículas precipitadas, tais como resistência mecânica, estrutura, espaçamento, tamanho, formato e distribuição. Para Callister (2011), a ordem desses procedimentos de endurecimento é fundamental para atingir as propriedades requeridas. Normalmente a liga é tratada termicamente por solubilização e então temperada. Na sequência tem-se um trabalho a frio e, finalmente, ocorre o tratamento térmico de endurecimento por precipitação. Nesta última etapa, uma pequena perda de resistência mecânica devido à recristalização é experimentada, e a possibilidade do surgimento de trincas devido à redução na ductilidade que acompanha o processo de endurecimento por precipitação pode ser observada. Um limitante das ligas submetidas a este processo de endurecimento é a sua temperatura máxima de serviço que não deve ultrapassar as temperaturas nas quais ocorreram o envelhecimento.

2.2.5 Endurecimento por Transformação de Fase

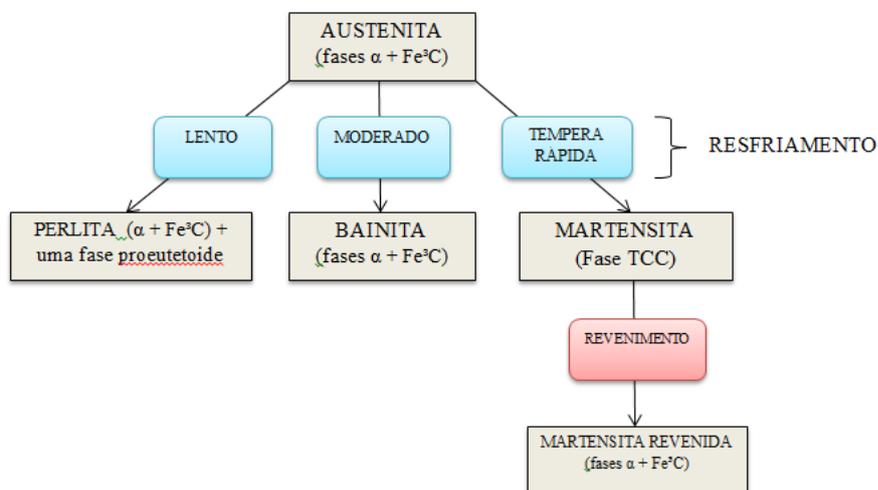
Miltzer, et. al (1998) afirma que o endurecimento por transformação de fase está associado à transformação da austenita, no resfriamento, para outras fases mais estáveis a temperaturas mais baixas. Isto ocorre mediante a utilização de tratamentos térmicos específicos. O tratamento térmico é o conjunto de operações que se realizam em condições controladas de temperatura, atmosfera, tempo e velocidades de aquecimento e esfriamento, com o objetivo de

alterar as propriedades dos aços. Esta etapa do processo não altera a composição química do material, somente ocorre uma reestruturação atômica da estrutura, com a finalidade de aumentar a resistência mecânica do mesmo. As propriedades alcançadas após a transformação de fase nos aços dependem diretamente das temperaturas em que ocorrem, o que resultará em diferentes microestruturas. Em geral, quanto mais baixa a temperatura de transformação, maior será a dureza obtida.

Segundo Elgert (2012), a dureza está ligada diretamente ao tamanho de grão formado na microestrutura. Um material de granulação fina apresenta uma maior dureza e uma maior resistência mecânica do que um material de granulação grosseira, em função da maior área total de contornos de grãos, o que dificulta o movimento das discordâncias. Quando o tratamento térmico é realizado, é possível controlar o tamanho de grão da microestrutura, onde este, quando aquecido a elevadas temperaturas cresce, e quando resfriado rapidamente, tem seu tamanho diminuído.

Callister (2011) afirma que, para aços-carbonos ligados e microligados, transformações de fase através de tratamentos térmicos de têmpera, composta pelas etapas de austenitização e resfriamento, possibilitam a obtenção de microestruturas e propriedades mecânicas mais resistentes. A Figura 3 resume as trajetórias das transformações que produzem essas diferentes microestruturas.

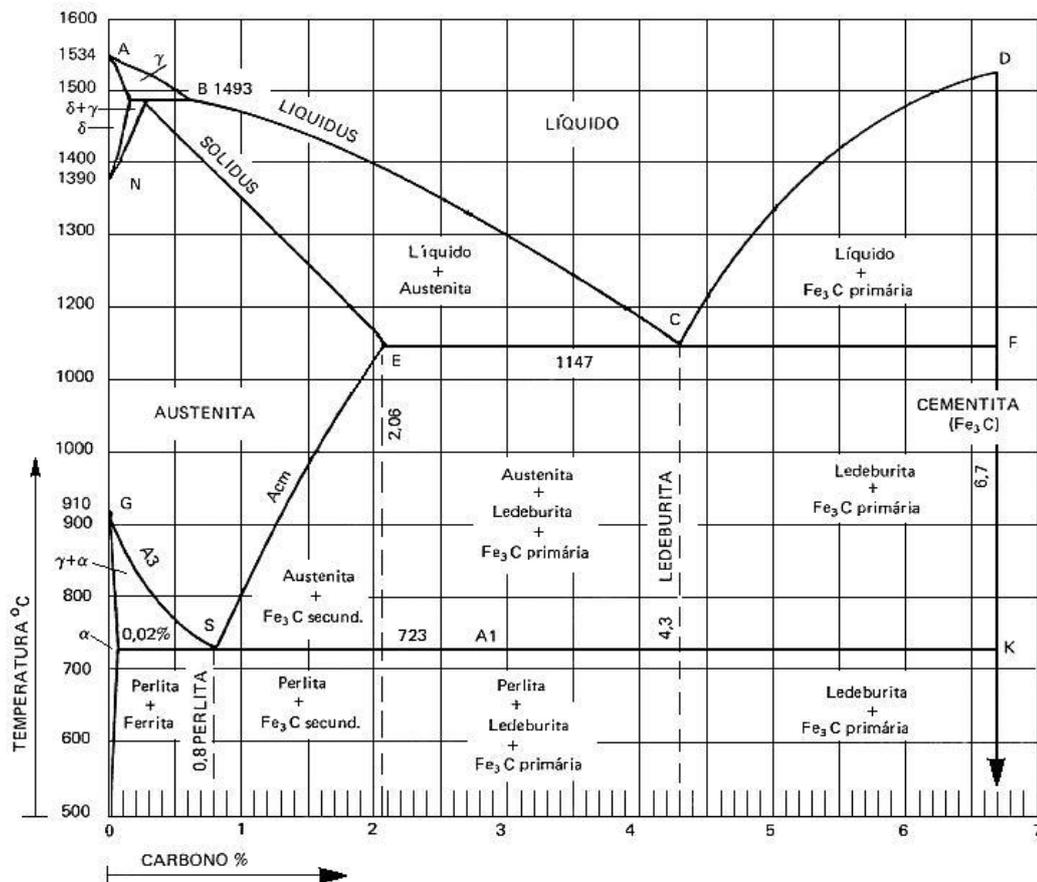
Figura 3 - Transformações de fase envolvendo a austenita



Fonte: Do autor, adaptado CALLISTER (2011).

Segundo Colpaert (1974), o processo de austenitização tem como objetivo principal a obtenção da estrutura austenítica. No diagrama de fases, ao ultrapassar a linha horizontal da temperatura de 723°C (zona crítica), para um aço eutotóide², a perlita existente no aço começa a se transformar em austenita, pois as lamelas de ferro alfa da perlita se transformam em ferro gama, pela difusão do carbono. Este processo é conhecido como nucleação, onde são necessários tempo e temperatura para que ocorra total homogeneização. A escolha da temperatura depende de dois fatores: o percentual de carbono e o percentual de elementos de liga. Na Figura 4, encontra-se o diagrama de equilíbrio do ferro-carbono, onde estas temperaturas para formação da austenita podem ser observadas, conforme o percentual de carbono do material.

Figura 4 – Diagrama de equilíbrio Fe-C



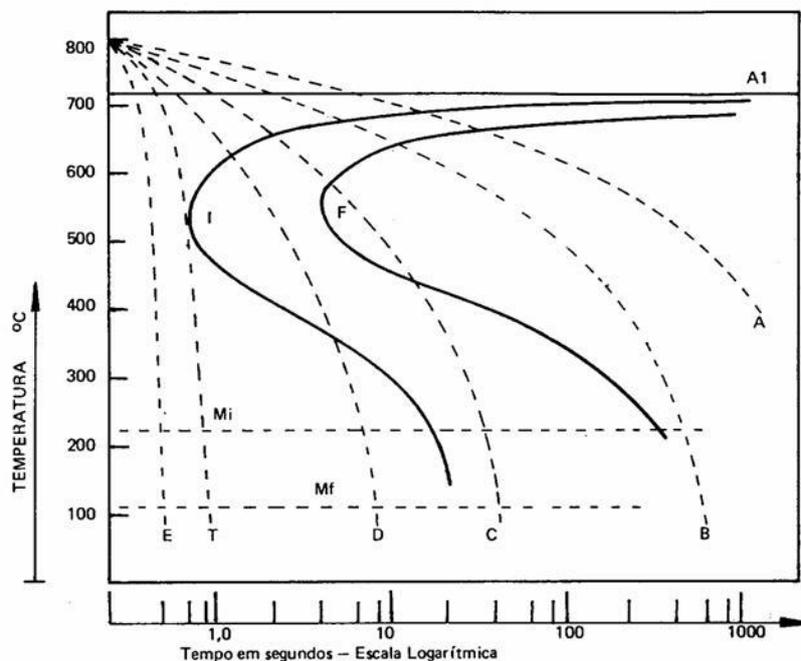
Fonte: Do autor, adaptado CALLISTER (2011).

² Aço eutotóide são aços constituídos de 0,76% de teor de carbono. CALLISTER (2011)

Chiaverini (2005) afirma que a taxa de difusão dos elementos de liga é menor que a do carbono, e por isso, para aços contendo pequenos percentuais de elementos formadores de carbonetos (elementos de liga), a homogeneidade da austenita não é garantida. Por isso, é de grande importância conhecer os elementos de liga presentes no aço, por exemplo, existem elementos estabilizadores, tais como níquel e o manganês, que diminuem a temperatura de austenitização da liga. Já outros elementos são estabilizadores da ferrita e aumentam a temperatura da austenitização da liga, como o cromo, vanádio e o titânio, por exemplo, visto que necessitam de maior temperatura para se dissolverem e então fornecerem o carbono necessário para formação da austenita.

À medida que toda perlita tenha se transformado em austenita, o processo de resfriamento prossegue. Para Chiaverini (2005), esta parte do processo é fundamental para determinar efetivamente a estrutura e as propriedades finais do aço. A análise da Figura 5 possibilita um entendimento das estruturas formadas através das taxas de resfriamento.

Figura 5 – Representação esquemática da superposição das curvas de esfriamento no diagrama de transformação para resfriamento contínuo



Fonte: Do autor, adaptado CHIAVERINI (2005).

Conforme a escolha da velocidade e meio de resfriamento, diferentes microestruturas começam a ser formadas. Um aço resfriado muito lentamente, no forno, por exemplo (curva A), começa a se transformar em perlita ao atingir o ponto Ai, e ao atingir o ponto Af é

completamente constituído de perlita. Essa perlita tem como característica, granulação grosseira e baixa dureza, logo aços esfriados nessa característica apresentarão esta microestrutura e propriedades. Com uma taxa de esfriamento mais rápida, ao ar por exemplo (curva B), o aço se transformará em perlita de granulação mais fina, com dureza mais elevada. Quando resfriado em óleo (curva C), ou seja, com uma taxa de resfriamento maior comparado ao ar, também obteremos perlita fina e dureza elevada, maior que as propriedades da curva B.

Com um resfriamento ainda mais rápido (curva D), verifica-se que o início da transformação se dá no ponto D_i e a velocidade de resfriamento agora é tal, que a curva de esfriamento não toca na curva de fim de transformação e, portanto, teremos uma microestrutura composta por perlita e martensita, pois não houve o tempo necessário para que toda austenita se transformasse em perlita.

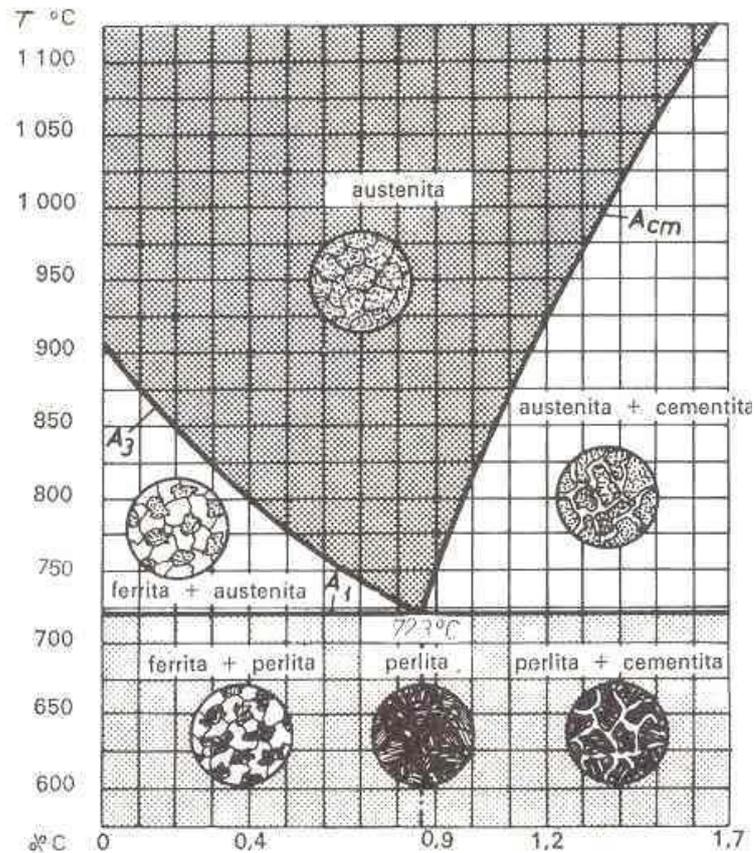
Quando o resfriamento for muito rápido (curva F), feito em água, por exemplo, observa-se que a curva de resfriamento não toca as curvas de transformação, de modo que toda austenita se transforma em martensita, resultando em uma microestrutura de propriedade extremamente dura, logo, os aços resfriados bruscamente são de maior dureza.

Segundo Callister (2011), todos os aços com teor de carbono entre 0,022 % e 0,76 % são chamados hipoeutetóides. Estes aços, quando esfriados lentamente a partir da zona austenítica até a temperatura ambiente, serão formados por ferrita e perlita. Quanto maior o teor de carbono, maior a quantidade de perlita e menor a de ferrita, e vice-versa.

Os aços com 0,76 % de carbono são chamados eutetóides, pois quando esfriados lentamente até a temperatura ambiente, a partir do campo austenítico, serão formados inteiramente por perlita.

Já os aços com teor de carbono entre 0,76 % e 2,14 % de carbono são chamados de hipereutetóides. Estes aços, quando esfriados lentamente a partir da zona austenítica até a temperatura ambiente, serão formados por perlita e cementita. A Figura 6 ilustra as transformações para o diagrama de equilíbrio do ferro-carbono.

Figura 6 – Transformações para o diagrama de equilíbrio do Fe-C



Fonte: Do autor, adaptado CHIAVERINI (2005).

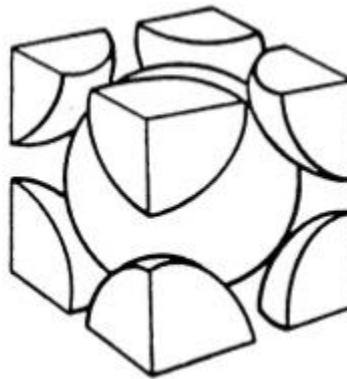
Ainda, Callister (2011) afirma que após o tratamento térmico de têmpera descrito acima pela austenitização e o resfriamento, deve-se acompanhar um tratamento térmico de revenimento, que consiste no aquecimento do aço a temperaturas abaixo do limite inferior da zona crítica, por determinado tempo, com a finalidade de aliviar ou até mesmo remover as tensões internas oriundas da têmpera, além de corrigir as excessivas durezas e fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque.

A martensita oriunda da têmpera é a que tem mais baixa tenacidade e por possuir um reticulado extremamente instável, é muito frágil. Em função disso é fundamental realizar o revenimento, obtendo uma estrutura chamada de martensita revenida, de estrutura estável. Para componentes automotivos de alta resistência mecânica, como o caso da maioria dos parafusos, por exemplo, a microestrutura desejada é a martensita revenida.

2.2.5.1 Relação entre Estrutura Cristalina e Microestrutura

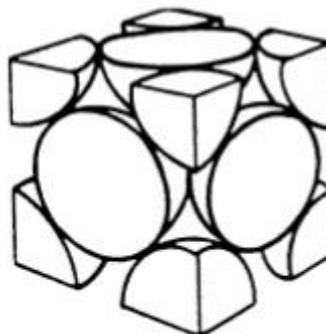
Segundo Callister (2011), as propriedades dos sólidos cristalinos dependem da estrutura cristalina do material, ou seja, da maneira segundo a qual os átomos, íons, ou moléculas estão arranjados no espaço. A estrutura cristalina encontrada em muitos metais, como os aços, por exemplo, possui uma célula unitária cúbica, com átomos localizados em todos os oito vértices e um único outro átomo localizado no centro do cubo. Essa estrutura, representada pela Figura 7, é conhecida por estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Uma outra estrutura cristalina metálica comumente encontrada também possui uma célula unitária com geometria cúbica, com átomos localizados em cada um dos vértices e nos centros de todas as faces do cubo. Esta estrutura é chamada de estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e está representada na Figura 8.

Figura 7 – Estrutura Cristalina Cúbica de Corpo Centrado



Fonte: Do autor, adaptado CALLISTER (2011).

Figura 8 – Estrutura Cristalina Cúbica de Face Centrada



Fonte: Do autor, adaptado CALLISTER (2011).

Devido à propriedade alotrópica³ do ferro, no tratamento térmico de têmpera (austenitização e resfriamento brusco) acontece uma reestruturação atômica e a mudança da microestrutura do material. Os aços antes de serem processados apresentam uma estrutura cristalina CCC e microestrutura variada conforme seu teor de carbono. Estes, quando austenitizados, se transformam em uma microestrutura austenítica de arranjo atômico CFC. Para BHADSHIA (2001), caso fosse resfriado lentamente, a estrutura cristalina voltaria ao seu arranjo original, porém, como o resfriamento acontece a uma taxa de velocidade extremamente rápida (resfriamento brusco), não há tempo suficiente para que a austenita se transforme em constituintes como a ferrita+perlita, perlita ou perlita+cementita, e a microestrutura obtida será a martensita que se apresenta sob a forma de agulhas e cristaliza-se na forma tetragonal de corpo centrado (TCC), devido a deformação que se produz na rede cristalina com a inserção dos átomos de carbono. Após o revenimento, espera-se que a microestrutura final seja a martensita revenida.

2.3 Fases e Constituintes dos Aços

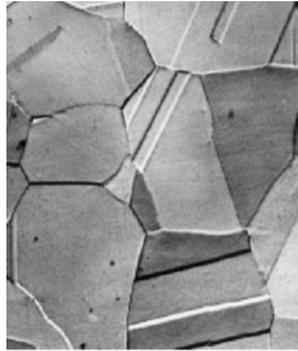
A análise da microestrutura dos aços revela vários constituintes e fases, cada um deles com características diferentes, detalhados na sequência.

2.3.1 Austenita

Segundo Callister (2011), austenita ou ferro gama (γ), é uma solução sólida, formada por cristais cúbicos de face centrada (CFC). Esta fase é não magnética e apenas é estável nos aços carbono acima da linha “A1” do diagrama de fases. Em certos tipos de aços-liga, como os aços inoxidáveis austeníticos, é estável também à temperatura ambiente. Possui uma dureza de 300 HB, uma resistência à tração de 100 Kgf/mm² e um alongamento de 30 %. A Figura 9 abaixo ilustra uma microestrutura austenítica.

³ Alotropia – é a propriedade que alguns elementos possuem de apresentarem duas ou mais estruturas cristalinas

Figura 9 – Fotomicrografia mostrando estrutura austenítica (ampliação 325 x).



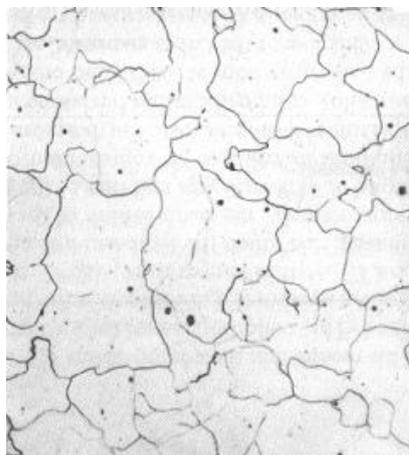
Fonte: Do autor, adaptado CALLISTER (2011).

Como visto anteriormente, o aquecimento nos tratamentos térmicos geralmente é feito até a temperatura em que o aço está austenitizado. A austenita é, portanto, o ponto de partida para as transformações que irão ocorrer durante o resfriamento.

2.3.2 Ferrita

Segundo Callister (2011), a ferrita é o ferro alfa (α) com pequenas quantidades de carbono em solução. Esta fase cristaliza no sistema cúbico de corpo centrado (CCC) e apresenta tipicamente baixa dureza (80 a 90 HB) e resistência à tração (30 Kgf/mm²), porém com elevado alongamento (35 %) e excelente resistência ao impacto. Após ataque químico por reativo adequado, apresenta-se ao microscópio como grãos brancos com finos contornos pretos, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Microestrutura da ferrita alfa α (ampliação 90 x)



Fonte: Do autor, adaptado CALLISTER (2011).

2.3.3 Cementita

De acordo com Chiaverini (2005), cementita é o nome dado ao carboneto de ferro, Fe_3C , com 6,67 % de C e 93,33 % de Fe. Apresenta-se sob a forma de finas lâminas no grão perlítico ou no contorno do mesmo. É muito dura e quebradiça, sendo nos aços de alto teor de carbono, responsável pela elevada dureza e resistência – até 700 HB (~60 HRC), assim como pela sua menor ductilidade. A Figura 11 apresenta a microestrutura da cementita de um aço carbono com teores maiores que 0,8 %.

Figura 11 - Microestrutura de um aço com concentração de carbono de 1,4 %. A fase cementita pode ser vista no contorno de grão e no interior do grão, em forma de lamelas (ampliação de 1000 x).

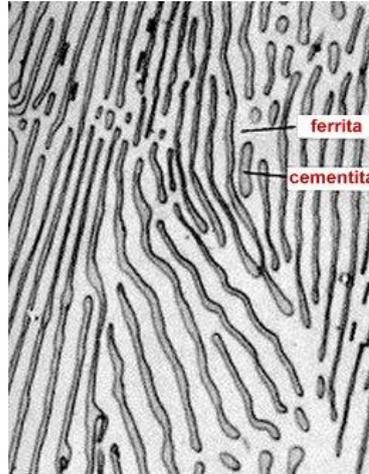


Fonte: Do autor, adaptado CALLISTER (2011).

2.3.4 Perlita

Para Chiaverini (2005), a perlita é um constituinte formado por lamelas alternadas de ferrita e cementita, composta por 88,5 % de ferrita e 11,5 % de cementita. Como é formada por lamelas moles de ferrita e duras de cementita, sua dureza é intermediária entre as duas, ou seja, em torno de 250 HB, o que resulta em uma resistência à tração em torno de 75 Kgf/mm^2 e um alongamento de 15 %. A fase perlita está representada na Figura 12.

Figura 12 – Fotomicrografia mostrando a estrutura lamelar da perlita (ampliação de 500 x).



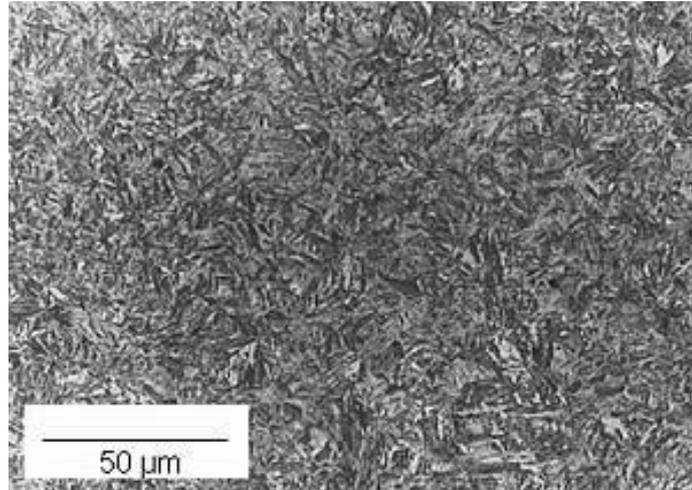
Fonte: Do autor, adaptado CHIAVERINI (2005).

2.3.5 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. Apresenta dois tipos de estrutura: a bainita superior de aspecto arborescente formada a 500 – 580 °C, composta por uma matriz ferrítica contendo carbonetos e a bainita inferior, formada a 250 – 400 °C, tem um aspecto similar a martensita e está constituída por agulhas alargadas de ferrita que contém placas finas de carboneto. A bainita tem dureza que vai de 40 a 60 HRC.

A estrutura bainítica pode ser vista na Figura 13, onde os grãos bainíticos passam do canto superior esquerdo para o canto inferior direito da figura, e este consiste em partículas alongadas e com formato de agulhas de cementita no interior de uma matriz ferrítica.

Figura 13 – Fotomicrografia mostrando estrutura bainítica.



Fonte: Do autor, adaptado CALLISTER (2011).

2.3.6 Martensita

Para Chiaverini (2005), a 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. A supersaturação de carbono no ferro alfa causa uma distorção da rede, a qual é responsável pela elevada dureza da martensita. Suas características mecânicas são resistência a tração entre 170 – 250 kg/mm², dureza HRC entre 50 – 60, alongamento de 0,5 % e é magnética e está representada na Figura 14.

Figura 14 – Fotomicrografia mostrando estrutura martensítica. É possível verificar claramente a estrutura tipicamente acicular desse constituinte (ampliação 1220 x)



Fonte: Do autor, adaptado CALLISTER (2011).

2.4 Influências dos Elementos de Liga nas Propriedades dos Aços

Além das impurezas normais (fósforo, enxofre, manganês, silício e alumínio) encontradas no aço, os elementos de liga também possuem função importantíssima para concedê-los propriedades mecânicas cada vez melhores. Segundo BAIN (1945), existem dois mecanismos fundamentais para realizar as melhorias nas propriedades dos aços: fazendo com que certas estruturas sejam possíveis ou alterando moderadamente as propriedades da estrutura.

Segundo Lagneborg, et. al (1999), a adição de elementos microligantes nos aços causa o aumento de resistência mecânica por dois mecanismos distintos já vistos anteriormente. São eles: o endurecimento por precipitação, onde durante o resfriamento ou revenimento surgem precipitados de carbonetos; ou então pelo mecanismo de refino de grão. Aços microligados ao vanádio possuem tendência muito forte à formação de carbonetos. Sua solubilidade na austenita é consideravelmente maior que a solubilidade dos carbonetos e nitretos de outros elementos microligantes, pois eles estão praticamente totalmente dissolvidos em baixas temperaturas de austenitização.

Chiaverini (2005) define as influências destes elementos de liga e das impurezas nas propriedades dos aços e as mesmas podem ser vistas abaixo. O Quadro 2 destaca os impactos que cada elemento de liga pode provocar nas propriedades mecânicas dos materiais metálicos.

1. ALUMÍNIO (Al): Restringe o crescimento de grão e é desoxidante.
2. BORO (B): Em teores muito baixos, facilita a têmpera do aço, aumentando a sua resistência.
3. CARBONO (C): É o elemento de liga mais importante nos aços e muito influente em sua composição. É ele que, ligado com outros elementos, permite uma deformação por forjamento ou laminação, alongamentos e soldabilidade não influenciando na resistência à corrosão com água, ácido e gases, formando compostos que permitem garantir resistência ao desgaste, dureza elevada, etc.
4. CHUMBO (Pb): Melhora a usinabilidade dos aços.
5. COBALTO (Co): Aumenta a resistência ao revenimento, ou seja, as ferramentas durante a usinagem aquecem e a presença do cobalto não permite que o calor deixe as durezas caírem, aumentando, portanto, sua eficiência.

6. COBRE (Cu): Aumenta de forma sensível a resistência à corrosão atmosférica dos aços, em adições de até 0,35%. Aumenta também a resistência à fadiga, mas reduz, de forma discreta, a ductilidade, a tenacidade e a soldabilidade.

7. CROMO (Cr): Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação, eleva a dureza dos aços e a resistência ao desgaste quando junto com carbono em concentrações elevadas. Melhora a resistência mecânica a altas temperaturas. Reduz a soldabilidade.

8. ENXOFRE (S): É extremamente prejudicial aos aços. Desfavorece a ductilidade, em especial o dobramento transversal, e reduz a soldabilidade. Fragiliza os aços durante o trabalho a quente. Em aços comuns são tolerados valores de até 0,05%. Em alguns aços é adicionado acima destes valores melhorando sua usinabilidade.

FÓSFORO (P): Sua presença nos aços está situada em valores de até 0,1%. Acima desse valor causa fragilidade com redução da resistência ao choque e da tenacidade. Melhora a usinabilidade.

MANGANÊS (Mn): A adição do manganês resulta num aumento da dureza do material e na resistência mecânica do aço, com menor prejuízo para a soldabilidade e para a ductilidade do aço. É desoxidante. O maior teor de Manganês no aço carbono é de 1,6%. Ajuda a diminuir o efeito nocivo do enxofre e aumenta a tenacidade dos aços, promovendo uma diminuição da transição dúctil frágil.

MOLIBDÊNIO (Mo): Ajuda a diminuir o crescimento do grão, aumenta a temperabilidade, eleva a dureza e a resistência a tração.

12. NIÓBIO (Nb): É um elemento muito interessante, quando se deseja elevada resistência mecânica e boa soldabilidade; teores baixíssimos deste elemento permitem aumentar o limite de resistência e, de forma notória, o limite de escoamento. É um componente quase obrigatório nos aços de alta resistência e baixa liga; além de não prejudicar a soldabilidade, permite a diminuição dos teores de carbono e de manganês, melhorando, portanto, a soldabilidade e a tenacidade. Entretanto, o seu efeito sobre a ductilidade é desfavorável.

13. NÍQUEL (Ni): Refina o grão. Diminui a velocidade de transformação na estrutura do aço. Aumento da resistência à tração. Aumento da ductilidade. Reduz a soldabilidade.

14. SILÍCIO (Si): É usado como desoxidante do aço. Favorece sensivelmente a resistência mecânica (limite de escoamento e de resistência a tração) e a resistência à corrosão, reduzindo, porém, a soldabilidade. Melhora a temperabilidade.

15. TITÂNIO (Ti): Aumenta o limite de resistência, a resistência à abrasão e melhora o desempenho do aço a temperaturas elevadas. É utilizado também quando se pretende evitar o envelhecimento precoce.

16. TUGSTÊNIO (W): Aumento da dureza (forma carbonetos muito duros). Aumento da resistência a altas temperaturas.

17. VANÁDIO (V): Eleva a temperatura de crescimento de grão. Aumenta a endurecibilidade.

Quadro 2 - Influência dos elementos de liga nas propriedades dos aços

PROPRIEDADE	ELEMENTO QUÍMICO											
	Si	Mn	Cr	Mo	Cu	S	P	Co	Ni	Al	W	V
Dureza	+	+	++	+	+		+	+	+		+	+
Resistência à Tração	+	+	++	+	+		+	+	+		+	+
Limite de Escoamento	++	+	++	+	++		+	+	+		+	+
Alongamento	-		-	-		-	-	-			-	
Estricção			-	-		-	-	-		-	-	
Resistência ao Impacto	-		-	+		-	---	-		-		+
Elasticidade	+++	+	+									+
Resistência Mecânica a Quente	+		+	++	+			++	+		+++	++
Temperabilidade	+	+	+++	++				--	++		++	++
Soldabilidade	-	+	-	--	-	-	-		-	-	--	-
Resistência ao Desgaste	---	--	+	++				+++	--		+++	++
Forjabilidade	-	+	-	-	---	---	-	-	-	--	--	+
Usinabilidade	-	-		-		+++	++		-		--	
Resistência à Corrosão			+++		+	-						+

Fonte: Do Autor, adaptado dos arquivos da Metalúrgica Hassmann S.A 2012 (2016).

Conforme pode ser observado, o sinal “+” no Quadro 2 significa que o elemento de liga causa o aumento na influência da propriedade mecânica. O sinal “-” indica a diminuição desta influência na determinada propriedade mecânica. Já vários sinais representam um efeito mais pronunciado de determinada propriedade, devido à adição do elemento de liga.

2.5 Conformação Mecânica dos Metais

Segundo Machado (2009), a conformação dos metais acontece quando um dado material de geometria simples é transformado em um componente útil através de um processo de fabricação. Este produto, na maioria das vezes, tem geometria complexa, com forma, tamanho, precisão, tolerâncias, aparência e propriedades bem definidas. Para BRESCIANI et al. (2011), entende-se o processo de conformação dos corpos metálicos como o processo de modificação da forma desse corpo metálico para outra forma definida. Conforme SCHAEFFER (2004), além das mudanças de dimensões, a conformação dos metais altera as propriedades do material em relação às anteriores ao seu processamento.

Os processos de conformação, que irão embasar o estudo comparativo realizado neste trabalho, podem ser divididos em dois grupos: processos mecânicos, nos quais as modificações de forma são provocadas pela aplicação de tensões externas, e as vezes em altas temperaturas, mas sem a liquefação do metal; e processos metalúrgicos, nos quais as modificações de forma podem estar relacionadas também as tensões externas, e as vezes em altas temperaturas, mas com liquefação do metal (como no processo de fundição) ou com a difusão de partículas metálicas (como no processo de sinterização).

Para Machado (2009) a conformação é especialmente atrativa quando o volume de produção for grande, de maneira que o custo do ferramental por unidade produzida possa ser mantido baixo e também, onde a geometria do componente seja, no máximo, moderadamente complexa. É por este motivo, que a maioria dos componentes da indústria automobilística, são manufaturados através de processos de conformação, como por exemplo, os elementos de fixação. Conforme Helman e Cetlin (2010), conformação mecânica define-se como uma operação onde se aplicam solicitações mecânicas em metais, que respondem com uma mudança permanente de dimensões. Bresciani et Al. (2011) afirma que “os processos mecânicos são constituídos pelos processos de conformação plástica, para os quais as tensões aplicadas são geralmente inferiores ao limite de resistência a ruptura do material”.

Na conformação mecânica é de especial interesse o estudo da deformação plástica dos metais. Este processo permite a fabricação de peças, no estado sólido, com características físicas controladas. Segundo Wickert (2011), a deformação permanente só ocorre quando a tensão aplicada excede o limite de elasticidade do material, e o mesmo começa a escoar, sofrendo uma alteração grande na deformação, não retornando ao seu estado inicial. De uma forma resumida,

os objetivos da conformação mecânica são a obtenção de produtos finais com especificação de dimensão e forma, propriedades mecânicas e condições superficiais.

Bresciani et. Al (2011) afirma que os processos de conformação plástica podem ser classificados em cinco grupos, de acordo com o tipo de esforço predominante: processos de conformação por compressão direta, onde predomina a sollicitação externa por compressão sobre a peça de trabalho, como nos processos de forjamento e laminação;

Processos de conformação por compressão indireta, onde as forças externas aplicadas sobre a peça podem ser tanto de tração como de compressão, como visto na trefilação e a extrusão, de tubos e fios, e a estampagem profunda de chapas;

Processos de conformação por tração, que tem como principal exemplo o estiramento de chapas, em que a peça toma a forma da matriz por meio da aplicação de forças de tração em suas extremidades;

Processos de conformação por cisalhamento, que envolvem forças cisalhantes suficientes ou não para romper o metal no seu plano de cisalhamento. Alguns exemplos deste tipo de processo são a torção de barras e o corte de chapas;

Processos de conformação por flexão, onde as modificações de forma são obtidas mediante a aplicação de um momento fletor. Este princípio é utilizado para dobrar barras, chapas e outros produtos.

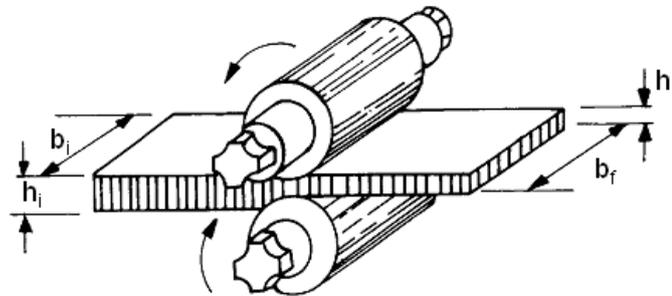
Para Schaeffer (2004), no que se refere à temperatura de trabalho, os processos de conformação podem ser classificados em processos com trabalho mecânico a frio e com trabalho mecânico a quente. Quando a temperatura de trabalho é maior do que a temperatura que provoca a recristalização do metal, o processo é designado como de trabalho a quente e, abaixo dessa temperatura, designado como de trabalho a frio. No trabalho mecânico a frio surge no metal o efeito de encruamento, ou seja, o aumento da resistência mecânica com a deformação plástica. Já no trabalho mecânico a quente, o encruamento é eliminado pela recristalização do metal, visto que a deformação plástica é realizada numa faixa altíssima de temperatura, durante um determinado tempo.

2.5.1 Laminação

Para Machado (2009), a laminação é um processo de conformação mecânica no qual o material é forçado a passar entre dois cilindros, girando em sentidos opostos, com praticamente a mesma velocidade superficial e separados entre si de uma distância menor que o valor da espessura inicial do material a ser deformado.

Schaeffer (2004), explica que a deformação plástica é provocada pela pressão dos cilindros sobre o material, o que resulta na redução de sua secção transversal e no aumento do seu comprimento e largura. A Figura 15 ilustra o processo de laminação de uma chapa.

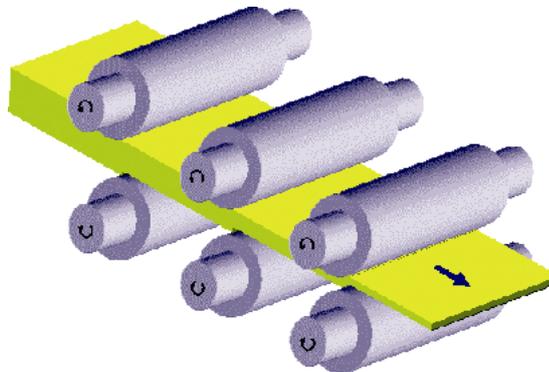
Figura 15 – Laminação



Fonte: Do autor, adaptado MACHADO (2009).

Helmann e Cetlin (2010), afirmam que durante a laminação, raramente passa-se o material apenas uma vez entre os cilindros de laminação, pois normalmente, se almeja uma redução de área que não pode ser alcançada em um só passe. A distância entre os cilindros deve diminuir conforme se aumenta os números de passes, a fim de alcançar menores diâmetros do material. A Figura 16 representa um esquema de representação de um trem contínuo de laminação.

Figura 16 – Esquema de representação de trem contínuo de laminação



Fonte: Do autor, adaptado MACHADO (2009).

A passagem da peça pelos cilindros ocorre através da ação da força de atrito que atua na superfície de contato entre ambos. Fatores como coeficiente de atrito entre os materiais (peça e cilindros) e também a resistência a deformação plástica do material da peça são essenciais para condução do processo de laminação. Os produtos obtidos por laminação são classificados em: planos (chapas, tiras); e não planos (barras, cantoneiras, trilhos).

Segundo Bresciani et. al (2011), na laminação à quente, a peça inicial é comumente um lingote fundido obtido de lingotamento convencional, ou uma placa ou tarugo processado previamente em lingotamento contínuo; a peça intermediária e final assume, após diversos passes pelos cilindros laminadores, as formas de perfis diversos (produtos não planos) ou de placas e chapas (produtos planos). A temperatura de trabalho se situa acima da temperatura de recristalização do metal da peça, a fim de reduzir a resistência a deformação plástica em cada passagem e permitir a recuperação da estrutura do metal, evitando o encruamento para os passes subsequentes.

Já na laminação a frio, a peça inicial para o processamento, nesse caso, é um produto semiacabado (chapa), previamente laminado a quente. Como a temperatura de trabalho (temperatura ambiente) situa-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação e um aumento dessa resistência com a deformação (encruamento), não permitindo, dessa forma, intensidades elevadas de redução de seção transversal.

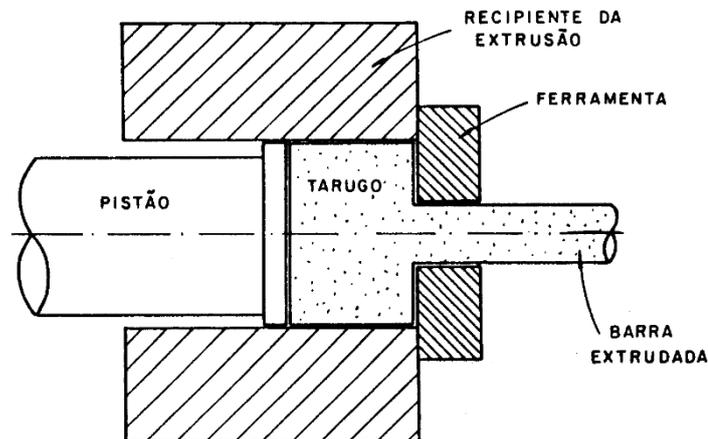
2.5.2 Extrusão

Bresciani et Al. (2011) define extrusão como sendo um processo de conformação plástica que consiste introduzir um tarugo ou lingote de seção circular, pela abertura existente no meio de uma ferramenta, por meio da ação de compressão de um pistão acionado pneumática ou hidráulicamente. Para Machado (2009), o esforço de compressão é exercido por meio de um êmbolo que empurra o metal contra uma matriz que possui um orifício com a forma do perfil que se deseja fabricar. A tensão aplicada, portanto, tem que superar em muito a tensão de escoamento do metal, para permitir um fluxo regular e contínuo de produto através da matriz.

Segundo Bresciani et al. (2011), o processo de extrusão pode ser classificado quanto ao tipo de movimento do material, em movimento direto e movimento inverso. A Figura 17 ilustra

o processo de extrusão direta, onde, como visto anteriormente, o tarugo é colocado no interior de um recipiente de extrusão e um pistão comprime esse material, forçando-o a fluir através de uma ou mais aberturas em uma matriz situada na extremidade oposta do recipiente.

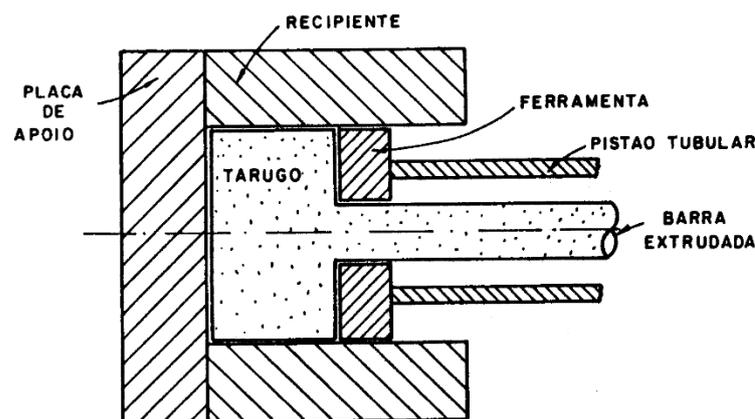
Figura 17 – Ilustração do processo de extrusão direta



Fonte: Do autor, adaptado BRESCIANI et Al. (2011)

Já na extrusão inversa, o pistão se mantém fixo, com a ferramenta colocada na sua extremidade, e o recipiente com o tarugo avança em sua direção, tornando inexistente o atrito entre o tarugo e o recipiente. A extrusão inversa está esquematizada na Figura 18.

Figura 18 – Ilustração do processo de extrusão inversa



Fonte: Do autor, adaptado BRESCIANI et Al. (2011)

A passagem do tarugo pela matriz, com furo de seção menor do que o material em processo provoca a deformação plástica, mas sem o efeito do encruamento, pois na maioria das vezes, o processo é conduzido a uma temperatura de trabalho acima da temperatura de recristalização do metal. Na extrusão a quente, obtemos grandes reduções de seção em uma só

etapa. Já na utilização da extrusão a frio, deve-se fazer pequenas reduções de seções em vários estágios.

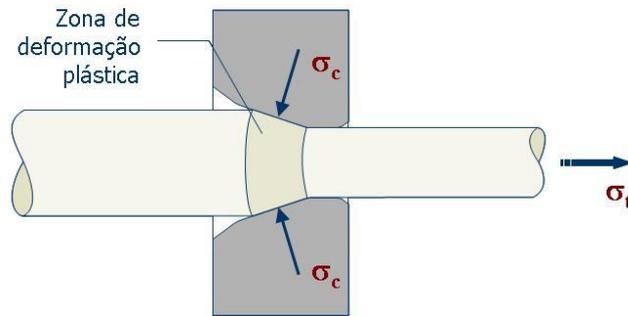
Segundo Schaeffer (2004), utiliza-se a extrusão, geralmente, em ligas não ferrosas, por causa das baixas resistências ao escoamento e das baixas temperaturas de extrusão, embora também possam ser extrudados alguns aços comuns e inoxidáveis. Por este motivo, para materiais não ferrosos, é usual a utilização do processo de extrusão, ao invés do processo de laminação, para a obtenção dos perfis de forma variada, apesar da limitação do comprimento do produto obtido. A extrusão, nesse caso, permite ainda obter um produto mais homogêneo em sua estrutura e dimensões.

2.5.3 Trefilação

Helmann e Cetlin (2010) afirmam que o processo de trefilação consiste em forçar a passagem de uma barra através de uma fiação mediante a aplicação de uma força de tração a saída desta fiação. Para Schaeffer (2004), a trefilação é um processo em que se obtêm produtos com seções de geometrias diversas pela tração desses produtos por uma matriz (denominada fiação) que define o perfil do trefilado. Machado (2009) explica que como a seção transversal do orifício da fiação é sempre menor que a da peça trabalhada, o processo ocasiona uma redução em área e um aumento no comprimento.

Devido a operação ser comumente realizada a frio, ocorre o encruamento com alteração das propriedades mecânicas do material do fio (redução da ductilidade e aumento da resistência mecânica). Por isso, quando temos uma grande redução de diâmetro, o recozimento intermediário é necessário, pois a queda de ductilidade associada ao aumento da resistência provoca a perda da característica de conformabilidade do material. A Figura 19 mostra o processo de trefilação de um arame, onde as forças de tração e de compressão estão representadas.

Figura 19 – Tensões de tração (σ_t) e de compressão (σ_c) aplicadas na trefilação

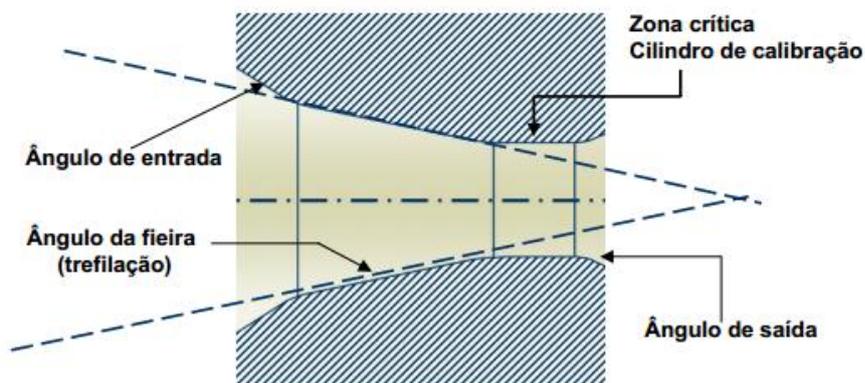


Fonte: Do autor, adaptado MACHADO (2009)

Para iniciar o processo de trefilação, o material a ser processado deve ser apontado e inserido através da fieira, sendo, em seguida preso por garras de tração, usualmente impulsionadas pelo sistema de corrente sem fim. Helmann e Cetlin (2010)

Para cada material há um perfil adequado de fieira, no que diz respeito ao ângulo de entrada, ao ângulo de trabalho, ao ângulo de saída e ao comprimento da zona cilíndrica. Segundo Machado (2009), comumente, para o ângulo do cone de trabalho, têm-se valores compreendidos entre 5° e 25° , onde o comprimento da parte cilíndrica varia de zero a dois diâmetros. A Figura 20 representa uma fieira e suas divisões.

Figura 20 – Ângulos e regiões de uma fieira por trefilação



Fonte: Do autor, adaptado MACHADO (2009)

A característica de cada material de transmitir, com mais ou menos facilidade por toda a seção, o efeito da resistência aos esforços cisalhantes que produz a deformação a frio (trabalho redundante), está associado à diferença entre os ângulos de fieiras empregadas para diferentes

materiais. Em geral, quanto mais dúctil for o material, maior pode ser o ângulo da fieira. Por outro lado, o comprimento da zona cilíndrica é dependente das condições de atrito entre o metal e a fieira.

2.5.4 Estampagem

Segundo Daleffe (2008), a estampagem compreende todas operações executadas em prensas, sobre chapas, que incluam operações de corte e conformação. O processo de conformação normalmente vem depois de um corte ou cisalhamento e a conformação da peça ocorre através de uma matriz e uma punção de estampagem.

De acordo com a norma DIN 8580:2003, os processos de estampagem podem ser classificados em dois grupos: ao grupo principal de conformação, que pertencem todos os processos de alteração de forma geométrica do material ou peça sem adicionar ou separa material; ou ao grupo principal dos processos de separação, onde pertencem os processos de corte, como o cisalhamento.

Schaeffer (2004) explica que existem muitos processos de estampagem de chapas, porém todos com mesmo objetivo de deformá-las, tornando-as um produto de aplicação industrial. Exemplos mais comuns de estampagem de chapas são o embutimento, o estiramento e o dobramento.

Daleffe (2008) caracteriza o processo de embutimento como “uma operação de estampagem onde uma chapa inicialmente plana, é transformada em um corpo oco sem que haja aparecimento de rugas e trincas”. Para que isso seja possível, utilizam-se ferramentas chamadas de estampos, que são constituídos por uma matriz, um punção e um sujeitador chamado de prensa-chapa, utilizado para evitar o aparecimento de rugas durante o processo.

Neste processo, o punção obriga a chapa a penetrar na matriz devido a ação da força de repuxo, que faz com que o material flua para dentro da matriz, configurando as paredes laterais da peça. Os esforços predominantes nas deformações são ambos de tração e compressão.

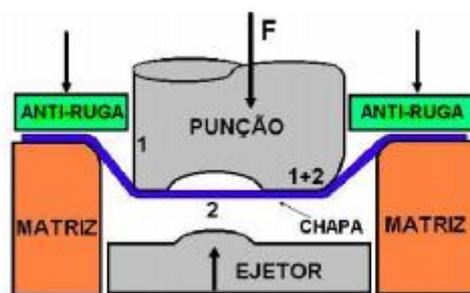
Já no processo de estiramento, para Schaeffer (2004), as forças de tração são as predominantes da operação, de modo a esticar o material sobre uma matriz. O equipamento de

estiramento é composto basicamente por um pistão hidráulico, que tem a função de movimentar o punção, e duas garras móveis ou fixas, que prendem as extremidades da chapa.

O limite de conformação no estiramento ocorre antes da redução das dimensões da seção transversal, provocadas pelas cargas de tração do processo, ou seja, antes da estricção do material.

A Figura 21 ilustra o processo de estampagem por embutimento.

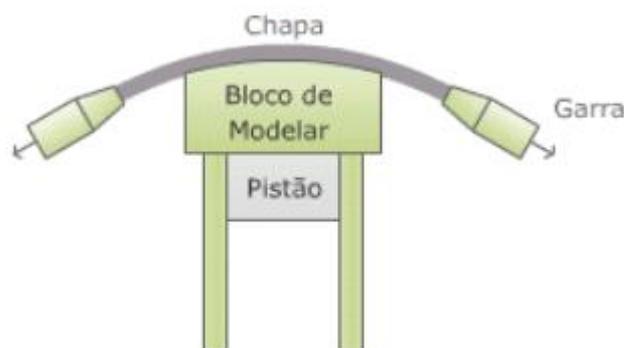
Figura 21 – Estampagem de chapas por embutimento



Fonte: Do autor, adaptado DALEFFE (2008)

A Figura 22 ilustra o processo de estampagem por estiramento.

Figura 22 – Estampagem de chapas por estiramento



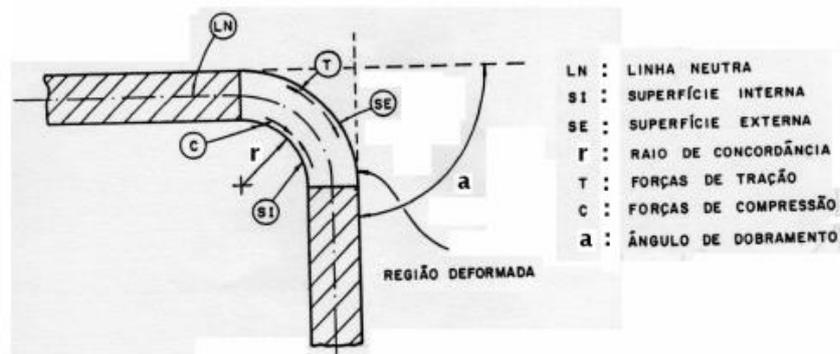
Fonte: Do autor, adaptado DALEFFE (2008)

Bresciani et. Al (2011) explica que no dobramento de uma chapa, os esforços são aplicados em duas direções opostas para provocar a flexão e a deformação plástica do material, mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em ângulo, e formando, na junção, um raio de concordância.

É nesse raio de concordância entre as duas superfícies, que os esforços se concentram, sendo na parte interna os de compressão, e na parte externa, os esforços de tração.

A Figura 23 ilustra o processo de dobramento.

Figura 23 – Estampagem de chapas por dobramento



Fonte: Do autor, adaptado BRESCIANI et. Al (2011)

2.5.5 Forjamento

Para Bresciani et. al (2011) forjamento é o processo de conformação por meio do qual se obtém a forma desejada da peça por martelamento ou aplicação gradativa de uma pressão. Helman e Cetlin (2010) abordam o forjamento de um material como sendo a mais antiga das conformações mecânicas, praticadas por ferreiros com martelos e bigornas, consistindo em deformar o material por martelamento ou prensagem. Já Machado (2009) afirma que o forjamento é um processo de conformação no qual modificam-se a geometria, as dimensões e as propriedades mecânicas de um corpo metálico pela ação de tensões compressivas diretas.

Existem duas denominações principais de equipamentos de forjamento: os martelos e as matrizes; os martelos provocam deformação do metal por impacto e as matrizes, peças que entram em contato com o metal durante a operação e submetem-no a uma força de compressão em baixa velocidade. Pode-se classificar o processo de forjamento como forjamento livre, ou em matriz aberta, e forjamento em matriz fechada, conhecido apenas como forjamento em matriz.

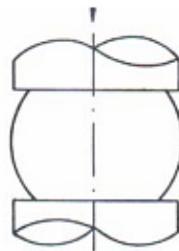
No processo de forjamento livre, a deformação ocorre por compressão direta e o material escoar no sentido de menor atrito, ou seja, perpendicularmente à direção de aplicação da força.

Neste processo, o material é deformado entre ferramentas planas ou de formato simples, com custo menos elevado, sendo assim, geralmente usado para grandes peças, como eixos de turbinas e virabrequins, ou, quando a quantidade a ser produzido é pequena.

Frequentemente o forjamento livre é usado para pré-conformar a peça para forjamento em matriz, conforme Bresciani et. al (2011). Já no forjamento em matriz fechada, para Helman e Cetlin (2010), “o metal deve adotar a forma previamente esculpida nas duas matrizes, havendo fortes restrições no espalhamento livre do material”. Pode-se encontrar no processo de forjamento em matriz fechada, a utilização de calhas, para evitar que a rebarba oriunda do processo seja muito extensa. Posteriormente, é necessária uma operação de rebarbação, para eliminar este excesso de material. Este processo é utilizado para conformação de peças complexas e de maiores volumes.

A Figura 24 ilustra o processo de forjamento em matriz aberta.

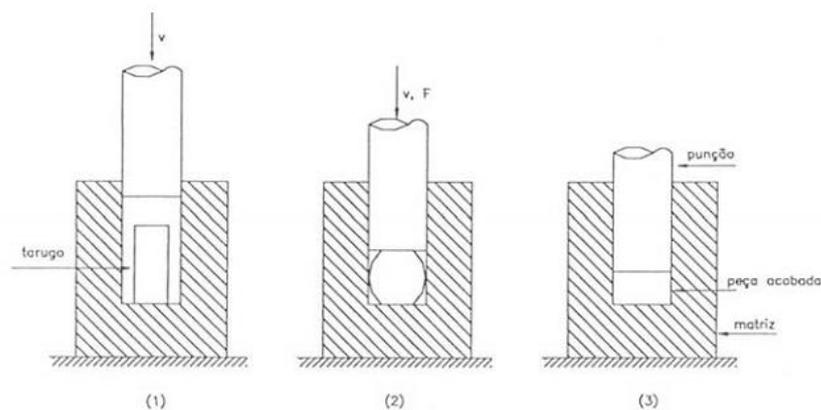
Figura 24 – Forjamento livre em matriz aberta



Fonte: Do autor, adaptado BRESCIANI et. Al (2011)

A Figura 25 ilustra o processo de forjamento em matriz fechada.

Figura 25 – Forjamento em matriz fechada



Fonte: Do autor, adaptado MACHADO (2009)

Ainda, o processo de forjamento normalmente é realizado a quente, embora algumas ligas permitam o forjamento a frio. O metal para ser forjado deve ser aquecido a uma temperatura tal que lhe confira elevada plasticidade para que sua forjabilidade aumente. Os metais não ferrosos com base em ligas de cobre e de alumínio são forjados nas temperaturas entre 300 e 800 °C, e os aços nas temperaturas entre 800 e 1100 °C, dependendo das composições químicas desses materiais, de acordo com Bresciani et. al (2011).

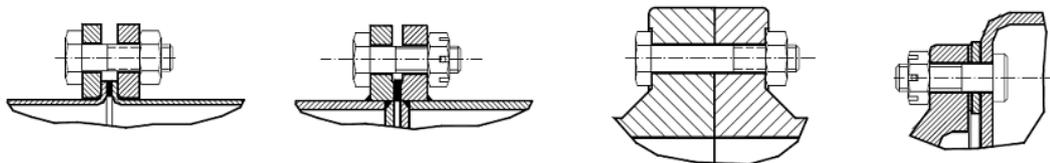
No forjamento a frio a deformação plástica de metais ocorre à temperatura ambiente, e o material é forçado, por esforços compressão, a fluir entre uma matriz e um martelo, resultando na obtenção de peças com forma e tolerâncias de precisão. É um método de conformação sem remoção do metal. Esta tecnologia já provou ser altamente econômica, principalmente em produções em grandes escalas, devido a alta velocidade de produção.

Segundo Helman e Cetlin (2010), o trabalho a frio gera o encruamento do metal e a deformação plástica produz também um aumento no número de discordâncias, que elevam o estado de tensão interna na rede cristalina. Como resultado temos o aumento de resistência e dureza e num decréscimo da ductilidade do material. Em virtude deste processo ser realizado a temperaturas ambientes, a tensão do limite de escoamento do material é elevada, exigindo aplicações de forças por parte das máquinas altíssimas

2.6 Parafusos

Segundo Shigley et. al (2005), os parafusos de roscas helicoidais foram uma das invenções mais importantes já feitas até hoje. Eles são conhecidos como elementos de fixação, empregados na união não permanente de peças, ou seja, em peças que podem ser facilmente montadas e desmontadas, bastando apenas, apertar ou desapertar os parafusos que as mantêm unidas. A Figura 26 ilustra diferentes uniões desmontáveis formadas com parafusos.

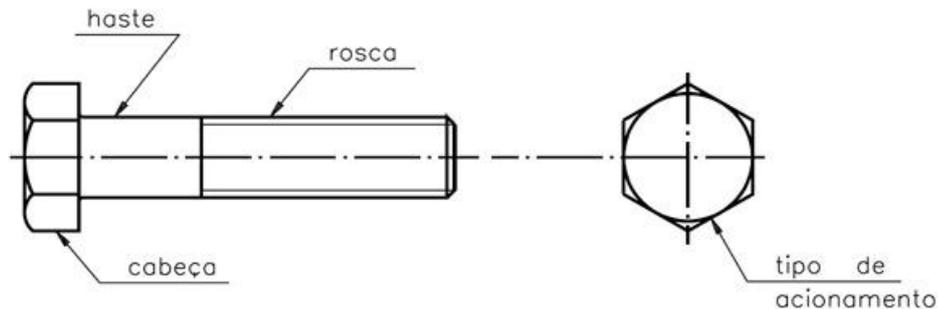
Figura 26 – Uniões formadas com parafusos



Fonte: Do autor, adaptado de Monteiro (2014).

Para Monteiro (2014), estes elementos de fixação podem ser compostos por cabeça e corpo e se diferenciam pelas dimensões de sua rosca, formatos de suas cabeças e pelo tipo de acionamento a ser exercido conforme o formato de sua chave. A Figura 27 ilustra um parafuso e suas definições.

Figura 27 – Ilustração de um parafuso



Fonte: Do autor, adaptado de ISO 4014:2011 (2016).

Na atualidade, segundo Milatias (2006), o aço é a matéria-prima utilizada em maior quantidade para a produção de parafusos. Entretanto, também é utilizado aço inoxidável, titânio, bronze e plástico, entre outros materiais, conforme a característica funcional que o parafuso possui. Para o presente trabalho, apenas parafusos em aço-carbono são de interesse de estudos.

Conforme Niemann (1971), os parafusos podem ser empregados em várias situações, sendo classificados em: parafusos de fixação, para junções desmontáveis; parafusos de proteção, para aplicação de tensores; parafusos obturadores, para tampar orifícios; parafusos de ajuste, para a eliminação de folgas ou a compensação de desgastes; parafusos micrométricos, para obter deslocamentos mínimos; parafusos de potência, para obter grandes forças axiais por meio de pequenas forças tangenciais; parafusos de movimento, para a transformação de movimentos rotativos em movimentos retilíneos; e parafusos diferenciais, para a obtenção de pequenos deslocamentos.

2.6.1 Tipos de Parafusos

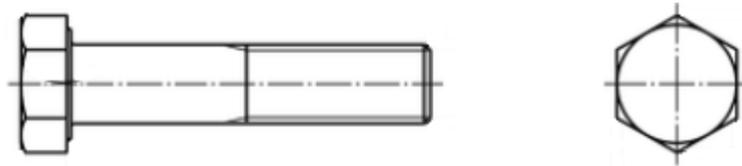
De forma mais usual, os parafusos também podem ser classificados conforme o formato da cabeça que possuem. Esta denominação também é conhecida por família e entre seus tipos, há o parafuso sextavado, o flangeado, o allen, o francês, o hexalobular, parafusos de roda,

rebites, prisioneiros, entre outros. Para o desenvolvimento do trabalho, apenas serão mencionados os parafusos sextavados.

2.6.1.1 Parafusos Sextavados

Segundo Fontana (2004) os parafusos de chave sextavada ou sextavados, são compostos por uma haste, a qual pode ser parcialmente ou totalmente roscadas, e uma chave em formato sextavado. Este tipo de parafuso, representado na Figura 28, é o mais utilizado no mercado, devido a sua simplicidade, à facilidade de fabricação e disponibilidade das ferramentas de aperto.

Figura 28 – Parafuso sextavado



Fonte: Do autor, adaptado de ISO 4014:2011 (2016).

As principais funções da cabeça dos parafusos consistem em permitir uma manipulação adequada para a chave de aperto e proporcionar uma superfície de apoio para o aperto adequado das juntas parafusadas.

2.6.2 Conformação de Parafusos

O principal método de conformação utilizado para fabricação de parafusos em larga escala é o forjamento, principalmente a frio. As vantagens como a maior produtividade e o aumento da resistência por encruamento, fazem com que o processo de usinagem fique em segundo plano quando comparados com o processo de forjamento.

As especificações dos aços para o forjamento a frio de parafusos são determinadas pela resistência mecânica do componente final e também pela capacidade do material de fluir na cavidade da ferramenta e adquirir a forma desejada, sem trincar ou gerar excessivo desgaste na ferramenta. Usualmente, a matéria prima para este processo são aços de baixo e médio teor de carbono ou baixa e média liga, fornecidos em bobinas de arame ou fio máquina, normalmente

esferoidizados⁴, conforme a conformabilidade exigida do material, ou até mesmo, menos usual, em formato de barras. A Figura 29 ilustra as bobinas ou rolos de arame, utilizado para conformação dos parafusos.

Figura 29 – Bobinas ou rolos de arame para conformação de parafusos

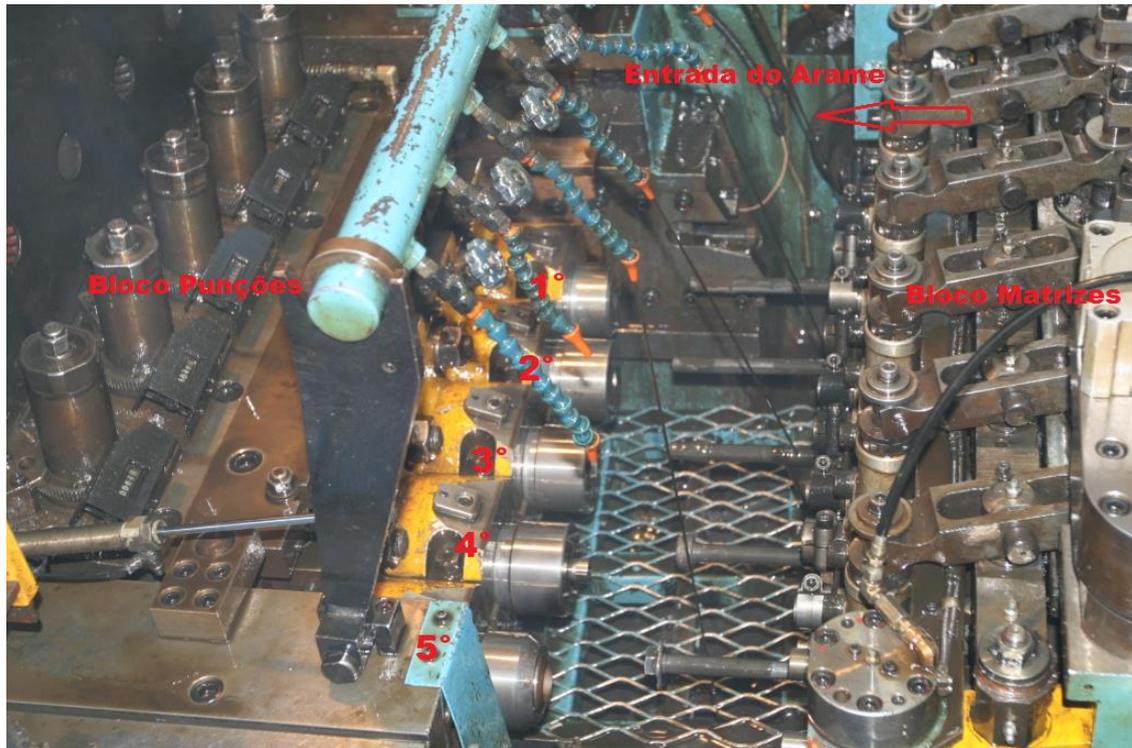


Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2011).

As máquinas utilizadas para este o processo de conformação são prensas horizontais ou verticais, de múltiplos estágios, podendo ou não ter um pré-aquecimento do material para melhor trabalhabilidade do mesmo. As matrizes são sólidas e incorporam todas as etapas de fabricação do parafuso. Em geral, os processos de conformação destes elementos de fixação variam de quatro a cinco estágios, isto é, pré-conformações até a obtenção do formato final da peça. Cada pré-conformação gera uma pré-forma, que passa para o estágio seguinte até atingir o formato final desejado. A Figura 30 ilustra a parte interna de uma prensa horizontal de cinco estágios, onde ao lado esquerdo da figura estão fixadas as punções, que empurram o material para dentro das matrizes, estas localizadas ao lado direito.

⁴ Também conhecida como coalescimento, a esferoidização é um tratamento térmico de recozimento, que tem como finalidade a obtenção de carbonetos na forma esferoidal. Utiliza-se para produtos que necessitem de dureza baixíssima para poderem ser deformados plasticamente. CALLISTER (2011).

Figura 30 – Prensa horizontal de cinco estágios para conformação de parafusos



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

O processo se inicia com o endireitamento⁵ e corte da matéria prima. O comprimento da peça e formato da cabeça do elemento de fixação é fundamental para definição do tamanho do tarugo utilizado. É no primeiro estágio da prensa de estampagem que teremos a primeira pré conformação do material. Um bloco de punções ou martelos empurra o blank⁶ para dentro de uma matriz, onde por esforços de compressão, o material flui e concede um formato cônico a peça. No segundo estágio, pelo mesmo método, temos a formação da cabeça do parafuso, geralmente de formato circular. No terceiro estágio ocorre a extrusão da matéria prima, onde parte do diâmetro é reduzido para que posteriormente seja laminada a rosca do parafuso. Ainda neste estágio, dependendo da família de parafusos em questão, ocorre a conformação parcial da chave. No quarto estágio, podemos ter ou não, o recorte do excesso de material, para que a chave adquira seu formato final.

Para fabricação de peças complexas, com formatos especiais, prensas de cinco, seis ou até mesmo sete estágios podem ser utilizadas. Após o forjamento do parafuso, o mesmo segue

⁵ Consiste em provocar pequenas deformações plásticas no material, através de flexões alternadas em roletes dispostos nos planos verticais e horizontais.

⁶ Blank é uma peça inacabada de metal que foi forjada a partir de um grande pedaço de material. O blank requer modelação posterior por ferramentas ou máquinas para ser transformado em diversos produtos.

para operação de apontamento, onde um chanfro de entrada de rosca é usinado para facilitar a montagem do componente na contra peça⁷. Posteriormente, a rosca é laminada. Na Figura 31, é possível visualizar as etapas de conformação.

Figura 31 – Etapas do forjamento a frio de parafusos



Fonte: Do autor, adaptado dos arquivos da Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Para se evitar defeitos de projeto, é importante se ter um conhecimento profundo da distribuição de tensão gerada na estampagem, do comportamento mecânico dos materiais, e das condições dos equipamentos de conformação. Os ajustes do parâmetro de estampagem, muitas vezes são feitos por tentativa e erro, o que causa um grande prejuízo de tempo e material. Deste modo, a simulação numérica⁸ pode ser utilizada para otimizar todas as fases do processo, com uma grande economia de tempo e redução de custos.

Após a conformação, os parafusos de altas classes de resistência mecânica seguem para o processo de tratamento térmico de tempera e revenimento.

2.6.3 Propriedades Mecânicas

Os parafusos são designados por classes de resistência. Tratando-se das normas internacionais, existem duas principais que regem os requisitos mecânicos a serem atendidos

⁷ Peça na qual o parafuso é rosqueado.

⁸ Simulação Numérica – São simulações de processos realizadas por projetistas através de softwares de simulação que tem como objetivo buscar o conhecimento de algum comportamento real, diminuindo, desta forma, as inconsistências entre produto idealizado e realidade do produto final.

pelos parafusos e são elas a norma SAE J429 para o caso de parafusos unificados (polegada), e a norma ISO 898-1, quando forem parafusos milimétricos.

Para o presente trabalho, apenas parafusos milimétricos foram utilizados, portanto é na norma ISO 898-1 que o estudo foi baseado. As propriedades físicas e mecânicas estabelecidas para cada classe de resistência estão descritas na Figura 32.

Figura 32 – Propriedades físicas e mecânicas

N°	Propriedade Mecânica e Física	Classes de Resistencia										
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9	
							d≤16mm	d>16mm				
1	Resistencia Nominal a Tração em N/mm ² (Rm)	Nom.	400		500		600	800		900	1000	1200
		Mín.	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220
2	Limite Elasticidade 0,2 % em N/mm ² (Rp0,2)	Nom.	-	-	-	-	-	640	640	720	900	1080
		Mín.	-	-	-	-	-	640	660	720	940	1100
3	Tensão sobre Carga de Ensaio em N/mm ² (Sp)	-	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970
	Razão Sp(nom)/Rp0,2mín	-	0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88
4	Alongamento Após Ruptura de Peças Testadas em % (A)	Mín.	22	-	20	-	-	12	12	10	9	8
5	Estricção Após Ruptura de Peças Testadas em % (Z)	Mín.	-					52		48	48	44
6	Resistência de Impacto na Cabeça	-	Sem Ruptura									
7	Dureza Vickers HV F ≥ 98 N	Mín.	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385
		Máx.	220					250	320	335	360	380
8	Dureza Brinell, HBW F = 30 D ²	Mín.	114	124	147	152	181	245	250	286	316	380
		Máx.	209					238	316	331	355	375
9	Dureza Rockwell, HRB	Mín.	67	71	79	82	89	-	-	-	-	-
		Máx.	95					99,5	-	-	-	-
10	Dureza Rockwell, HRB	Mín.	-					22	23	28	32	39
		Máx.	-					32	34	37	39	44
11	Dureza Superficial, HV 0,3	Máx.	-					-		390		
12	Carbonetação Superficial, HV 0,3	Máx.	-					h				
13	Torque de Ruptura em Nm (Mb)	Mín.	-					Em acordo com ISO 898-7				
14	Resistência ao Impacto no corpo em J	Mín.	-	27	-	-	-	27	27	27	27	N/D
15	Integridade da Superfície	-	Em acordo com ISO 6157-1									ISO 6157-3
Legenda	h	A dureza superficial pode ser no máx 30 HV acima do valor encontrado na dureza de núcleo, ambas medidas em HV0,3										

Fonte: Do autor, adaptado de ISO 898-1:2013 (2016)

A fim de garantir estas propriedades estabelecidas pela ISO 898-1, os parafusos de classes de resistência 8.8 ou superiores devem passar obrigatoriamente pelo tratamento térmico de têmpera e revenido, para que a microestrutura martensítica seja formada e as suas propriedades mecânicas sejam alcançadas. Durante este processo, a temperatura do revenimento é fundamental para atingir-se determinada classe. Por exemplo, para um mesmo material, podem-se obter diferentes classes de resistência variando apenas a temperatura de revenimento.

Parafusos que sofrem o processo de tratamento térmico são considerados fixadores de alta resistência mecânica, isto é, componentes que tendem a suportar cargas mecânicas mais

elevadas. A norma também estabelece limites de composição química para os materiais utilizados na fabricação de parafusos. Estes limites encontram-se registrados no Quadro 3.

Quadro 3 – Limites de composição química, materiais e tratamentos térmicos

Classe de Resistência	Material e tratamento térmico	Limites de Composição Química (%)				
		C		P	S	B
		mín.	máx.	máx.	máx.	máx.
4.6	Aço-carbono ou Aço-carbono com aditivos	—	0,55	0,05	0,06	Não Especificado
4.8						
5.6		0,13	0,55	0,05	0,06	
5.8		—	0,55	0,05	0,06	
6.8		0,15	0,55	0,05	0,06	
8.8	Aço-carbono com aditivos (Ex. B, Mn, ou Cr) temperado e revenido	0,15	0,40	0,025	0,025	0,003
	Aço-carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,025	0,025	
	Aço liga temperado e revenido	0,20	0,55	0,025	0,025	
9.8	Aço-carbono com aditivos (Ex. B, Mn, ou Cr) temperado e revenido	0,15	0,40	0,025	0,025	0,003
	Aço-carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,025	0,025	
	Aço liga temperado e revenido	0,20	0,55	0,025	0,025	
10.9	Aço-carbono com aditivos (Ex. B, Mn, ou Cr) temperado e revenido	0,20	0,55	0,025	0,025	0,003
	Aço-carbono temperado e revenido	0,25	0,55	0,025	0,025	
	Aço liga temperado e revenido	0,20	0,55	0,025	0,025	
12.9	Aço liga temperado e revenido	0,30	0,50	0,025	0,025	0,003

Fonte: Do autor, adaptado de ISO 898-1:2013 (2016)

Para Garcia et. Al (2015), são os ensaios mecânicos que permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços (tensões ou deformações).

Segundo a ISO 898-1:2013, para determinação das propriedades mecânicas dos parafusos conformados, uma série de ensaios devem ser realizados. Estes ensaios estão dispostos na Figura 33.

Figura 33 – Tabela de Testes

Item	Propriedade	Método de Teste	Item da Norma	Classe de resistência
				8.8,9.8,10.9,12.9
				$d \geq 3\text{mm}$ $l \geq 2,5d$ $b \geq 2,0d$
1	Resistência Nominal a Tração em N/mm ² (Rm)	Tração Oblíqua Ensaio de Tração	9.1 9.2	A
2	Tensão sobre Carga de Ensaio em N/mm ² (Sp)	Teste com Carga de Ensaio (Proof Load)	9.6	A
3	Alongamento Após Ruptura de Peças Testadas em % (A)	Ensaio de Tração em Parafusos Inteiros	9.3	AE if
	Resistência de Impacto na Cabeça	Teste de Impacto na Cabeça (Head Soundness) $d \leq 10\text{mm}$	9.8	AE
4	Dureza	Ensaio de Dureza	9.9	A
5	Dureza Superficial Máx.	Ensaio de Carbonetação	9.11	A
6	Descarbonetação			
7	Máx. Descarbonetação	Ensaio de Descarbonetação	9.10	A
8	Redução de Dureza após Retemperar	Re-têmpera	9.12	AE
9	Torque de Ruptura em Nm (Mb)	Teste de Torção	9.13	AE
10	Integridade da Superfície	Inspeção das Discontinuidades da Superfície	9.15	A
	Legenda	A - aplicável NA - não aplicável AE - aplicável quando especificado explicitamente i - Valores para classes de resistência 4.6, 5.6, 8.8 e 10.9 são dados no anexo C da norma f - Para $l \geq 2,7d$ e $b \geq 2,2d$ d - diâmetro nominal parafuso l - comprimento parafuso b - comprimento da rosca do parafuso		

Fonte: Do autor, adaptado de ISO 898-1:2013 (2016)

2.6.3.1 Ensaio de Tração

A principal designação de fixadores é feita pela sua classe de resistência e conforme pode ser visto na Figura 34 abaixo, quanto maior for a classe, maior a sua resistência à tração e dureza, porém menor sua resistência ao alongamento.

Figura 34 – Resistência a tração x alongamento após ruptura

Resistência Nominal à Tração $R_{m, nom}$ N/mm ²	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 200	1 400
30										
25										
22		4.6								
20			5.6							
18										
16										
14		4.8								
12							8.8			
10			5.8				9.8			
9								10.9		
8				6.8					12.9	

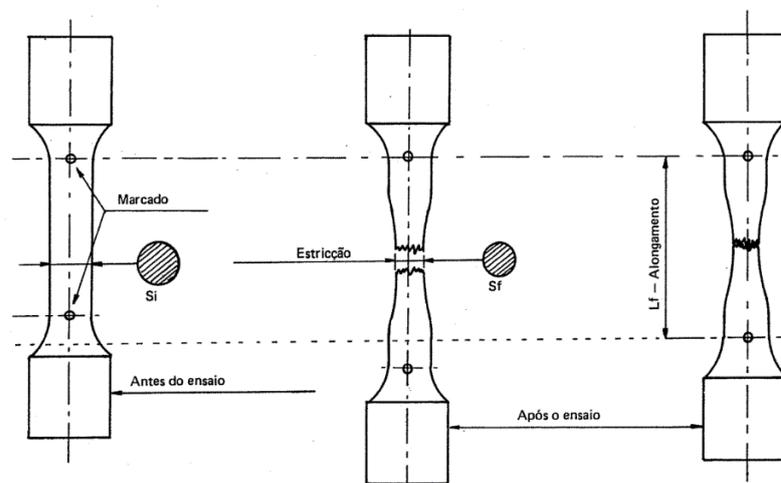
Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Segundo Garcia, et. al (2015), este ensaio consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova específico até sua ruptura. Mede-se a variação no comprimento em função da carga aplicada.

Através dos resultados do ensaio, obtém-se uma curva de tensão (σ) versus deformação (ϵ) do corpo de prova, de onde podem ser retirados dados quantitativos das características mecânicas do material analisado, como, limite de resistência à tração, limite de escoamento, parâmetros relativos à ductilidade (estricção ϕ e alongamento λ), entre outros.

Para execução deste teste, prepara-se um corpo de prova, conforme Figura 35.

Figura 35 – Representação do corpo de prova



Fonte: Do autor, adaptado GARCIA, et. Al (2015).

Segundo Garcia, et. Al (2015), o empescoamento, ou também conhecido como coeficiente de estrição, pode ser calculado através da diferença entre as seções iniciais e finais (após a ruptura) do corpo de prova, expressa em porcentagem da seção inicial. Este coeficiente está expresso na Equação 2 e serve como uma medida de ductilidade do material.

Equação 2 – Coeficiente de Estrição ou Redução de Área (φ)

$$\varphi = \left(\frac{S_o - S_f}{S_o} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

Onde:

φ – Coeficiente de estrição (%)

S_o – Seção transversal inicial da amostra (mm²)

S_f – Seção estrita (medida após a fratura) (mm²)

Ainda, o autor afirma que o alongamento também é uma medida da ductilidade ou plasticidade do material, e assim como a estrição, é a diferença entre o comprimento final medido após a fratura e o comprimento inicial do corpo de prova, também expresso por expressão matemática, como pode ser visto na Equação 3.

Equação 3 – Alongamento específico (δ)

$$\delta = \left(\frac{L_f - L_o}{L_o} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

δ – Alongamento Específico (%)

L_f – Comprimento Final (mm)

L_o – Comprimento Inicial (mm)

Para Callister (2011), o grau com que uma estrutura se deforma ou se esforça, depende da magnitude da tensão que lhe é imposta. Para a maioria dos metais que são submetidos a uma

tensão de tração em níveis relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais entre si, conhecidas pela relação da lei de Hooke (Equação 4).

Equação 4 – Lei de Hooke

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (4)$$

onde,

σ = *Tensão de engenharia*

E = *Módulo de elasticidade*

ε = *Deformação de engenharia*

A constante de proporcionalidade E é o módulo de elasticidade. Seus valores são tabelados, porém para o aço a magnitude desse módulo é de 207 GPa. O processo de deformação no qual a tensão e a deformação são proporcionais é chamado de deformação elástica, o que significa que quando a carga aplicada é liberada a peça retorna a sua forma original, não havendo deformação permanente.

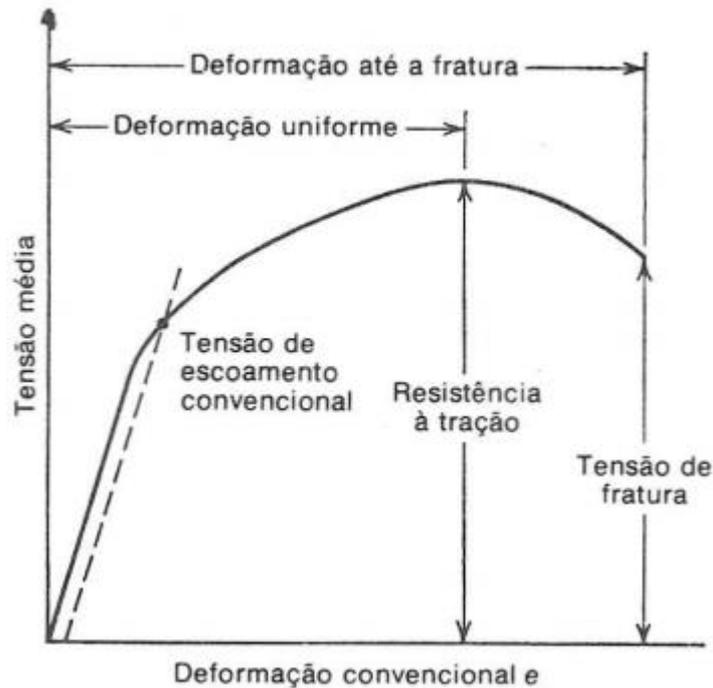
Ultrapassado o limite de proporcionalidade, tem lugar a fase plástica, na qual ocorrem deformações crescentes sem um aumento da tensão. O valor da tensão, nessa fase, é chamado limite de escoamento do aço. O limite de escoamento de um material é, portanto, a deformação permanente desse material sobre efeito de uma força imediatamente superior a da força máxima da zona elástica, e é calculado dividindo-se a carga máxima que o material suporta, antes de escoar, pela área de seção transversal inicial do corpo-de-prova.

Em materiais como os aços, o limite de escoamento é bem definido, pois a determinada tensão aplicada o material escoar, isto é, ocorre deformação plástica sem haver praticamente aumento da tensão. O limite de escoamento é a constante física mais importante no cálculo das estruturas de aço.

O limite de resistência à tração (Lrt) é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação de engenharia. Ela corresponde ao valor máximo que uma estrutura pode suportar quando submetida a esforços de tração. É a partir deste ponto, que começa a se formar o

estrangulamento ou pescoço (redução de secção), até a ruptura do corpo de prova. O diagrama de tensão versus deformação obtidos no ensaio de tração está representado na Figura 36 abaixo.

Figura 36 - Representação do diagrama tensão-deformação



Fonte: Do autor, adaptado DIETER, (1981).

2.6.3.2 Ensaio de Dureza

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito segue à resistência que, um material, quando pressionado por outro material, apresenta riscos ou formação de uma marca permanente.

O ensaio de dureza consiste na aplicação de uma carga na superfície do material empregando um penetrador padronizado, produzindo uma marca superficial ou impressão. A medida da dureza do material ou da dureza superficial é dada como função das características da marca da impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio realizado. Existem diferentes escalas para diferentes ensaios de dureza (Rockwell, Brinell, Vickers, Meyer, Shore, etc). A escala de cada ensaio depende das características do penetrador e da carga aplicada..

A área da marca superficial formada ou a sua profundidade são medidas e correlacionam um valor numérico que representa a dureza do material. Essa correlação é baseada na tensão que o penetrador necessita para vencer a resistência da superfície do material. Garcia et. Al (20015)

No trabalho serão utilizadas as durezas Rockwell e Vickers. Para Garcia, et. Al (2015), a dureza Rockwell é o método mais utilizado internacionalmente, e este tipo de ensaio de dureza caracteriza-se pela profundidade da impressão causada por um penetrador sob ação de carga aplicada em dois estágios (pré-carga e carga suplementar) como indicador de medida de dureza, e não há relação com a área da impressão. O penetrador pode ser de diamante esferocônico com ângulo de 120° e ponta arredondada (raio aproximadamente 0,2 mm), como pode ser uma esfera de aço endurecido ou carboneto de tungstênio, geralmente de diâmetro de 1,59 mm. A pré-carga utilizada comumente no ensaio é de 98 Newtons (N) (10 kgf) e carga ou força total de 589 N (60 kgf), 981 N (100 kgf) ou 1471 N (150 kgf). Para dureza superficial utilizam-se pré-carga de 29 N (3 kgf) e forças totais de 147 N (15 kgf), 294 N (30 kgf) e 441 N (45 kgf).

Já, segundo o autor, a dureza Vickers relaciona a carga aplicada à área superficial da impressão. O penetrador padronizado é uma pirâmide de diamante de base quadrada e com ângulo de 136° entre faces opostas. O ensaio é aplicável a todos os materiais metálicos com qualquer dureza, sendo por isso conhecido como ensaio universal. A forma de impressão depois de retirada a carga é um losango regular, cuja leitura das diagonais da impressão formada fornecem o valor de dureza Vickers. Para este método de ensaio, a carga pode variar de 0,0098 N a 980 N (1g à 100 kgf).

Segundo Callister (2011), cabe ressaltar, que os resultados de dureza podem variar em função de tratamentos aplicados nos materiais (como tratamento térmicos, tratamentos termoquímicos, mecânicos, entre outros), temperatura e condições da superfície. Por exemplo, a carbonetação e a descarbonetação são fenômenos que ocorrem durante o tratamento térmico dos aços, podendo ocasionar falhas durante a aplicação da peça final. Aquecer uma superfície de um metal contaminado com óleo ou aquecê-lo numa atmosfera rica em carbono pode produzir uma superfície com elevado teor de carbono e elevada dureza. Este fenômeno é conhecido como carbonetação. Já a descarbonetação pode ocorrer pelo aquecimento numa atmosfera oxidante. Assim o resultado é uma superfície com teor de carbono menor do que o do núcleo, com baixas propriedades de resistência e dureza. Para identificação destes fenômenos, mede-se a dureza superficial das amostras, conforme especifica a ISO 898-1, onde

a dureza superficial pode ser no máximo 30 Vickers acima do valor encontrado na dureza de núcleo, ambas medidas em HV0,3.

2.6.3.3 Ensaio de Fadiga

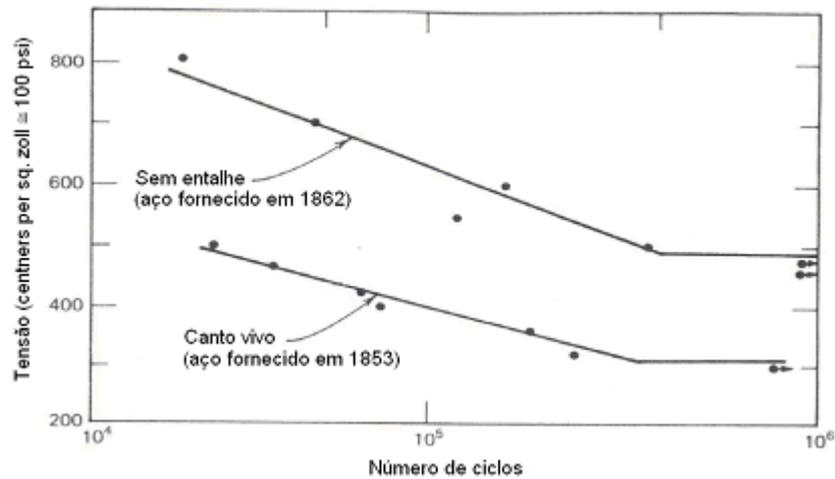
Segundo Dieter (1981), a fadiga é um fenômeno conhecido desde 1830, onde um metal sujeito a uma tensão repetitiva irá falhar em solicitações bastante inferiores ao limite de resistência do metal ou outros materiais, isto é, na região elástica. Esta ruptura que ocorre nestas condições dinâmicas é muito perigosa, pois pode ocorrer sem nenhuma indicação prévia evidente.

Para Garcia et. al (2015), três fatores básicos são necessários para causar a falha por fadiga. São eles: uma tensão de tração; uma variação ou flutuação ampla o bastante na tensão aplicada; e um número de ciclos suficiente com tensão aplicada. Além destas mais variáveis podem contribuir para o limite de resistência a fadiga de um material, como por exemplo, concentradores de tensão, corrosão, tensões residuais, tensões combinadas, entre outras.

É importante caracterizar os possíveis tipos de tensões cíclicas que provocam o fenômeno de fadiga, sendo que as tensões aplicadas podem ser axiais (tração e compressão), de flexão (dobramento) ou de torção (carga rotativa), permitindo, de modo geral, a existência de três diferentes formas de tensões variáveis com o tempo.

Os primeiros estudos sobre o comportamento de materiais metálicos a esforços alternados e repetitivos foram feitos por August Wöhler, em 1850. Sua pesquisa promoveu importantes informações, entre elas, a apresentação dos resultados do ensaio em um gráfico que relaciona a tensão versus o número de ciclos até a fratura. Este gráfico é conhecido por curva de Wöhler (Figura 37).

Figura 37 – Curvas S-N do estudo de Wöhler



Fonte: Do autor, adaptado DIETER (1981)

Como visto anteriormente, Shigley et. Al (2005) afirma que para aços, o limite à fadiga ocorre em algum ponto entre 10^6 e 10^7 ciclos, o que significa, que se o componente ultrapassar este número de ciclos, não irá falhar por este tipo de esforço.

Com relação à resistência a fadiga, não existe normas internacionais que especifiquem limites de resistência. O que acontece, é que para fixadores de aplicações críticas, onde ocorra alta vibração mecânica, como parafusos de motores ou suspensões, por exemplo, existem testes de controle para que estes componentes não venham falhar em campo.

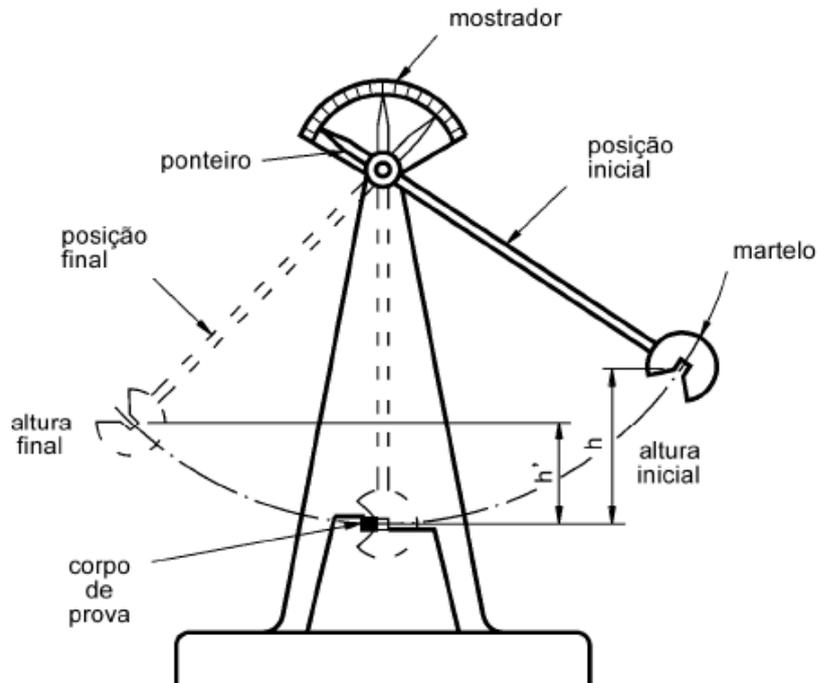
Segundo Garcia et. al (2015), a existência de tensões cíclicas ou flutuantes e o número de ciclos de aplicação da tensão suficientemente alto para que ocorram a formação e propagação de um trinca, são os principais fatores para que ocorra uma falha por fadiga. Segundo o autor, para os aços, o limite de resistência a fadiga está compreendido na faixa de 35 % a 65 % do limite de resistência a tração. Na prática, uma boa aproximação é considerar a razão entre o limite de resistência a fadiga e o limite de resistência à tração como 0,5.

2.6.3.4 Ensaio de Impacto

Segundo GARCIA et. al (2015), o comportamento dúctil-frágil dos materiais pode ser caracterizado pelo ensaio de impacto. A carga neste ensaio é aplicada na forma de esforços dinâmicos, e o impacto é obtido por meio da queda de um martelo ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar. As massas utilizadas nos ensaios são intercambiáveis,

possuem diferentes pesos e podem cair de alturas variadas. O resultado é representado por uma medida de energia absorvida pelo corpo de prova, ou seja, a tenacidade ao impacto. (Figura 38)

Figura 38 – Equipamento de ensaio

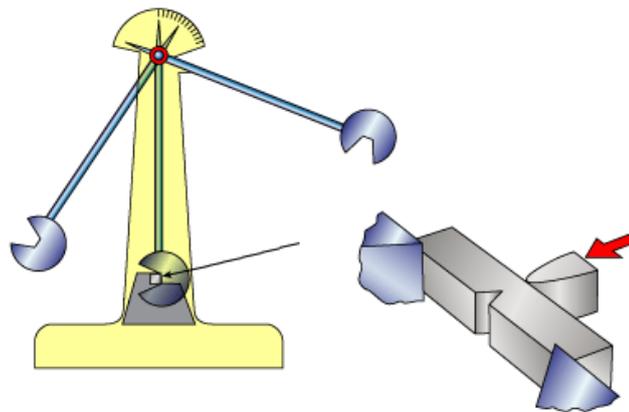


Fonte: Do autor, adaptado GARCIA, et. Al (2015).

Os ensaios denominados Charpy e Izod são os mais conhecidos e se diferenciam pela configuração geométrica do entalhe e pelo modo de fixação do corpo de prova na máquina (horizontal ou vertical). O ensaio de Charpy é mais popular nos Estados Unidos, e o Izod, na Europa. Para o presente trabalho, apenas Charpy será utilizado.

No ensaio Charpy o corpo de prova é bi-apoiado como uma viga simples, com um entalhe central. O corpo de prova é posicionado de forma que o entalhe fique na face oposta à face de impacto. O posicionamento do entalhe é tal que o impacto ocorre na região de maior tensão, a seção transversal média do corpo de prova. (Figura 39)

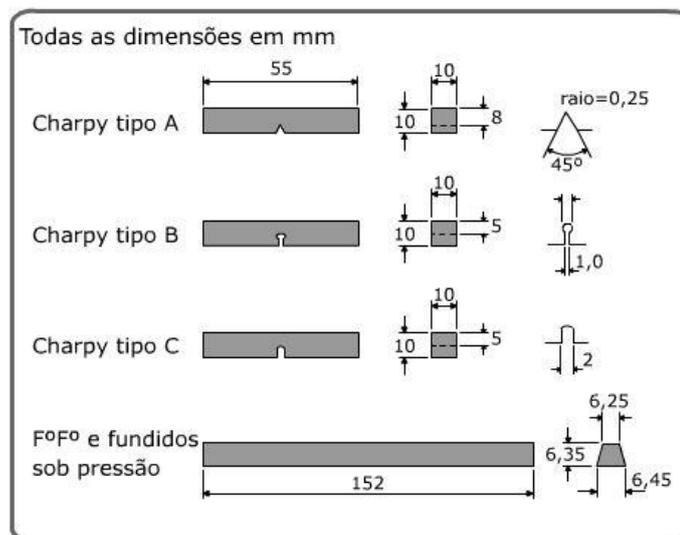
Figura 39 – Caracterização do impacto no ensaio de Charpy



Fonte: Do autor, adaptado GARCIA, et. Al (2015).

Quanto às dimensões do entalhe, a norma internacional ASTM E23-94A (Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials) especifica os diferentes tipos. Eles são divididos em três grupos, tipo A, tipo B e tipo C. Todos possuem as mesmas dimensões. A seção transversal é quadrada com 10 mm de lado e o comprimento é de 55 mm. O entalhe é executado no ponto médio do comprimento e pode ter três diferentes formas: em V, formando um ângulo de 45° e profundidade geralmente de 2 mm; tipo U, com raio da ponta do entalhe de 1 mm e profundidade geralmente de 5 mm; ou entalhe cilíndrico, formado por um rasgo com um furo em sua extremidade, como pode ser visto na Figura 40.

Figura 40 – Entalhes do ensaio de Charpy



Fonte: Do autor, adaptado GARCIA, et. Al (2015).

2.6.3.5 Análise de composição Química

A técnica de emissão ótica fornece determinações rápidas e precisas de muitos elementos químicos em uma amostra e é muito utilizada para o controle de qualidade e de processo de indústrias metalúrgicas, laboratoriais, fundições ferrosas e não-ferrosas.

Este método consiste na excitação das amostras através de uma centelha (descarga elétrica) que faz com que o material emita um espectro ou luz. Este espectro emitido vai depender da configuração atômica do material. Garcia, et. al (2015).

2.6.3.6 Teste com Carga de Ensaio (Proof Load)

Segundo Fuchs e Stephens (1980), o ensaio de proof load é um método utilizado para introduzir tensões residuais compressivas e de tração na superfície de peças, através do carregamento com uma força externa capaz de causar uma deformação plástica localizada nos pontos de concentração de tensão. O carregamento das forças e tensões podem ser estáticos ou dinâmicos. A carga de prova é a máxima carga que o parafuso pode resistir sem se deformar plasticamente.

Segundo Pizzio (2005), este ensaio deve ser realizado, pois, se uma força axial muito elevada for aplicada a uma junção há a possibilidade que o parafuso sustentará o carregamento adicional que fará com que sua força de escoamento seja excedida. Se isto ocorrer, então ou o parafuso falhará devido à tensão direta ou, quando a carga for removida, sustentará uma deformação plástica que resulte na perda da pré-carga que poderia fazer com que o parafuso se solte da junta. Para a maioria das uniões, a falha por sobrecarga é improvável porque o parafuso sustenta geralmente somente uma proporção pequena de qualquer força aplicada à junção.

2.6.3.7 Análise Metalográfica

Garcia et. al (2015) afirma que a metalografia é o estudo das características estruturais ou da constituição dos metais e suas ligas, para relacioná-los com suas propriedades mecânicas, físicas e químicas. Para se conseguir essa relação entre estrutura observada ao olho nú, lupa ou

microscópio com as propriedades mecânicas, deve-se seguir alguns procedimentos até a preparação da amostra.

Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar as interfaces entre os diferentes constituintes que compõe o metal.

Quanto ao tipo de observação, está subdividida, basicamente em duas classes: microscopia ou macroscopia. Na microscopia, análise é feita em um microscópio com aumentos que normalmente são 50X, 100X, 200X, 500X, 1000X, 1500X e 2500X. Este tipo de análise é realizada em microscópios específicos, conhecidos como microscópios metalográficos ou microscópios metalúrgicos. Este tipo de microscópio possui baixo campo focal, permitindo apenas a observação de superfícies perfeitamente planas e polidas. Em razão disto, a preparação metalográfica tem grande importância na qualidade de uma análise.

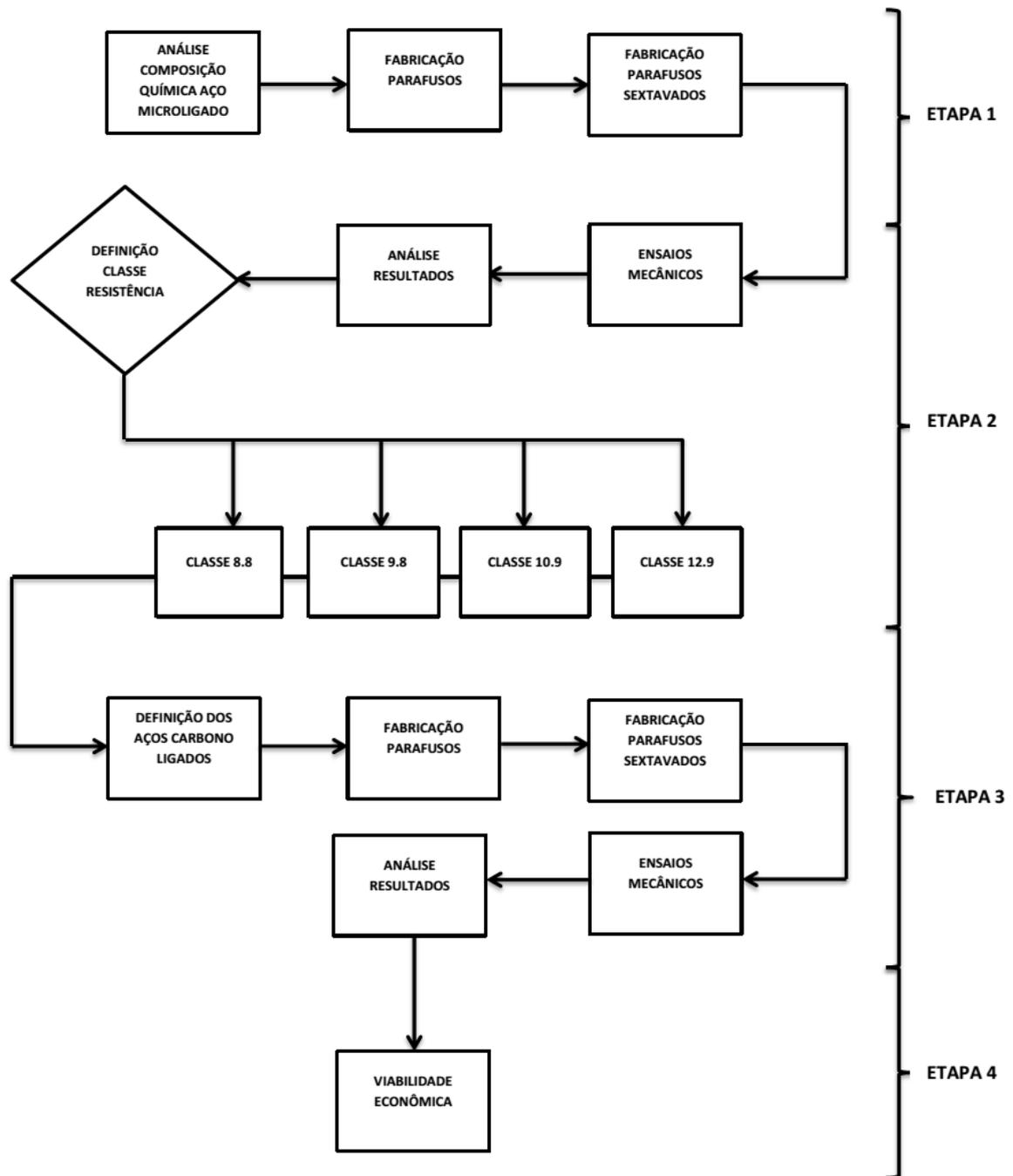
Já na macroscopia, a análise é feita a olho nu, lupa ou com utilização de microscópios estéreos (que favorecem a profundidade de foco e dão, portanto, visão tridimensional da área observada) com aumentos que podem variar de 5x a 64X.

Através das análises macrográficas e das análises micrográficas é possível a determinação de diversas características do material, inclusive a determinação das causas de fraturas, desgastes prematuros e outros tipos de falhas.

3. METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, a metodologia foi dividida em quatro etapas, conforme ilustra o fluxograma apresentado na Figura 41. A primeira etapa do estudo baseou-se na análise da composição química do aço microligado 30MnVS6, utilizado na fabricação dos parafusos sextavados. Na segunda etapa do estudo, ensaios mecânicos foram realizados em amostras conformadas com o aço microligado, buscando enquadrar as peças dentro de uma classe de resistência mecânica (igual ou superior à classe 8.8), de acordo com a norma ISO 898-1:2013, caracterizada pelas propriedades físicas e mecânicas da Figura 32 e Quadro 3. A terceira etapa da pesquisa consistiu em fabricar a mesma família de parafuso anteriormente mencionado (sextavado), em dois diferentes tipos de aço carbono ligado (PL22 e PL41). Após a manufatura, a caracterização destes materiais foi realizada de acordo com os ensaios estabelecidos nas etapas 1 e 2. A quarta e última etapa da pesquisa fundamentou-se na comparação dos resultados obtidos com os três aços utilizados (30MnVS6, PL22 e PL41), além de um estudo preliminar de viabilidade econômica da utilização do aço microligado proposto.

Figura 41 – Fluxograma representando a metodologia adotada no trabalho



Fonte: Do autor (2016)

3.1 Materiais

O material escolhido para o estudo do trabalho constitui em um aço-carbono microligado ao vanádio, denominado de 30MnVS6. Os teores limites de composição química, estabelecidos pela norma DIN EN 10267, estão expressos no Quadro 4.

Quadro 4 – Composição química do aço 30MnVS6

Aço	C	Si	Mn	P	S	V	N
30MnVS6	0,26 – 0,33	0,15 – 0,80	1,20 – 1,60	≤ 0,025	0,020 – 0,060	0,08 – 0,20	0,01 – 0,02

Fonte: Norma DIN EN 10267 de 1999

O material foi fornecido pela indústria na forma de arame fio máquina⁹, nas bitolas 16,15 mm, utilizado para manufatura dos parafusos sextavados. É importante frisar que apenas parafusos milimétricos foram fabricados.

Como se espera que o aço-carbono microligado 30MnVS6 atinja propriedades mecânicas próximas as classes 8.8 até 10.9, escolheu-se dois materiais do Quadro 5 para fins comparativos: o aço-carbono ligado PL22 temperado e revenido na classe de resistência 8.8 e o aço-carbono ligado PL41, temperado e revenido na classe de resistência 10.9.

⁹ Produto laminado a quente, não plano, cuja seção transversal é constante e constitui uma figura geométrica simples. Geralmente é fornecido em rolos.

Quadro 5 – Composição química dos aços-carbono ligados e sua aplicação

AÇOS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)												Aplicação
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	V	B	
PA03	0,05 máx.	0,06 máx.	0,35 – 0,55	0,03 máx.	0,03 máx.	-	-	-	-	0,01 – 0,05	-	-	4,6 / 4,8 / 5,6 / 5,8
1006	0,08 máx.	0,10 máx.	0,25 – 0,40	0,03 máx.	0,03 máx.	-	-	-	-	0,02 – 0,08	-	-	4,6 / 4,8 / 5,6 / 5,8
1015	0,13 – 0,18	0,40 máx.	0,30 – 0,60	0,02 máx.	0,025 máx.	0,25 máx.	0,20 máx.	0,06 máx.	0,35 máx.	-	-	-	4,6 / 4,8 / 5,6 / 5,8 / 6,8
PC15	0,13 – 0,18	0,10 máx.	0,30 – 0,60	0,03máx .	0,03 máx.	-	-	-	0,35 máx.	0,02 – 0,08	-	-	4,6 / 4,8 / 5,6 / 5,8 / 6,8
10B21	0,18 – 0,23	0,10 máx.	0,70 – 1,00	0,03 máx.	0,035 máx.	-	-	-	-	-	-	0,0005 mín.	5,8 / 6,8 / 8,8 / 9,8
10B22	0,18 – 0,23	0,15 – 0,30	1,00 – 1,25	0,025 máx.	0,025 máx.	0,25 máx.	0,15 – 0,25	0,06 máx.	0,35 máx.	-	-	0,0005 – 0,0030	8,8 / 9,8
PL22	0,19 – 0,23	0,15 – 0,30	1,05 – 1,25	0,025 máx	0,025 máx	-	0,10 – 0,20	-	0,05 máx.	0,02 – 0,08	-	0,001 – 0,003	8,8 / 9,8
10B30	0,28 – 0,34	0,15 – 0,30	0,60 – 0,90	0,025 máx.	0,025 máx	0,25 máx	0,30 – 0,40	0,07 máx.	0,35 máx.	-	-	0,0005 – 0,0030	8,8 / 9,8 / 10,9
PL30	0,30 – 0,34	0,15 – 0,30	0,80 – 1,00	0,025 máx	0,025 máx	-	0,30 – 0,40	-	-	0,02 – 0,08	-	0,001 – 0,003	8,8 / 9,8 / 10,9
ML40Cr	0,36 – 0,43	0,18 – 0,25	0,70 – 1,00	0,015 máx.	0,005 máx.	-	0,90 – 1,10	-	-	-	-	-	8,8 / 9,8 / 10,9 / 11,9 / 12,9
5135	0,34 – 0,38	0,15- 0,30	0,70 – 0,80	0,025 máx	0,025 máx	-	0,90 – 1,05	-	-	0,02 – 0,08	-	-	8,8 / 9,8 / 10,9 / 11,9
5140	0,38 – 0,45	0,40 máx.	0,60 – 0,90	0,025 máx.	0,025 máx.	0,25 máx.	0,90 – 1,20	0,06 máx.	0,35 máx.	-	-	-	8,8 / 9,8 / 10,9 / 11,9 / 12,9
41Cr4	0,38 – 0,45	0,40 máx.	0,60 – 0,90	0,025 máx.	0,025 máx.	0,25 máx.	0,90 – 1,20	0,06 máx.	0,35 máx.	-	-	-	8,8 / 9,8 / 10,9 / 11,9 / 12,9
PL41	0,40 – 0,45	0,15 – 0,30	0,70 – 0,85	0,025 máx	0,025 máx	-	1,05 – 1,20	-	0,10 máx.	0,02 – 0,05	-	-	8,8 / 9,8 / 10,9 / 11,9 / 12,9
4135	0,33 – 0,37	0,15 – 0,30	0,70 – 0,90	0,025 máx	0,025 máx	-	0,90 – 1,10	0,15 – 0,25	0,05 máx.	0,02 – 0,08	-	-	10,9 / 11,9 / 12,9
SCM 440	0,38 – 0,43	0,15 – 0,35	0,60 – 0,85	0,03 máx.	0,03 máx.	0,25 máx.	0,90 – 1,20	0,15 – 0,30	0,30 máx.	-	-	-	10,9 / 11,9 / 12,9
4140	0,38 – 0,43	0,15 – 0,30	0,75 – 0,90	0,025 máx.	0,025 máx.	0,25 máx.	0,90 – 1,10	0,15 – 0,25	0,05 máx.	0,02 – 0,08	-	-	10,9 / 11,9 / 12,9

Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

3.2 Conformação dos Materiais

Os parafusos de objeto de análise do presente trabalho foram fabricados em uma máquina Italiana Sacma, modelo SP 48 de cinco estágios, combinada, isto é, com a operação de forjamento, usinagem do chanfro e laminação de rosca na mesma unidade, conforme a Figura 42. Esta máquina possui capacidade de conformação de parafusos M16 à M18, onde podem ser processadas até 160 peças por minutos com uma força de estampagem de 2.200 KN.

Figura 42 – Sacma SP 48

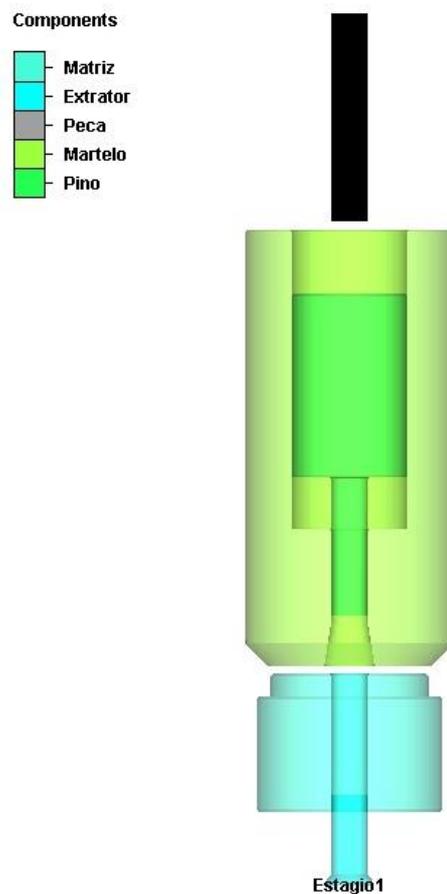


Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Os parafusos de cabeça sextavada foram conformados de acordo com a norma ISO 4014. Foi utilizado o software de simulação computacional por elementos finitos SIMUFACT, da empresa MSC Software, para demonstração das etapas de forjamento a frio e verificação do escoamento do material 30MnVS6. O software também calcula o nível efetivo de tensão em cada parte da peça, assim como a força de estampagem necessária para cada deformação. Para comparação dos resultados de tensões efetivas e força necessária de forjamento, o aço-carbono ligado PL41 também foi reproduzido computacionalmente, pois, segundo COSTA (2010), este material é considerado um aço de menor condição de conformabilidade quando comparado com o aço PL22, que por este motivo, não foi simulado.

O primeiro estágio da conformação é composto por uma matriz, um extrator, um martelo, um pino e o tarugo de material, conforme a Figura 43. O tarugo é empurrado para dentro da matriz, através do martelo, que possui um formato cônico, sendo este o formato que é adquirido pela parte superior do tarugo, de acordo com a Figura 44. O pino serve de apoio para conformação da cabeça e o extrator serve para remover a peça de dentro da matriz.

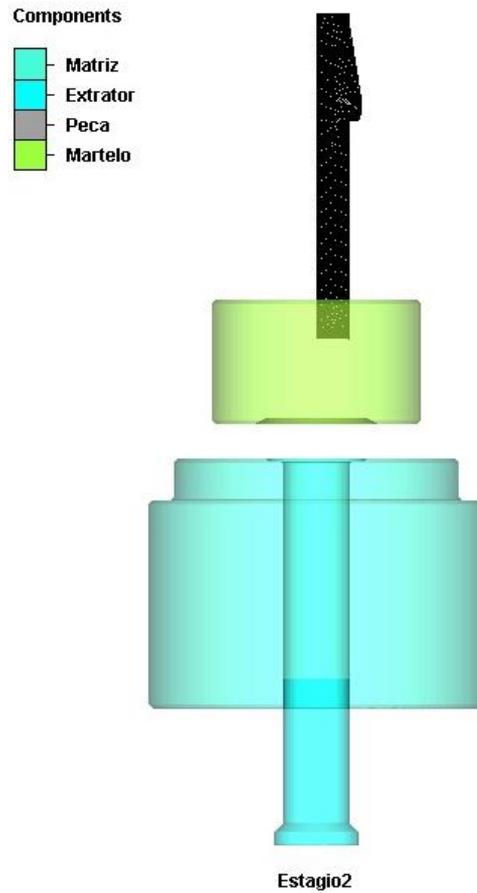
Figura 43 – Primeiro estágio da conformação



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Na Figura 44 está representada o segundo estágio da conformação mecânica, composto por uma matriz, um martelo, um extrator, e o blank do estágio anterior. Esta etapa do forjamento consiste na deformação do tarugo anterior de cabeça formato cônico, para um formato de cabeça cilíndrico.

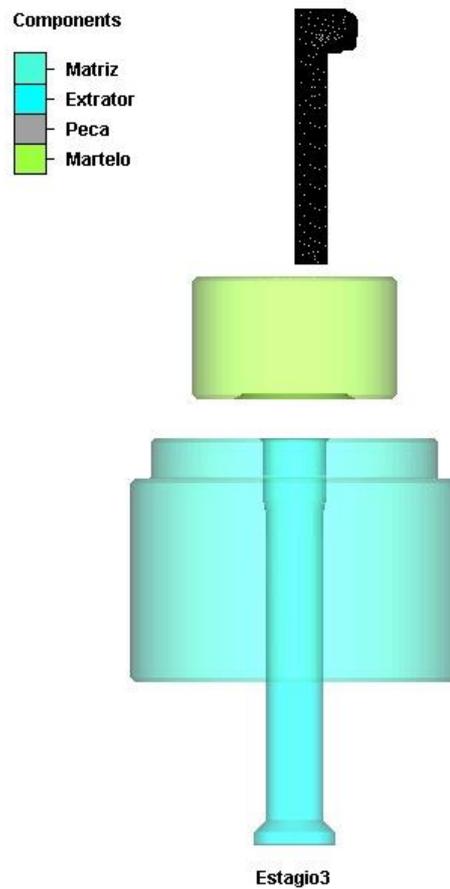
Figura 44 – Segundo estágio da conformação mecânica



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

A terceira etapa da conformação, ou terceiro estágio, consiste na redução do diâmetro da seção da rosca e também a definição do comprimento final da peça. Esta etapa é composta por uma matriz, um martelo um extrator e o blank do segundo estágio (Figura 45).

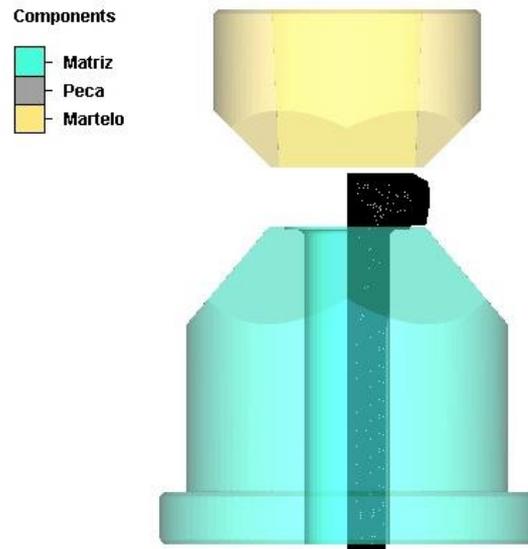
Figura 45 – Terceiro estágio da conformação mecânica



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

O quarto e último estágio da conformação mecânica consiste em rebarbar o formato cilíndrico da cabeça em um formato sextavado. Por este motivo, esta etapa é composta de uma matriz, um martelo e o blank do terceiro estágio (Figura 46). Nesta etapa o martelo de formato sextavado é pressionado contra a peça dentro da matriz, onde está apoiada. O excesso de material escoar para fora e através de forças de compressão, tração e cisalhamento, é removido da peça, como pode ser visto na Figura 47.

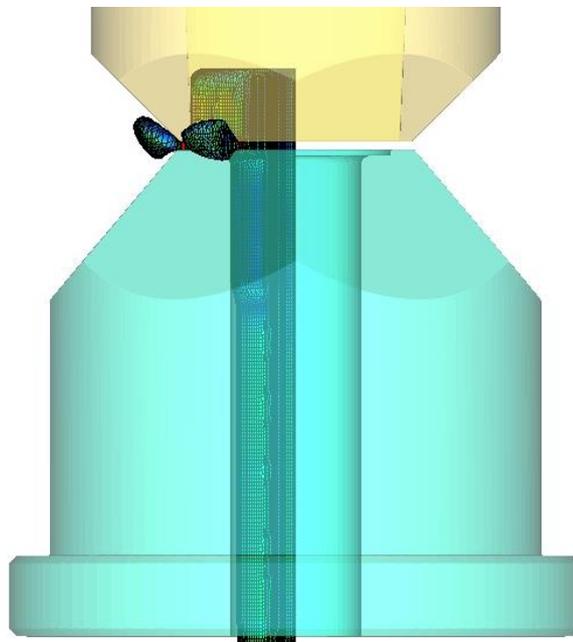
Figura 46 – Quarto estágio da conformação mecânica (posição inicial)



Estagio4

Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 47 – Quarto estágio da conformação mecânica (remoção material)



Estagio4

Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

3.3 Tratamento Térmico dos Aços Ligados

Visto que os aços carbono microligados utilizam outros mecanismos de endurecimento para alcançar as propriedades mecânicas requeridas, os parafusos fabricados com o aço 30MnVS6 não foram tratados termicamente após a conformação mecânica. Já, os parafusos fabricados em aços carbono ligados passaram pelo processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento.

O equipamento utilizado foi a linha contínua de têmpera e revenimento da marca REX MÁQUINAS, modelo MF-0112-2012, localizada nas dependências da Metalúrgica Hassmann (Figura 48).

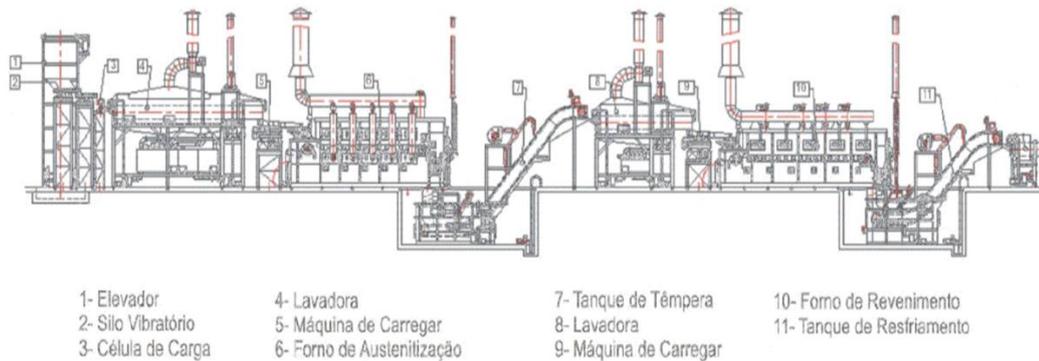
Figura 48 – Linha contínua de têmpera e revenimento



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

A Figura 49 esquematiza a linha contínua de tratamento térmico de têmpera e revenimento, cujo processo inicia com a deposição dos parafusos na lavadora de 3 estágios (detergente/água/ar) modelo MLE-3, que processa a limpeza dos mesmos, retirando todos os traços de óleo e outros resíduos provenientes do processo de fabricação, deixando-os limpos e praticamente secos antes de entrarem no forno de austenitização.

Figura 49 – Esquemática da linha contínua de têmpera e revenimento



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Na sequência, os parafusos passam por uma calha ou silo vibratório, alimentando o forno de austenitização modelo FAC-HE, que é o responsável pela elevação da temperatura dos parafusos a níveis de austenitização. O aquecimento é realizado através de resistências elétricas protegidas por tubos radiantes distribuídos em quatro zonas de controle, controladas pelo painel de comando através de tiristores. Os parafusos seguem pela câmara de aquecimento do forno, por meio de uma esteira fundida, tracionada por um grupo moto-redutor. Para proteção dos tubos radiantes, o forno é dotado de sistema de segurança contra sobre-temperatura, no caso de ruptura dos termopares de controle. Após o aquecimento, os parafusos vão caindo através de uma bica de descarga, em um tanque contínuo de óleo, modelo "TQEC-O-7000", que é o responsável pela têmpera dos parafusos. O óleo integral utilizado (ARTEMP 15, do fabricante ITW CHEMICAL), é mantido a uma temperatura específica por um controlador de temperatura. Quando o banho atinge o valor de regulagem, o controlador aciona o sistema de refrigeração do óleo, composto por bombas e um trocador de calor. Já, quando o óleo é resfriado, todo o sistema de resfriamento é desligado.

Visto que as peças estão novamente contaminadas com óleo, outra esteira faz o transporte dos parafusos até uma calha vibratória que os leva para a Lavadora "MLE-2", onde passam automaticamente pelas etapas de limpeza e secagem. Feito a lavagem, duas calhas vibratórias fazem o transporte até o forno de revenimento modelo "FRC-HE-115". Um insuflador de ar, posicionado sobre a esteira, remove resíduos de óleo dos parafusos.

O forno "FRC-HE-115 é o responsável pelo revenimento dos parafusos temperados, elevando-se a temperatura através de resistências elétricas distribuídas em três zonas de

controle, até níveis desejados de acordo com a bitola, qualidade e classe de resistência da peça. O controle de temperatura é feito através de painel de comando por tiristores¹⁰, sendo provido de segurança contra sobre-temperatura, no caso de ruptura dos termopares de controle. Três ventiladores fazem circular a atmosfera interna por toda a câmara de aquecimento, homogeneizando assim a temperatura em todos os pontos do Forno.

Saindo do forno de revenimento, os parafusos caem dentro do tanque modelo "TQEC-A-7000", que faz o acabamento final das peças (oleamento). Neste tanque contém óleo solúvel ARTEMP E70, da marca ITW CHEMICAL, o qual tem o objetivo de resfriar as peças e conferir um pequeno filme de óleo protetivo. O transporte destes para fora do tanque se dá através de corrente transportadora tipo caneca, que deposita os parafusos em containers. Um sistema de cortina de ar instalado na saída do tanque elimina os excessos. O tanque possui um agitador para melhorar a dissolução do óleo solúvel.

As temperaturas, tempos de austenitização e revenimento utilizados para tratar termicamente os aços carbono ligados estão dispostos no Quadro 6.

Quadro 6 – Dados do processo de tratamento térmico dos aços-carbono ligados

Dados do Processo de Tratamento Térmico dos Aços-Carbono Ligados						
Aço	T(°C) Forno de Austenitização	Tempo no Forno de Austenitização (min)	T(°C) Óleo de Têmpera	T(°C) Forno de Revenimento	Tempo no Forno de Revenimento (min)	T(°C) Óleo Soluvel
PL22	850	60	50	450	55	50
PL41	850	60	50	500	60	50

Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

3.4 Caracterização dos Materiais Metálicos

Dentre os ensaios mencionados, a análise de composição química, o ensaio de tração, os ensaios de dureza, os ensaios metalográficos e o teste de resistência à fadiga foram realizados nas dependências da Metalúrgica Hassmann S/A (MH), já o teste de charpy e o ensaio de proof load, em um laboratório externo, especializado.

3.4.1 Análise Composição Química

¹⁰ Um tiristor é um componente semicondutor de dois, três ou quatro terminais que pode ser usado como interruptor de ação rápida. A condição de um tiristor é LIGA (estado de condução) ou DESLIGA (estado de bloqueio), dependendo da tensão de entrada no elemento da porta.

A análise de composição química dos materiais recebidos foi realizada em um espectrômetro de emissão ótica modelo PDA-7000 da marca SCHIMADZU (Figura 50), que utiliza o método PDA (*Pulse Height Distribution Analysis*) em sua configuração básica, para melhorar a exatidão e a confiabilidade das análises e consiste no princípio da decomposição da luz produzida por uma faísca elétrica em diferentes comprimentos de onda, para finalmente converter esses pulsos em corrente elétrica e apresentá-los em valores percentuais na tela do computador.

Figura 50 – Espectrômetro de emissão ótica



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

3.4.2 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração, limites de escoamento, estrição e alongamento foram realizados nas dependências da Metalúrgica Hassmann S/A, na sua Máquina Universal de Ensaio Mecânico (MUEM). Esta máquina representada na Figura 51 é da marca WOLPERT modelo 60 TUZ V, com capacidade de 600 kN.

Figura 51 – MUEM Wolpert



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Segundo a ISO 898-1:2013, o ensaio de tração em parafusos inteiros deve ser executados conforme as cargas do Quadro 7.

Quadro 7 – Cargas mínimas de ruptura para roscas métricas normais ISO

Rosca	Seção Transversal Efetiva Nominal $A_{s,nom}$ (mm ²)	Classe de Resistência Mecânica								
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
		Tensão de Tração Mínima F_m (N)								
		$F_m = A_{s,nom} \cdot R_{m,min}$								
M16	157	62800	65900	78500	81600	94000	125000	141000	163000	192000

Fonte: Do autor, adaptado de ISO 898-1:2013 (2016)

Conforme a norma, durante a execução do ensaio deve haver carga em um comprimento livre de rosca de, no mínimo, uma medida do diâmetro nominal do parafuso. Para satisfazer as exigências deste ensaio, a ruptura deverá ocorrer somente no comprimento livre da rosca ou na haste e não na transição entre a cabeça e a haste. A velocidade de aplicação de carga não deve exceder 25 mm / min e o equipamento de ensaio deve estar estruturado de tal forma que impeça a ocorrência de tensões de flexão. Importante salientar que o teste deve ser efetuado até a fratura da amostra, sendo que a ruptura deve ocorrer no menor diâmetro do parafuso, ou seja, no diâmetro de flancos rosca.

Para realização do ensaio de tração, as peças foram acopladas na máquina de ensaio universal, utilizando insertos para o diâmetro M16 passo 2,0, conforme ilustra a Figura 52, de

acordo com a norma ISO 898-1:2013. Não foram usinados corpos de prova, pois, neste caso, o ensaio é realizado no parafuso inteiro conformado, conforme especifica a ISO 898-1, onde a cabeça do parafuso sextavado está apoiada em uma placa, e a outra extremidade da peça, rosqueada no inserto. A velocidade de aplicação de carga não excedeu os 15 mm / min.

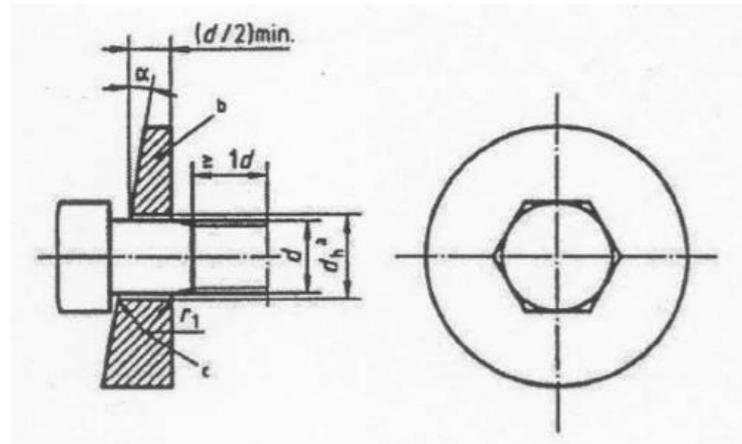
Figura 52 – Parafuso sextavado 30MnVS6 acoplado no ensaio de tração.



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Além disso, o ensaio de tração deve ser realizado de forma oblíqua (Figura 53), conforme a tabela de testes da ISO 898-1 (2013). Este ensaio consiste em determinar simultaneamente a resistência à tração assim como a integridade da seção de transição da rosca até a cabeça do parafuso. Para o ensaio de tração oblíqua, utilizou-se do mesmo equipamento mencionado anteriormente no ensaio de tração, porém a ISO 898-1:2013 especifica as características deste ensaio, onde o suporte de encaixe do parafuso na máquina deve possuir uma angulação conforme no Quadro 8.

Figura 53 – Ensaio de tração oblíqua



Fonte: Do autor, adaptado de ISO 898-1:2013 (2016)

Quadro 8 – Características do ensaio de tração oblíqua

Diâmetro nominal da rosca do parafuso d (mm)	Classes de resistência para:			
	Parafusos com comprimento da haste sem rosca $l_s \geq 2d$		Parafusos com rosca até a cabeça ou comprimento da haste sem rosca $l_s < 2d$	
	3.6, 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8, 8.8, 9.8, 10.9	12.9	3.6, 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8, 8.8, 9.8, 10.9	12.9
	Ângulo da cunha: $\alpha \pm 30'$			
$d \leq 20$	10°	6°	6°	4°
$20 < d \leq 39$	6°	4°	4°	4°

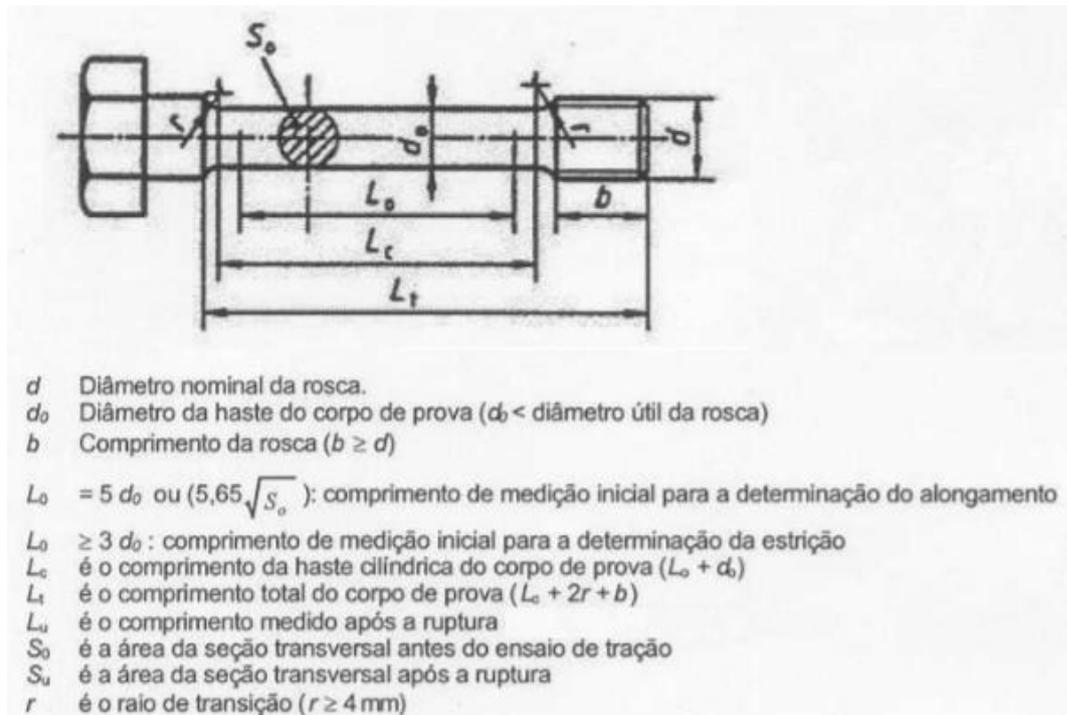
Fonte: Do autor, adaptado de ISO 898-1:2013 (2016)

A dureza do suporte deve ser de, no mínimo, 45 HRC. A tolerância do furo para parafusos M16 é de 17,50 a 17,77 milímetros (ISO 898-1:2013). Além disto, a velocidade do ensaio não deve exceder os 25 mm / min. As cargas de tração devem estar de acordo com o Quadro 7 e o teste deve ser realizado até a ruptura da peça.

Conforme especifica a norma, todas as solicitações foram atendidas no trabalho. Isto porque foi utilizado ângulo de 6° de cunha, pois o comprimento livre de rosca (l_s) é menor que duas vezes o diâmetro do parafuso e a classe de resistência das peças testadas foi menor que 12.9. A dureza do suporte encontrada foi de 48 HRC. A velocidade do ensaio foi de 15 mm / min e as peças foram testadas até a completa ruptura.

O ensaio de tração também deve ser utilizado para determinar o alongamento e estricção após fratura do corpo de prova, de acordo a ISO 898-1:2013. Para estas características, as peças devem ser usinadas conforme a Figura 54.

Figura 54 – Corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: Do autor, adaptado de ISO 898-1:2013 (2016)

Para a usinagem do corpo de prova, o “ d_0 ” deve ser menor que o diâmetro do fundo da rosca (diâmetro de flancos). Para diâmetros nominais de parafusos maiores que 16 mm, a redução do diâmetro original não deve exceder 25 %. A velocidade do ensaio não deve exceder os 25 mm / min. O teste deve ser realizado até a fratura dos corpos de prova. A estricção e o alongamento após a fratura devem ser calculados através das Equações 5 e 6, respectivamente, previamente já mencionadas.

As dimensões do corpo de prova usinado estão descritas abaixo. O mesmo está exposto na Figura 55 e foi usinado na ferramentaria da MH, por um torno universal marca NARDINI, modelo NODUS 250. As peças foram identificadas antes da realização do teste e, após a fratura, foram novamente medidas, obtendo-se as variações no comprimento e diâmetro.

Figura 55 – Corpo de prova usinado para ensaio de estrição e alongamento e fratura do corpo de prova 30MnVS6 após ensaio de tração



Fonte: do autor (2016).

- Diâmetro nominal de rosca (d) = 16 mm
- Diâmetro da haste (d_0) = 5 mm
- Comprimento da rosca (b) = 16 mm
- Raio de transição (r) = 4 mm
- Comprimento da haste cilíndrica (L_c) = 30 mm
- Comprimento total do corpo de prova (L_t) = 54 mm

3.4.3 Ensaio de Impacto (Charpy)

Segundo a norma ISO 898-1:2013, o objetivo do ensaio de impacto é verificar a rigidez do material do parafuso quando submetido a uma força de impacto em baixas temperaturas. O teste somente é realizado quando solicitado, pois não é quesito obrigatório. Segundo a norma, o teste se aplica em parafusos usinados, parafusos com diâmetro nominal maior ou igual a 16 mm e comprimento total maior ou igual a 55 mm, assim como para as classes de resistência 5.6, 8.8, 9.8, 10.9 e 12.9.

O corpo de prova deve ser feito a partir de um parafuso inteiriço, e deve estar de acordo com o que especifica a norma ISO 148-1 (Charpy Pendulum Impact Test). Deve-se tentar utilizar, para fabricação do corpo de prova, o comprimento do parafuso livre de rosca,

localizado o mais próximo possível da superfície da cabeça. O ensaio deve ser realizado a uma temperatura estável de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. O tipo de entalhe deve ser em formato de V (conforme Figura 40). Os resultados devem estar de acordo com a Figura 32.

Embora este ensaio não seja uma exigência da ISO 898-1:2013, para verificar o comportamento do material microligado 30MnVS6 quando submetido a baixas temperaturas, o mesmo foi realizado. A execução procedeu-se no laboratório SGS LABMAT ANÁLISES E ENSAIOS DE MATERIAIS, localizado em Esteio, no Rio Grande do Sul. O equipamento utilizado foi a máquina de ensaio de impacto, modelo LBM-O18-ES. A temperatura do ensaio foi de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. As dimensões do entalhe foram de 10 mm de largura, 7,5 mm de espessura e 55 mm de comprimento. O tipo de entalhe foi em V. Devido aos custos, foram testados três corpos de prova para cada tipo de material.

3.4.4 Teste com Carga de Ensaio (Proof Load)

Segundo a Norma ISO 898-1, o teste com carga de ensaio em parafusos inteiros consiste na aplicação da carga de ensaio estabelecida e, posteriormente, na medição do alongamento permanente, se tal alongamento tiver sido causado pela carga de ensaio.

As cargas de ensaio estabelecidas pela norma para os parafusos de bitola 16 mm estão expressas no Quadro 9 e devem ser aplicadas em parafusos, em uma máquina para ensaios de tração, em sentido axial. A carga de ensaio total deve ser mantida durante 15 segundos. A velocidade do ensaio não deve exceder 3 mm/min. O equipamento de ensaio deve estar estruturado de forma que não haja possibilidade de ocorrência de tensões de flexão.

Quadro 9 – Carga de ensaio para teste de proof load em roscas métricas normais

Rosca	Seção Transversal Efetiva Nominal $A_{s,nom}$ (mm ²)	Classe de Resistência Mecânica								
		4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
		Carga de Proof Load F_p (N)								
		$F_p = A_{s,nom} \cdot S_{p,nom}$								
M16	157	35300	48700	44000	59700	69100	91000	102000	130000	152000

Fonte: Do autor, adaptado de ISO 898-1:2013 (2016)

As condições do ensaio valem como atendidas, quando o comprimento do parafuso medido após o ensaio for o mesmo comprimento do parafuso medido antes do ensaio, ou seja, sem apresentar deformações permanentes, com uma incerteza de medição de $\pm 12 \mu\text{m}$.

O laboratório que realizou o ensaio também foi o SGS LABMAT. O ensaio foi executado em uma Máquina Universal de Ensaio de código LBM-427-1-ES, a temperatura ambiente ($21 \text{ }^\circ\text{C}$), em duas amostras para cada tipo de aço utilizado. A velocidade de ensaio não excedeu os 3 mm/min .

3.4.5 Ensaio de Resistência à Fadiga

Para realização do teste de fadiga, foi utilizado o equipamento suíço da marca RUMUL, modelo TESTRONIC 250 kN (Figura 56), que trabalha na frequência de ressonância dos parafusos.

Figura 56 – Máquina ensaio de fadiga



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Para o presente trabalho, visando um comparativo entre os parafusos fabricados com aço carbono microligado e aço carbono ligado, foi utilizado o método de ensaio chamado de staircase. Este ensaio é definido pela norma ISO 3800, que especifica diversos tipos de ensaio de fadiga para parafusos rosqueados.

O ensaio é realizado aplicando-se uma carga axial de tração (carga estática) no parafuso e posteriormente, uma carga de oscilação (carga dinâmica), onde estimula-se a peça a 10 milhões de ciclos, e caso não haja a ruptura do componente, a carga de oscilação é aumentada. Caso ocorra a quebra do parafuso antes dos 10 milhões de ciclos, a carga de oscilação é diminuída. Repete-se o ensaio com a nova carga em outra peça do mesmo lote adotando a mesma sistemática.

Para iniciar-se os testes de fadiga obteve-se a carga estática dos 3 tipos de parafusos, conforme sua classe de resistência, através da Equação 5, conforme a norma Verein Deutscher Ingenieure VDI 2230:2003.

Equação 5 – Carga estática para ensaio de fadiga

$$ML = R_{p02} * A_s * 0,75 \text{ [kN]} \quad (5)$$

Onde,

ML = Carga Estática [kN]

R_{p02} = Limite de escoamento mínimo (conforme Figura 32) [MPa]

A_s = Área da rosca (conforme Quadro 7) [mm²]

Para os cálculos de carga estática, supôs-se que o aço carbono microligado 30MnVS6 deveria possuir no mínimo a resistência mecânica da classe 8.8 conforme a norma ISO 898-1. Para o aço carbono ligado PL22 e PL41, suas classes já estavam estabelecidas em 8.8 e 10.9, respectivamente. Desta maneira, obteve-se o valor de R_{p02} (Limite de escoamento mínimo). O valor de A_s (área da rosca) é obtido conforme o Quadro 7, retirado da norma ISO 898-1:2013. Sendo assim, os valores encontrados para a carga estática podem ser vistos no Quadro 10.

Quadro 10 – Cálculo carga estática

Material	Classe de	R _{p02}	As	ML
30MnVS6	8.8	640	157	75,36
PL22	8.8	640	157	75,36
PL41	10.9	940	157	110,21

Fonte: do autor (2016).

Para obtenção dos valores de cargas dinâmicas, estimou-se um valor de referência para iniciar-se o ensaio (8 kN), e então, estes valores foram sendo aumentados gradativamente até a ruptura da primeira peça. A partir desta ruptura, diminuiu-se a variação da carga entre uma amostra e outra para uma melhor precisão dos resultados. Estes valores poderão ser observados nos resultados.

Com as cargas estáticas e dinâmicas estabelecidas, o ensaio pode iniciar. Ao final, os resultados devem ser expostos em um quadro específico (conforme exemplifica a Figura 57). A partir deste quadro, é possível calcular (conforme Equação 6) a carga média de resistência para 50 % de chance da peça não quebrar (F_{A50}). O desvio padrão da carga média de resistência das amostras pode ser calculado através da Equação 7.

Figura 57 – Exemplo do teste de fadiga pelo método de staircase

Test piece :		Hexagon head bolt ISO 4014 - M10 x 80 - 8.8																								
Mean load F_m :		0,6 $F_{0,2}$ (N)																								
1	2														3	4	5	6	7	8						
F_A (N)	x Failure							o Non-failure							x	o	z	f	zf	z^2f						
4 700																	x			1	0	3	0	0	0	
4 300						x		x									o		x	3	1	2	1	2	4	
3 900	x		x		o		o		x		o							x		4	3	1	3	3	3	
3 500		o		o							o									0	3	0	3	0	0	
Test piece No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15											
Sum of columns 3, 4, 6, 7, 8																		8	7	—	7	5	7			
																					C	A	E			
$F_{A50} = F_{80} + \Delta F_{911} \left(\frac{A}{C} \pm x \right) = 3\,929 \text{ N}$ $S(F_A) = 1,62 \Delta F_{911} \left(\frac{CE - A^2}{C^2} + 0,029 \right) = 177 \text{ N}$																										

Fonte: Do autor, adaptado de ISO 3800 (1993)

Equação 6 – Carga dinâmica para 50 % de probabilidade de sobrevivência da peça

$$F_{A50} = F_{ao} + \Delta F_{all} \left(\frac{A}{C} \pm x \right) \quad (6)$$

Equação 7 – Desvio padrão da carga média de resistência

$$S(F_A) = 1,62 \Delta F_{all} \left(\frac{CE - A^2}{C^2} + 0,029 \right) \quad (7)$$

Onde,

F_{A50} = carga dinâmica média para 50% de probabilidade de sobrevivência da peça

F_{ao} = menor carga dinâmica nas colunas 3 ou 4 com o menor número de eventos

ΔF_{all}

= variação da carga dinâmica entre dois níveis subsequentes de carregamento

$S(F_A)$ = desvio padrão

$$x = \begin{cases} + 0,5 & \text{quando coluna 6 = coluna 4} \\ - 0,5 & \text{quando coluna 6 = coluna 3} \end{cases}$$

C = somatório da coluna 6

A = somatório da coluna 7

E = somatório da coluna 8

Através destes valores, com cálculos estatísticos, também é possível obter a carga de oscilação para 99 % de chance de os parafusos resistirem (Equação 8).

Equação 8 – Carga dinâmica para 99 % de probabilidade de sobrevivência da peça

$$F_{A99} = F_{A50} - t \cdot S(F_A) \quad (8)$$

Onde,

F_{A99} = carga dinâmica média para 99 % de probabilidade de sobrevivência da peça

F_{A50} = carga dinâmica média para 50 % de probabilidade de sobrevivência da peça

t = constante student (Conforme Figura 58)

$$S(F_A) = \text{desvio padrão}$$

Figura 58 – Distribuição da constante “t” student

df	0.600	0.700	0.800	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
1	0.325	0.727	1.376	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.289	0.617	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.277	0.584	0.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.271	0.569	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.267	0.559	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.265	0.553	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.263	0.549	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.262	0.546	0.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.261	0.543	0.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.260	0.542	0.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.260	0.540	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.259	0.539	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.259	0.538	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.258	0.537	0.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.258	0.536	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947

Fonte: adaptado autor, PIZZIO (2005)

Para determinação do valor de t (constante student), deve-se cruzar o valor da probabilidade de sobrevivência desejada da peça (eixo superior x), com o número de amostras testadas, menos uma (eixo y df). No caso de sobrevivência de 99 % e um número de 11 (onze) amostras testadas, obteve-se o valor de $t = 2,764$ para os cálculos.

3.4.6 Análises Metalográficas

As análises metalográficas dos parafusos fabricados consistem no estudo da morfologia e microestrutura dos mesmos. Primeiramente antes da análise, um corpo de prova foi preparado, e para isto, na primeira etapa, as peças serão cortadas na cortadeira automática STRUERS modelo DISCOTOM-6. O corte é realizado através de um disco de corte para separar a porção aproximada que será analisada.

A segunda etapa da preparação do corpo de prova é o embutimento, que no caso da empresa é feito a quente pela embutidora automática STRUERS modelo CITOPRESS-1. A resina utilizada será o baquelite.

A terceira etapa da preparação é o lixamento e o polimento da amostra, feito na lixadeira semiautomática STRUERS modelo TEGRALPOL 21 e TEGRAFORCE-3 e pela politriz semiautomática STRUERS modelo TEGRADOSER-5. Estas operações têm por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento superficial polido ao corpo de prova. Todas estas operações estão ilustradas na Figura 59.

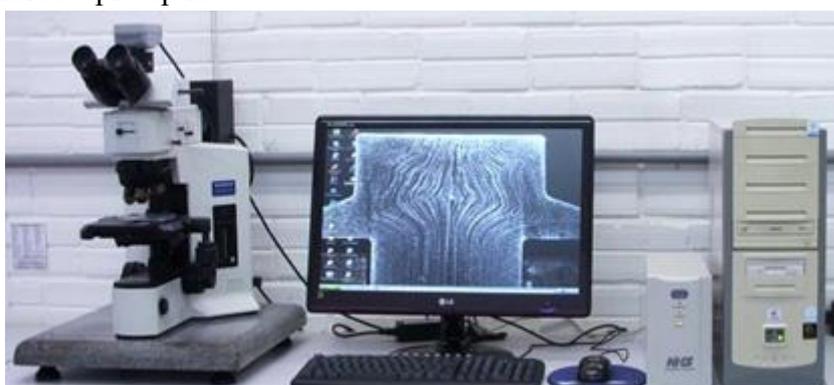
Figura 59 – Estação de preparação metalográfica



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

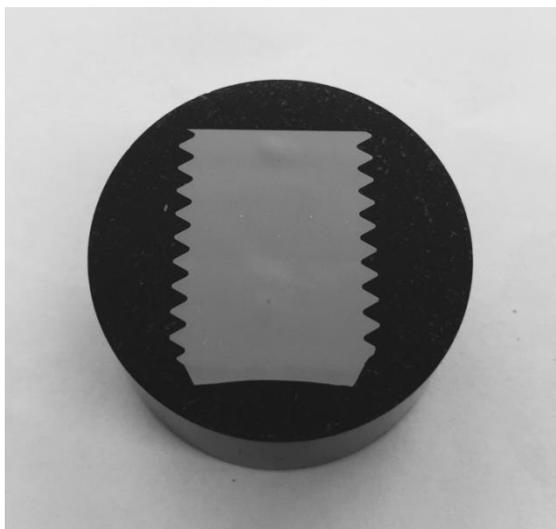
A última etapa da preparação do corpo de prova é o ataque químico, que foi realizado na capela de exaustão de gases NALGON modelo 3700, existente na empresa. O reagente ácido utilizado foi o NITAL, composto de álcool e ácido nítrico em concentrações de 65%. O objetivo deste ataque químico é permitir a identificação (visualização) dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura. A metalografia das amostras foi verificada no microscópio óptico OLYMPUS modelo BX51M (Figura 60). O aumento utilizado para as análises foi de 500 X. O resultado do embutimento das amostras pode ser visto na Figura 61.

Figura 60 – Microscópio óptico



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 61 – Amostra material Microligado 30MnVS6 embutida no baquelite



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

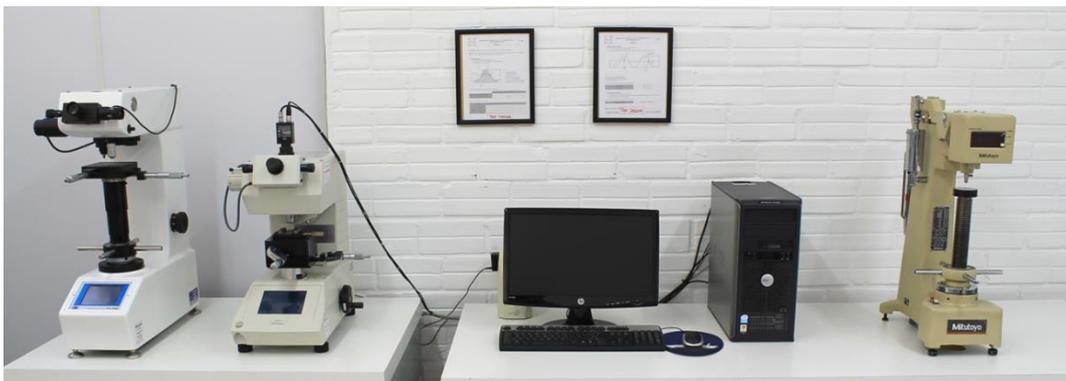
A norma ISO898-1:2013, estabelece que os materiais utilizados na fabricação dos parafusos devam possuir temperabilidade¹¹ suficiente, para garantir que na estrutura do núcleo da rosca, haja uma parcela de martensita de aproximadamente 90%, na condição temperado, antes do revenimento. Após o revenimento a microestrutura encontrada deve ser martensita revenida.

3.4.7 Ensaio de Dureza

Outra propriedade mecânica importante a se considerar é a dureza, que consiste em uma medida de resistência de um material a uma deformação plástica localizada. Para os ensaios de dureza superficial (escala Vickers HV), foram utilizados os durômetros de microdureza SHIMADZU modelo HMV-2T, com cargas podendo variar de 10 g até 2 Kgf, e o durômetro FUTURE TECH modelo FV700 com cargas de 300 g até 30 Kg. Todos os equipamentos citados estão localizados no laboratório de qualidade da MH. Os durômetros acima mencionados podem ser vistos na Figura 62.

¹¹ Temperabilidade é um termo usado para descrever a capacidade de um material de ser endurecido quando é exposto ao calor e, depois, ser arrefecido rapidamente.

Figura 62 – Estação de análise de dureza



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Segundo a norma ISO 898-1:2013, a medição da dureza de núcleo deve ser efetuada na seção transversal do parafuso, com distancia de pelo menos um diâmetro nominal até a extremidade do parafuso, no centro do raio. A carga aplicada mínima aplicada deve ser de 98 N, medidos em HV 10.

Para durezas na superfície a norma estabelece que os ensaios devam ser efetuados na extremidade do parafuso ou em uma superfície de contato para chave. O respectivo ponto só deve ser retificado ou polido levemente para o ensaio para que fiquem preservadas as propriedades originais da superfície e o ensaio deve ser realizado em HV 0,3 (força aplicada de 2,94 N).

Para estas conferências (dureza de núcleo e superficial), as peças foram embutidas no baquelite conforme mostra a Figura 60, sem o ataque químico de Nital. A dureza de núcleo foi medida em HV 10 e também em HV 0,3. Já a dureza superficial foi medida apenas em HV 0,3.

Para conferência de carbonetação das peças, existem dois métodos aplicáveis: através da dureza superficial, onde a ISO 898-1:2013 estabelece que esta não pode exceder 30 Vickers da dureza encontrada no núcleo, quando ambas forem medidas em HV 0,3, ou então, através do teste de dureza na seção longitudinal do parafuso, conforme a Figura 63, onde a dureza Vickers encontrada no ponto 3, deve ser menor ou igual a dureza Vickers encontrada no ponto 1, mais 30 [$HV(3) \leq HV(1) + 30$]. Um aumento de mais de 30 Vickers indica carbonetação. A força aplicada deve ser de 2,94 N (dureza Vickers HV 0,3).

A descarbonetação também pode ser checada através do ensaio de dureza para parafusos com passo de rosca maiores ou iguais a 1,25. A dureza Vickers deve ser determinada nos pontos 1 e 2 da Figura 63. A força aplicada deve ser de 2,94 N (dureza Vickers HV 0,3). Para que as

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir foram discutidos conforme o que estabelece a ISO 898-1:2013, que é direcionada a conformação de parafusos em aço-carbono ligado. Desta forma, para fins de comparação, as amostras fabricadas com o aço-carbono microligado 30MnVS6 seguiram a mesma normativa. As exigências da norma podem ser visualizadas através da Figura 32 e Quadro 3, localizadas no capítulo 2.6.3.

4.1 Análise da Composição Química dos Materiais

Os resultados da análise dos três materiais no espectrômetro estão dispostos no Quadro 11:

Quadro 11 – Composição química dos aços utilizados

Resultado Análise Química – % dos Elementos													
Elemento Químico	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	V	B	N
30MnVS6	0,3224	0,57818	1,3678	0,0153	0,0261	0,0367	0,1084	0,0146	0,0114	0,0202	0,09456	0,0008	-
PL22	0,2225	0,2877	1,1047	0,0195	0,0104	0,0211	0,1217	0,0083	0,0477	0,0202	0,0064	0,0027	-
PL41	0,4079	0,2949	0,7555	0,0163	0,0123	0,0251	1,1486	0,0029	0,0078	0,0255	0,007	0,0004	-

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Pelos resultados obtidos com a análise química dos materiais podemos concluir, comparando com o Quadro 3, que o material microligado 30MnVS6 atendeu os percentuais limites dos elementos químicos carbono (C), fósforo (P) e boro (B) estabelecidos pela ISO 898-1:2013, exceto o percentual de enxofre (S), que ficou fora do especificado para as classes de resistência 8.8 ou acima.

Conforme Chiaverini (2005), o excesso de enxofre (S) pode causar nos aços perdas de propriedades como alongamento, estrição, resistência ao impacto, soldabilidade e forjabilidade. Essa influência pôde ser observada nos resultados dos próximos ensaios. Cabe ressaltar que o equipamento utilizado para análise da composição química, no seu campo espectral, não detecta a presença do elemento Nitrogênio (N) presente nos materiais, e por isto, o valor encontrado foi nulo. Ainda, o aço microligado 30MnVS6 apresentou a composições

química desejada, com o Vanádio (V) como principal elemento microligante, em teores dentro do especificado pela norma DIN EN 10267.

Segundo Milbourn (1996), a presença do Manganês (Mn) em altas concentrações é fundamental para obter o endurecimento por solução sólida e promover uma combinação de resistência mecânica, dureza e ductilidade. Como esperado, o Manganês encontra-se em concentrações maiores que os elementos microligantes e também dentro do especificado pela norma DIN EN 10267.

A análise dos aços carbono ligados está de acordo com o especificado pela ISO 898-1:2013. Percebe-se que o PL41 é um aço-carbono ligado de maior concentração de carbono (C) (médio carbono e média liga) que o PL22 (baixo carbono e baixa liga), sendo assim, utilizado para fabricação de parafusos de maiores durezas. Além disto, como explica COSTA (2010), o PL22 por apresentar o elemento boro (B) em baixa concentração, possui maior temperabilidade que o aço PL41.

4.2 Análise Metalográfica

Através da análise microscópica pode-se caracterizar a microestrutura dos materiais utilizados. A Figura 64 apresenta a análise microestrutural do aço-carbono microligado 30MnVS6. Já as Figuras 65 e 66, apresentam as fotomicrografias dos aços-carbono ligados PL22 e PL41, respectivamente.

Figura 64 – Fotomicrografia do aço-carbono microligado 30MnVS6 (ampliação de 500 X)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 65– Fotomicrografia do aço-carbono ligado PL22 (ampliação de 500 X)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 66– Fotomicrografia do aço-carbono ligado PL41 (ampliação de 500 X)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Conforme pode ser visto na análise microestrutural dos materiais, o aço-carbono microligado 30MnVS6, não apresenta uma estrutura martensítica e sim uma estrutura ferrítica-perlítica, sendo assim, fora do que especifica a ISO 898-1:2013 para os materiais utilizados na conformação de parafusos de altas classes de resistência.

Para os aços-carbono ligados PL22 e PL41, a microestrutura encontrada é composta por martensita revenida, visto que estes materiais passaram pelo processo de têmpera e revenimento, atendendo as exigências da norma ISO 898-1:2013.

4.3 Conformação das Amostras

Após a simulação numérica, as amostras foram conformadas como pode ser observado nas Figuras 67 e 68, com os três diferentes materiais utilizados, e ambos com mesmas dimensões (Parafuso Sextavado M16, passo de rosca 2,0, de 55 mm de comprimento).

Figura 67 – Etapas do forjamento a frio das amostras com aço microligado 30MnVS6



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

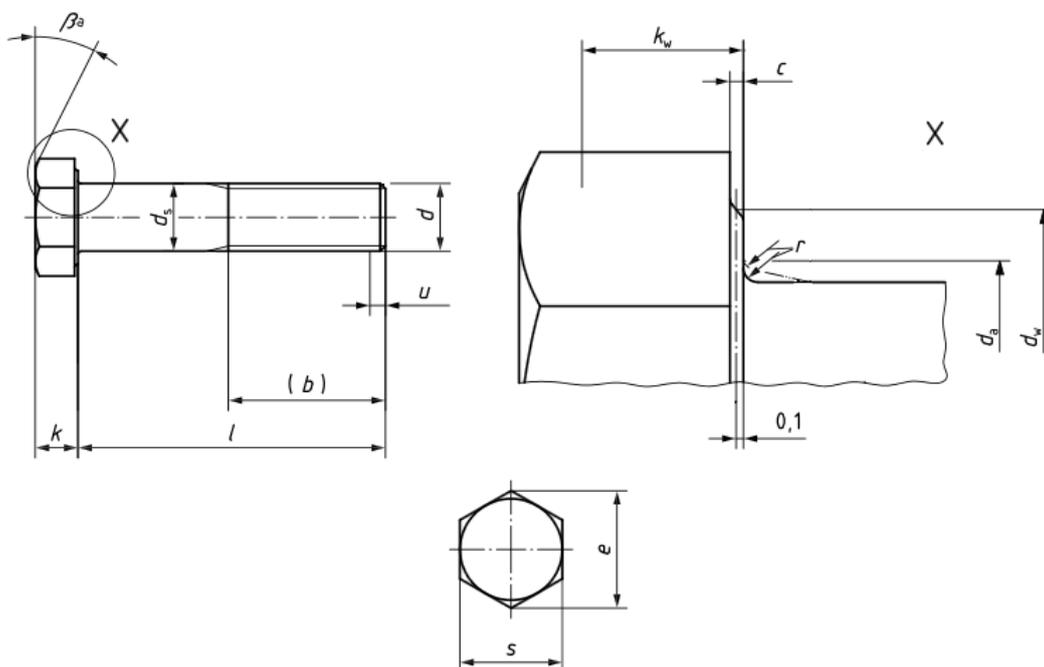
Figura 68 – Amostras produzidas com aço-carbono ligado PL41



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Os resultados dimensionais obtidos, conforme a norma ISO 4014:2011, estão expressos no Quadro 12, conforme as cotas da Figura 69.

Figura 69 – Dimensões parafuso sextavado conforme ISO4014:2011



Fonte: Do autor, adaptado de ISO 4014:2011 (2016).

Quadro 12 – Resultado dimensional das amostras

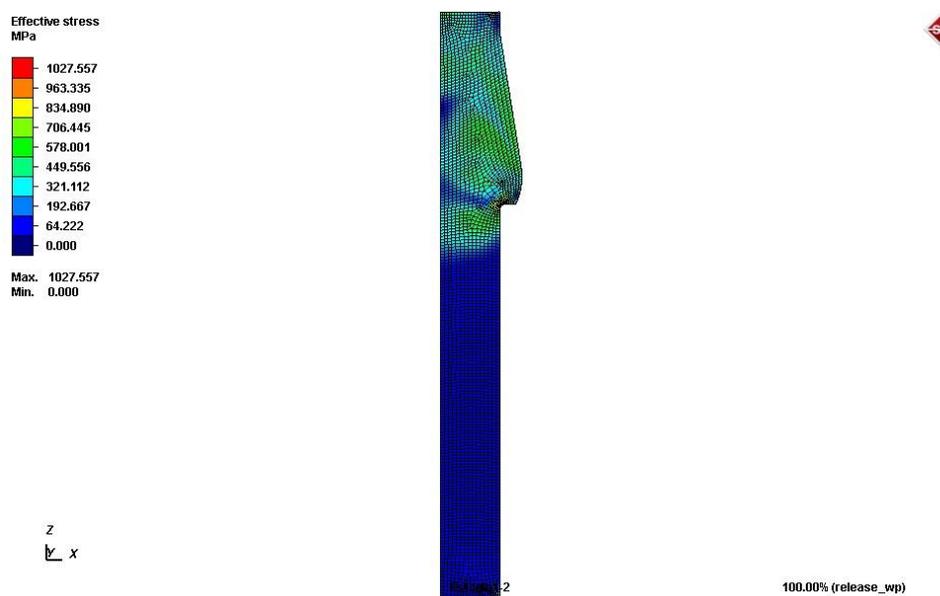
Controle Dimensional ISO 4014:2011 Paraf. Sextavado M16X2,0X55				
Característica	Valor Especificado	Valor Encontrado		
		30MnVS6	PL22	PL41
ROSCA	M16 X 2,0 – 6g	M16 X 2,0 – 6g	M16 X 2,0 – 6g	M16 X 2,0 – 6g
Ø FLANCOS:	14,50 – 14,66	14,52 - 14,53	14,52 - 14,52	14,51 - 14,52
Ø EXTERNO (d):	15,68 – 15,96	15,78 - 15,80	15,78 - 15,80	15,78 - 15,80
Ø CORPO (ds):	15,73 – 16,00	15,82 - 15,83	15,82 - 15,84	15,82 - 15,83
DIMENSÃO "da":	17,70 (máx.)	16,79 - 16,81	16,80 - 16,82	16,79 - 16,82
COMPRIMENTO DO PARAFUSO (l):	55,00 ±0,60	54,77 - 54,80	54,85 - 54,90	54,85 - 55,00
COMPRIMENTO DA ROSCA (b)	38,00 (nom)	37,77 - 38,30	37,80 - 38,30	38,00 - 38,30
CHANFRO DA ROSCA (u):	4,00 (máx.)	2,05 - 2,15	2,00 - 2,10	2,00 - 2,10
CHAVE DO SEXTAVADO (s):	23,67 – 24,00	23,85 - 23,90	23,85 - 23,87	23,85 - 23,89
CANTOS DO SEXTAVADO (e):	26,75 (mín.)	27,35 - 27,40	27,35 - 27,38	27,35 - - 27,38
ALTURA DA CABEÇA (k):	9,82 – 10,18	10,00 - 10,05	10,00 - 10,05	10,00 - 10,03
ALTURA PARCIAL DA CABEÇA (k _w):	6,87 (mín.)	8,07 - 8,15	8,10 - 8,13	8,10 - 8,15
Ø ARRUELA (d _w):	22,49 (mín.)	23,19 - 23,22	23,20 - 23,23	23,20 - 23,22
ALTURA DA ARRUELA (c):	0,20 – 0,80	0,25 - 0,30	0,25 - 0,30	0,25 - 0,30
ÂNGULO NA CABEÇA (β ^a):	15° – 30°	25°	25°	25°
RAIO ABAIXO DA CABEÇA (r):	0,6 (mín.)	0,8	0,8	0,8

Nota: Dimensões em milímetros (mm)

Fonte: Do autor, adaptado de ISO 4014:2011 (2016).

Através da análise computacional, os resultados de tensão efetiva em cada etapa da conformação também foram analisados. Na Figura 70 encontra-se o blank do primeiro estágio da conformação, com o material microligado 30MnVS6, e observa-se que os valores de tensão variam na peça conforme o índice de deformação ou encruamento. O maior valor de tensão está situado na parte inferior do cone (raio) e possui valor de 1027 MPa. Na parte do corpo do parafuso, não existe deformação, logo a tensão é nula. O mesmo acontece para o aço PL41, porém, os valores obtidos são menores, como pode ser visto através da Figura 71, onde a tensão máxima foi de 483 MPa.

Figura 70 – Níveis de tensão do blank do primeiro estágio (aço 30MnVS6)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

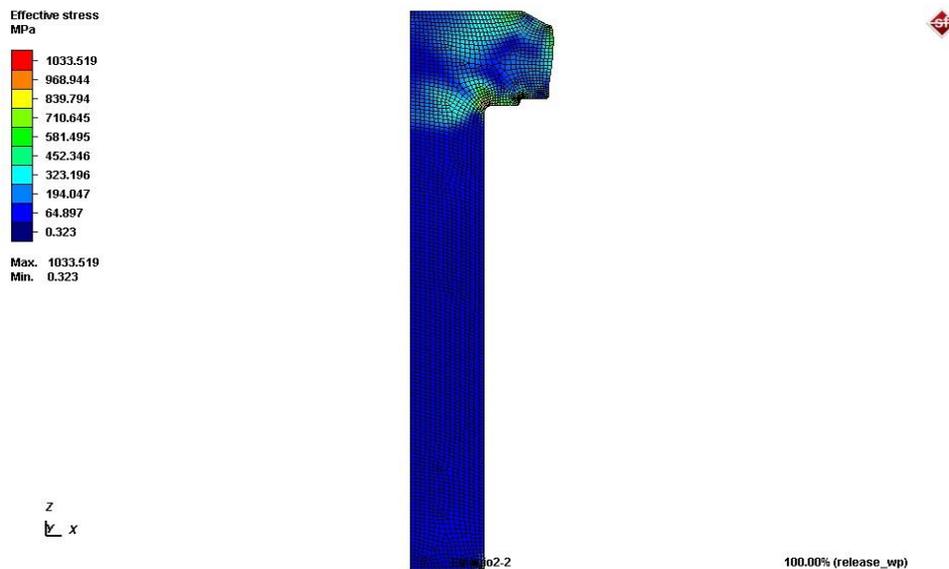
Figura 71 – Níveis de tensão do blank do primeiro estágio (aço PL41)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

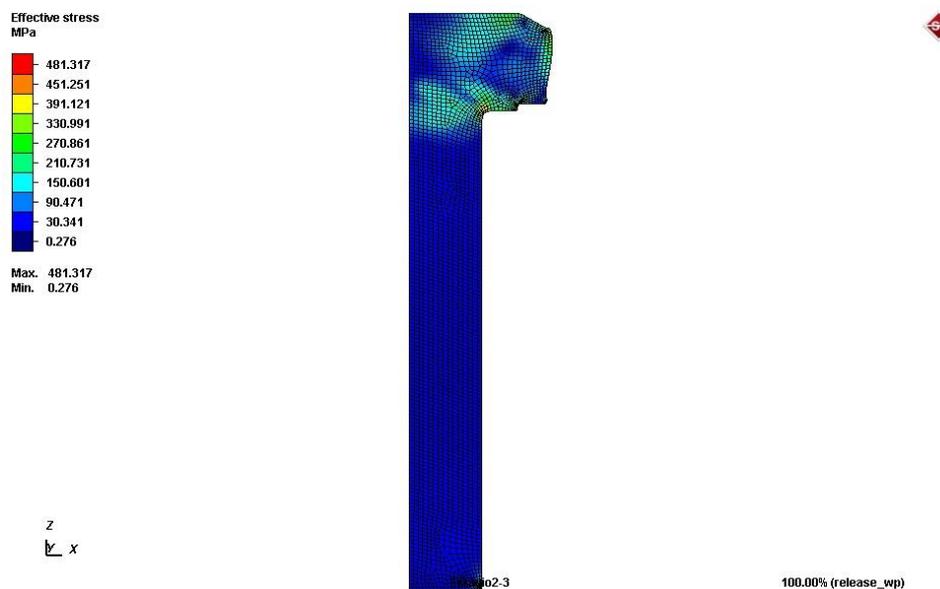
Os resultados da deformação do segundo estágio da conformação mecânica estão representados na Figura 72 para o aço microligado, cujo valor máximo de tensão atinge 1033 MPa e na Figura 73, para o aço-carbono ligado PL41, cujo valor máximo de tensão é de 481 MPa, ambas situadas no raio abaixo da cabeça do parafuso.

Figura 72 – Níveis de tensões do blank do segundo estágio (aço 30MnVS6)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 73 – Níveis de tensões do blank do segundo estágio (aço PL41)

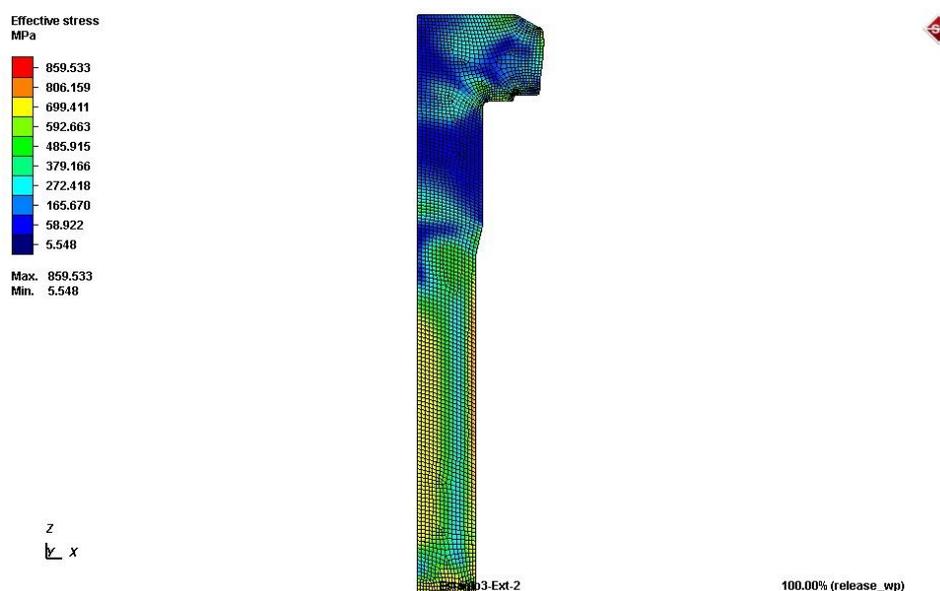


Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Já, resultados do terceiro estágio da conformação mecânica apontam níveis de tensão máxima de 859 MPa para o aço-carbono microligado 30MnVS6 (Figura 74), situado no raio abaixo da cabeça e na redução da seção da rosca.

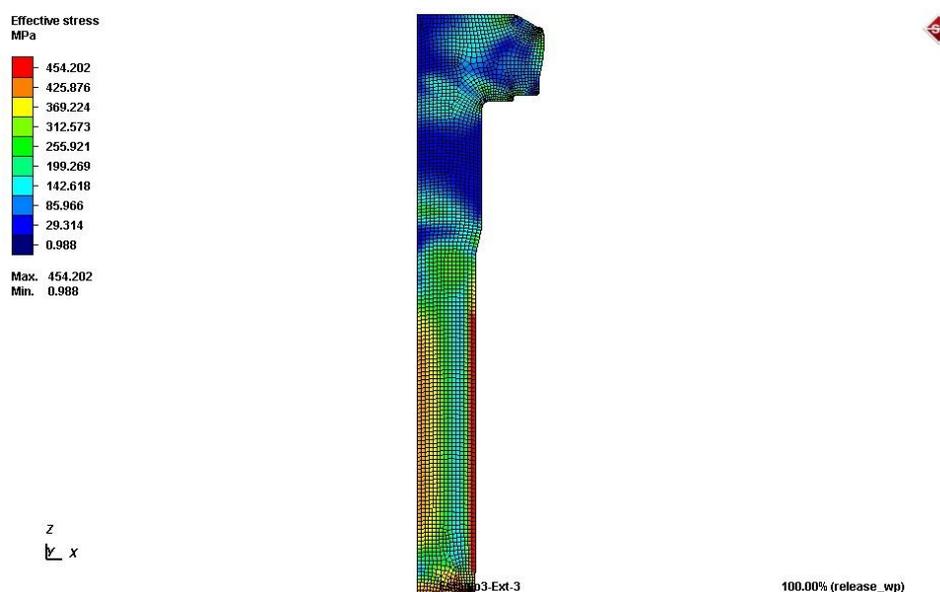
Através da Figura 75, pode-se observar que os valores de tensão para o aço PL41 são aproximadamente 50 % menores (454 MPa máx.) que os valores encontrados no material microligado, também situados no raio abaixo da cabeça e na redução da seção da rosca.

Figura 74 – Níveis de tensões do blank do terceiro estágio (aço 30MnVS6)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 75 – Níveis de tensões do blank do terceiro estágio (aço PL41)

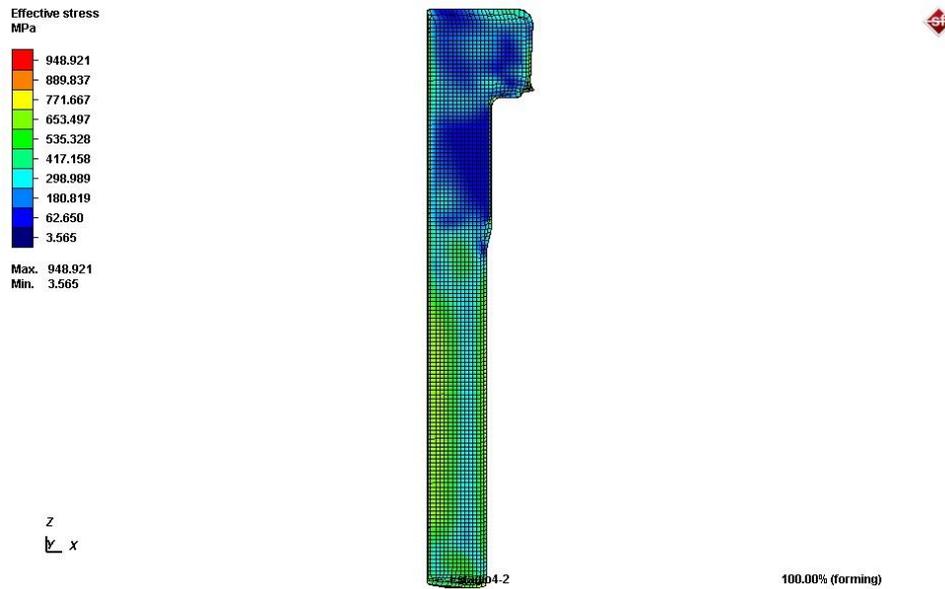


Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Por fim, para o aço microligado 30MnVS6, devido ao processo de recorte ou rebarbação do material, no quarto e último estágio da conformação mecânica obteve-se níveis de tensão de aproximadamente 948 MPa, na parte dos cantos da chave sextavada, como pode ser visualizado na Figura 76. Para o aço PL41, o valor máximo de tensão encontrado foi de 459 MPa,

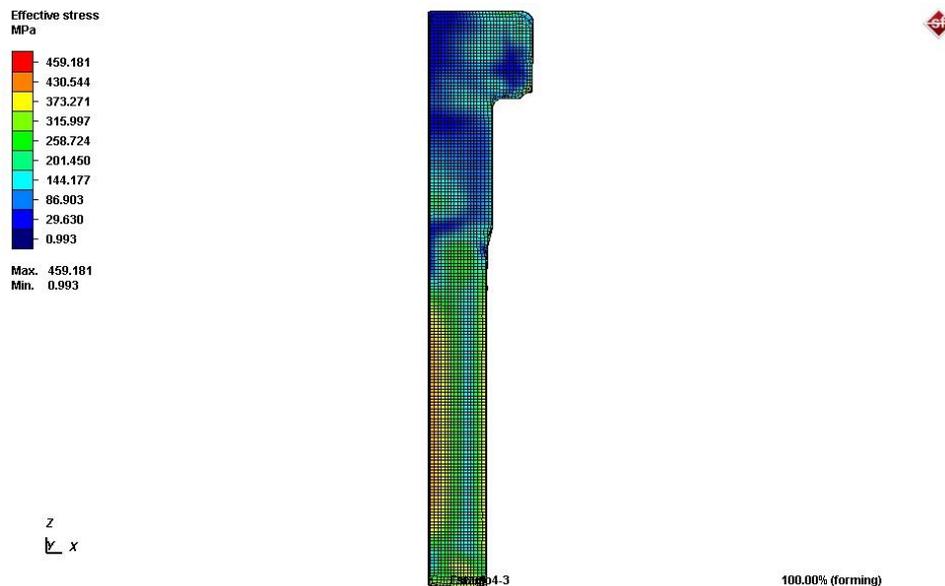
novamente, apresentando valores aproximadamente 50 % menores que o material microligado (Figura 77).

Figura 76 – Níveis de tensões do blank do quarto estágio (aço 30MnVS6)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 77 – Níveis de tensões do blank do quarto estágio (aço PL41)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Entende-se, através da análise das tensões efetivas do último estágio, que a maior concentração de tensões está situada na chave do parafuso sextavado e no raio abaixo da cabeça.

Estes níveis de tensões elevados podem estar relacionados com o encruamento do material, oriundo da deformação a frio das peças. Para os aços-carbono ligados PL22 e PL41, estas tensões tendem a ser eliminadas no tratamento térmico. Já, para o material microligado 30MnVS6, não teremos a eliminação dessas tensões, visto que, o mesmo não passará pelo processo de alívio de tensões, podendo assim, ter algum efeito quando submetidas a esforços mecânicos.

O Quadro 13 mostra os valores de força de estampagem obtidos com a simulação, necessária para forjar as amostras com os materiais 30MnVS6 e PL41.

Quadro 13 – Força de forjamento

Força de Forjamento (kN)				
Material	1º Estágio	2º Estágio	3º Estágio	4º Estágio
30MnVS6	70	200	14	8
PL41	37	96	7	4

Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Comparando os resultados de força de conformação obtidos para fabricação dos parafusos, necessita-se aproximadamente o dobro de força caso se utilize o aço-carbono microligado 30MnVS6. Com isto, pode-se concluir que o desgaste de ferramental tende a ser maior do que se utilizássemos os aços-carbono ligados PL22 ou PL41. É importante frisar que a vida útil também depende de outros fatores que não foram avaliados neste trabalho, como por exemplo, o tipo de lubrificação utilizado durante a conformação, o material utilizado na fabricação das matrizes (qualidade e tipo do aço-ferramenta), o tratamento térmico das ferramentas e sua condição de superfície, entre outros.

Também, se conclui que para deformações muito severas, podem ocorrer problemas como trincas no material ou até mesmo o mau preenchimento de material na cabeça dos parafusos. Este fato pode estar ligado com a presença do enxofre, encontrada na composição química do aço-carbono microligado, visto que, o mesmo influencia na diminuição da conformabilidade do material.

4.4 Ensaio de Tração

4.4.1 Resistência à Tração

Este ensaio foi realizado em cinco amostras para cada material, apresentando valores médios de resistência à tração e escoamento, conforme o Quadro 14 para o aço-carbono microligado e Quadros 15 e 16, para os aços-carbono ligados PL22 e PL41, respectivamente.

Quadro 14 – Valores médios de resistência à tração e escoamento aço 30MnVS6

Resistência à Tração e Escoamento Aço-carbono Microligado 30MnVS6 (N/mm ²)							
Amostras	1	2	3	4	5	Valor Médio	Desvio Padrão
Resistência à Tração	971,32	969,24	969,5	964,57	967,94	968,514	2,51
Resistência ao Escoamento	953,96	950,1	950,15	949,99	958,08	952,456	3,57

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Quadro 15 – Valores médios de resistência à tração e escoamento aço PL22

Resistência à Tração e Escoamento Aço-carbono Ligado PL22 (N/mm ²)							
Amostras	1	2	3	4	5	Valor Médio	Desvio Padrão
Resistência à Tração	929,73	921,15	933	922,71	912,57	923,83	7,97
Resistência ao Escoamento	893,44	888,08	902,42	896,69	881,21	892,37	8,12

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

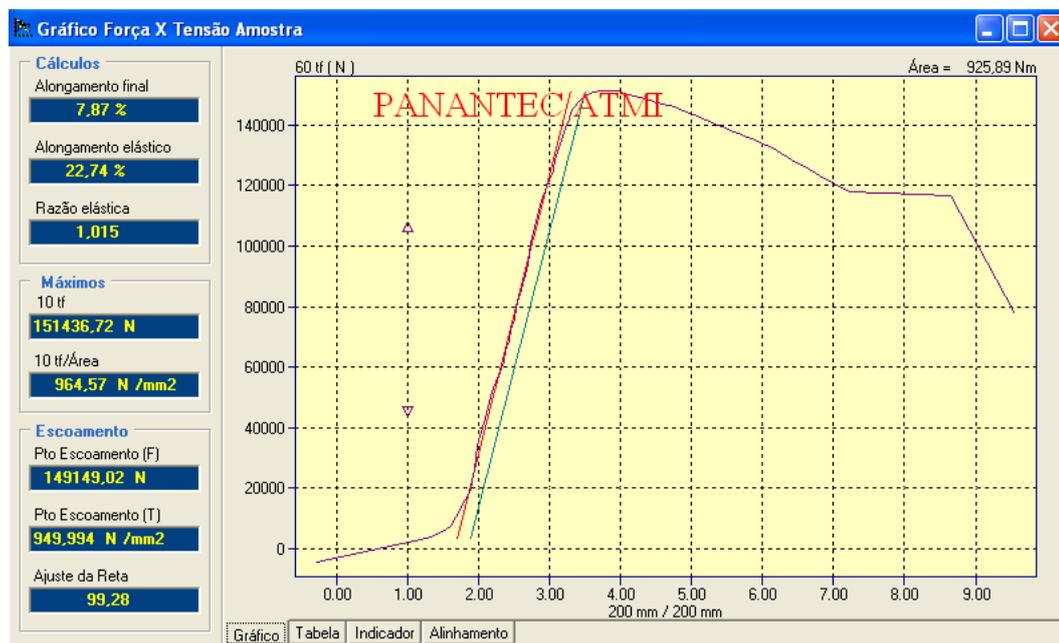
Quadro 16 – Valores médios de resistência à tração e escoamento aço PL41

Resistência à Tração e Escoamento Aço-carbono Ligado PL41 (N/mm ²)							
Amostras	1	2	3	4	5	Valor Médio	Desvio Padrão
Resistência à Tração	1129,92	1104,18	1109,54	1104,18	1086,5	1106,86	15,56
Resistência ao Escoamento	1089,83	1066,36	1069,54	1064,34	1037,97	1106,86	18,49

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

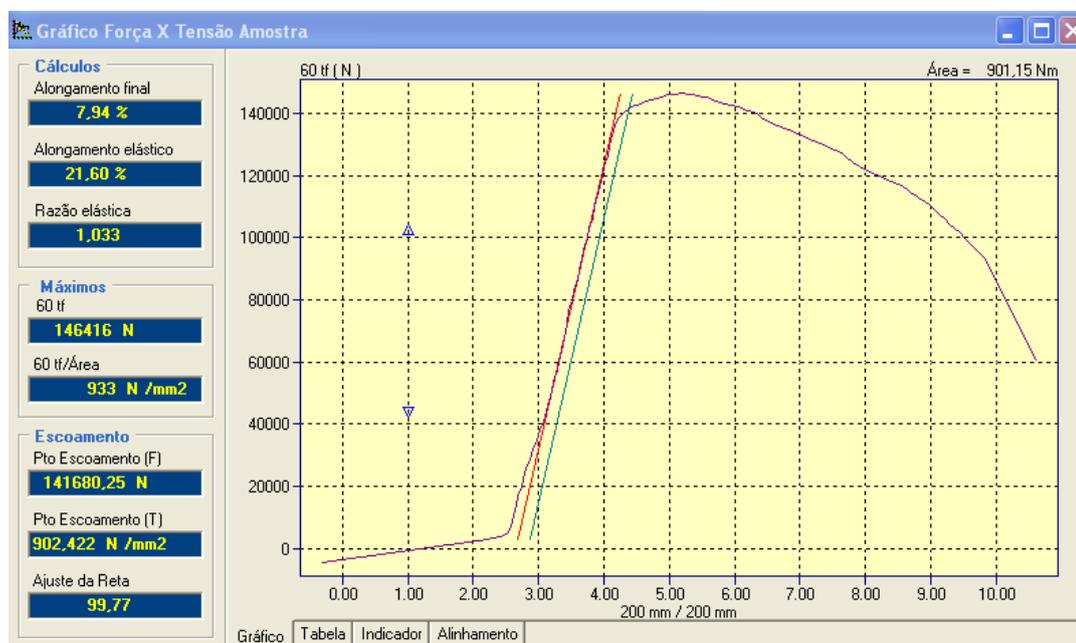
Alguns exemplos do padrão de curva tensão x deformação em área, obtido com o ensaio de tração, estão expressos na Figura 78 para o aço-carbono microligado 30MnVS6, e Figuras 79 e 80 para os aços-carbono ligados PL22 e PL41, respectivamente.

Figura 78 – Gráfico tensão x deformação para aço 30MnVS6 (Amostra 4)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 79 – Gráfico tensão x deformação para aço PL22 (Amostra 3)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

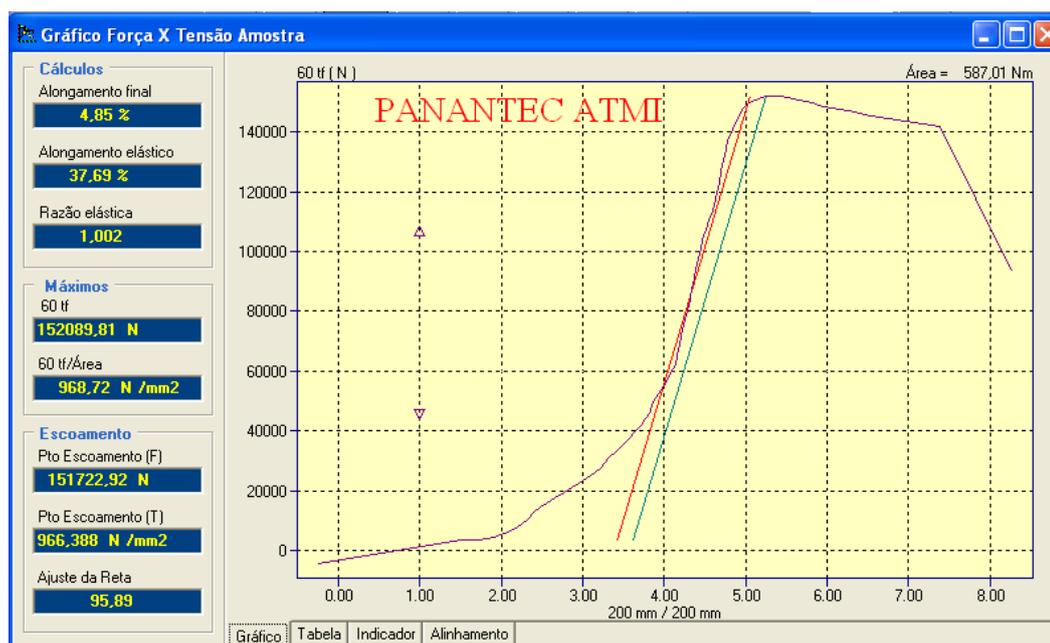
Quadro 17 – Resistência à tração Oblíqua (Inclinada)

Resistência à Tração Oblíqua (Inclinada) (N/mm ²)							
Amostras Nº	1	2	3	4	5	Valor Médio	Desvio Padrão
Aço 30MnVS6	968,72	963,53	963,01	959,63	952,87	961,552	5,84
Aço PL22	941,69	925,57	920,11	924,79	921,15	926,662	8,72
Aço PL41	1094,56	1120,3	1100,8	1089,1	1102,62	1101,476	11,80

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

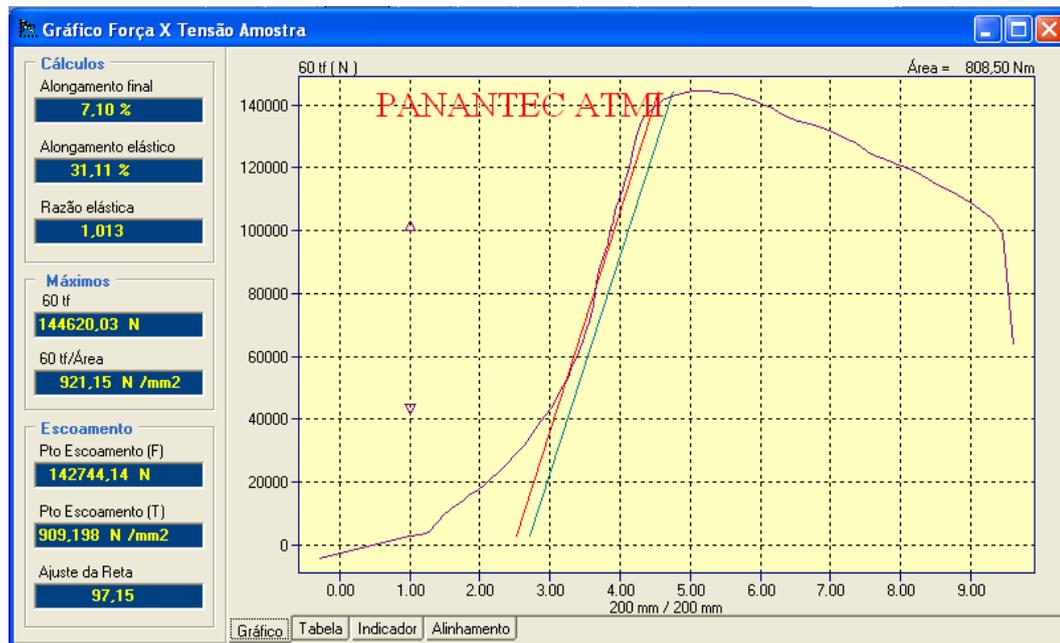
Os valores encontrados na tração inclinada também foram obtidos através de um gráfico de tensão x deformação em área, conforme mostra a Figura 81 para o aço-carbono microligado 30MnVS6, e Figuras 82 e 83 para os aços-carbono ligados PL22 e PL41, respectivamente.

Figura 81 – Gráfico tensão x deformação quando em tração oblíqua para aço 30MnVS6 (Amostra 1)



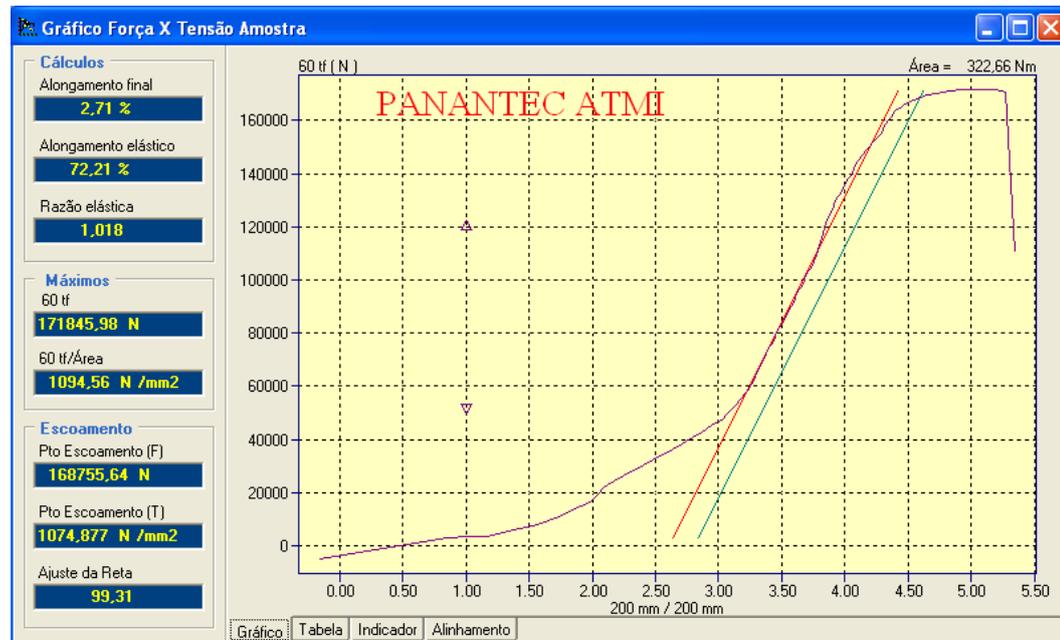
Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 82 – Gráfico tensão x deformação quando em tração oblíqua para aço PL22 (Amostra 5)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Figura 83 – Gráfico tensão x deformação quando em tração oblíqua para aço PL41 (Amostra 1)



Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Com os resultados obtidos, em paralelo com o que estabelece a norma ISO 898-1:2013 (Figura 32), atingiu-se a classe de resistência 9.8 para o material microligado 30MnVS6, durante a tração oblíqua. Os outros materiais, PL22 e PL41, atenderam às expectativas de resistência à tração conforme a temperatura de revenimento praticada no tratamento térmico (8.8 e 9.8 para o aço PL22 e 10,9 para o aço PL41).

4.4.3 Alongamento

O alongamento foi calculado, conforme a Equação 3, após o ensaio dos corpos de prova na máquina de tração. Os resultados para o aço microligado 30MnVS6 estão expressos no Quadro 18. Já, os resultados dos aços-carbono ligados PL22 e PL41 estão dispostos nos Quadros 19 e 20, respectivamente.

Quadro 18 – Alongamento para aço-carbono microligado 30MnVS6

Aço-Carbono Microligado 30MnVS6 – Alongamento							
Amostra N°	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Lo (mm)	30	30	30	30	30	30	0
Lf (mm)	32,79	32,6	32,38	32,65	32,54	32,592	0,15
Lf-Lo (mm)	2,79	2,6	2,38	2,65	2,54	2,592	0,15
Alongamento (%)	9,3	8,67	7,93	8,83	8,47	8,64	0,50

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Quadro 19 – Alongamento para aço-carbono ligado PL22

Aço-Carbono Ligado PL22 – Alongamento							
Amostra N°	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Lo (mm)	30	30	30	30	30	30	0
Lf (mm)	34,72	34,08	34,33	34,58	34,48	34,438	0,25
Lf-Lo (mm)	4,72	4,08	4,33	4,58	4,48	4,438	0,25
Alongamento (%)	15,73	13,6	14,43	15,27	14,93	14,792	0,82

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Quadro 20 – Alongamento para aço-carbono ligado PL41

Aço-Carbono Ligado PL41 – Alongamento							
Amostra N°	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Lo (mm)	30	30	30	30	30	30	0
Lf (mm)	33,06	33,62	33,19	33,35	33,43	33,33	0,22
Lf-Lo (mm)	3,06	3,62	3,19	3,35	3,43	3,33	0,22
Alongamento (%)	10,2	12,07	10,63	11,17	11,43	11,1	0,72

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Conforme o especificado pela norma ISO 898-1:2013, através da Figura 32, o aço-carbono microligado 30MnVS6 não atende aos percentuais de alongamento desejados para as classes de resistência 8.8 até 9.8. Como visto por Chiaverini (2005), estes valores têm relação com a presença excessiva de enxofre (S) na composição química do aço microligado, que decresce a propriedade de alongamento e mostra a baixa ductilidade deste material.

Os valores encontrados para os aços-carbono PL22 e PL41, ficaram dentro do esperado e encontram-se dentro do especificado pela norma ISO 898-1:2013, para as classes de resistência na qual foram revenidos (8.8 e 9.8 para o PL22 e 10.9 para o PL41).

4.4.4 Estricção

A estricção foi calculada através da Equação 2, após o ensaio dos corpos de prova na máquina de tração. Os resultados para o aço microligado 30MnVS6 estão expressos no Quadro 21. Já, os resultados dos aços-carbono ligados PL22 e PL41 estão dispostos nos Quadros 22 e 23, respectivamente.

Quadro 21 – Estricção para aço-carbono microligado 30MnVS6

Aço-Carbono Microligado 30MnVS6 – Estricção							
Amostra N°	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Do (mm)	5,04	5	4,96	5,02	5,01	5,01	0,03
Df (mm)	3,22	3,24	3,21	3,23	3,22	3,22	0,01
Do - Df (mm)	1,82	1,76	1,75	1,79	1,79	1,78	0,03
Estricção (%)	36,11	35,2	35,28	35,66	35,73	35,60	0,37

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Quadro 22 – Estricção para aço-carbono ligado PL22

Aço-Carbono Ligado PL22 – Estricção							
Amostra N°	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Do (mm)	5	5,04	4,96	5,03	4,98	5,00	0,03
Df (mm)	2,38	2,34	2,37	2,32	2,35	2,35	0,02
Do - Df (mm)	2,62	2,7	2,59	2,71	2,63	2,65	0,05
Estricção (%)	52,4	53,57	52,22	53,88	52,81	52,98	0,72

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Quadro 23 – Estricção para aço-carbono ligado PL41

Aço-Carbono Ligado PL41 – Estricção							
Amostra N°	1	2	3	4	5	Média	Desvio Padrão
Do (mm)	4,97	5,05	4,97	5,02	5	5,00	0,03
Df (mm)	2,54	2,55	2,57	2,58	2,56	2,56	0,02
Do - Df (mm)	2,43	2,5	2,4	2,44	2,44	2,44	0,04
Estricção (%)	48,89	49,5	48,29	48,61	48,8	48,82	0,45

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Assim como o alongamento, conforme o que especifica a norma ISO 898-1:2013 na Figura 32, o aço-carbono microligado 30MnVS6 não atende aos percentuais de estricção desejados para as classes de resistência 8.8 até 12.9. Estes valores baixos de estricção obtidos novamente provam a baixa ductilidade deste material.

Da mesma forma, o enxofre adicional (S) encontrado na composição química do material microligado, influencia diretamente na redução da propriedade de estricção.

Os valores encontrados para os aços-carbono PL22 e PL41 situam-se dentro do especificado pela norma ISO 898-1:2013, para as classes de resistência na qual foram revenidos (8.8 e 9.8 para o PL22 e 10.9 para o PL41).

4.4.5 Proof Load (Ensaio de Carga de Prova)

Os resultados obtidos para cada tipo de aço, conforme ensaio de carga de prova realizado pelo laboratório SGS Labmat, estão expressos nos Quadros 24, 25 e 26.

Quadro 24 – Ensaio de carga de prova (Proof Load) aço 30MnVS6

Proof Load - Aço-carbono microligado 30MnVS6		
Amostra N°	Força Máxima Aplicada (N)	Deformação Permanente (µm)
1	102000	0
2	102000	0

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Quadro 25 – Ensaio de carga de prova (Proof Load) aço PL22

Proof Load - Aço-carbono ligado PL22		
Amostra N°	Força Máxima Aplicada (N)	Deformação Permanente (µm)
1	91000	0
2	91000	0

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Quadro 26 – Ensaio de carga de prova (Proof Load) aço PL41

Proof Load - Aço-carbono ligado PL41		
Amostra N°	Força Máxima Aplicada (N)	Deformação Permanente (µm)
1	130000	0
2	130000	0

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Como pode ser visto com os resultados, comparando com a Figura 32, o aço microligado 30MnVS6 apresentou resistência a deformação maior que o aço PL22, pois resistiu a uma força de 102.000 N (classe de resistência 9.8) sem apresentar deformação permanente, enquanto a força máxima aplicada para o aço-carbono ligado PL22 foi de 91.000 N (classe de resistência 8.8).

Como previsto, o aço-carbono PL41 se mostrou mais dúctil entre os três materiais ensaiados, pois resistiu a uma força aplicada de 130.000 N (classe de resistência 10.9) sem apresentar deformação permanente.

4.5 Ensaio de Dureza

Os resultados encontrados com o ensaio estão descritos no Quadro 27.

Quadro 27 – Valores médios de dureza de núcleo

Dureza de Núcleo Encontrada							
Amostras N°	1	2	3	4	5	Valor Médio	Desvio Padrão
Dureza de Núcleo 30MnVS6 (HV10)	285	294	309	292	295	295	8,75
Dureza de Núcleo PL22 (HV10)	317	312	319	305	320	314,6	6,19
Dureza de Núcleo PL41 (HV10)	353	359	357	353	357	355,8	2,68

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Com o resultado obtido, percebe-se que o material microligado 30MnVS6 apresenta uma dureza elevada o suficiente para atingir a classe de resistência 9.8, conforme especifica a ISO 898-1:2013 através da Figura 32.

Os valores encontrados para os aços-carbono PL22 e PL41 situam-se dentro do especificado pela norma ISO 898-1:2013, para as classes de resistência na qual foram revenidos (8.8 e 9.8 para o PL22 e 10.9 para o PL41).

4.6 Ensaio de Impacto (Charpy)

Os resultados do ensaio de impacto podem ser vistos através da Figura 84, para o aço-carbono microligado 30MnVS6, e Figuras 85 e 86, para os aços-carbono ligados PL22 e PL41, respectivamente.

Figura 84 – Resultado ensaio de impacto aço 30MnVS6

1. Ensaio de impacto: Aço 30MnVS6	
Corpo de prova	Resultados Obtidos em Joules
CP1	18
CP2	16
CP3	16
Média	17

Temperatura de Ensaio: -20°C / Especificado: 27J min (INDIVIDUAL).

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Figura 85 – Resultado ensaio de impacto aço PL22

1. Ensaio de impacto: Aço PL22

Corpo de prova	Resultados Obtidos em Joules
CP1	18
CP2	16
CP3	18
Média	17

Temperatura de Ensaio: -20°C / Especificado: 27 J min (INDIVIDUAL).

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Figura 86 – Resultado ensaio de impacto aço PL41

1. Ensaio de impacto: Aço PL41

Corpo de prova	Resultados Obtidos em Joules
CP1	140
CP2	138
CP3	130
Média	136

Temperatura de Ensaio: -20°C / Especificado: 27 J min (INDIVIDUAL).

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Conforme os resultados obtidos, observa-se que o aço-carbono microligado 30MnVS6, assim como também o aço-carbono ligado PL22, não atenderam as especificações de impacto da norma ISO 898-1:2013. Já, o aço-carbono PL41 mostrou-se mais resistente ao impacto, atendendo as especificações da norma de no mínimo 27 J de resistência ao impacto.

Estes resultados provam a baixa tenacidade do aço 30MnVS6 e PL22 quando submetidos a impactos a -20 °C. Segundo Chiaverino (2010), o enxofre (S) presente na composição química de ambos os materiais, é um dos motivos da redução da resistência ao impacto. O Fósforo (P), presente em maior percentual no aço-carbono ligado PL22 também tem grandes influencias na perda desta propriedade.

O aço PL41, para sua classe de resistência, apresentou melhor absorção de energia, sendo assim, mais tenaz que os outros aços ensaiados. Vale lembrar, que para temperaturas ambientes estes valores sofrem alteração.

4.7 Ensaio de Fadiga

Conforme ensaio de fadiga realizado pelo método staircase, os resultados dos testes podem ser visualizados através dos quadros gerados. No Figura 87, encontram-se os valores obtidos para o aço-carbono microligado 30MnVS6. Já as Figuras 88 e 89, mostram os valores obtidos para os aços-carbono ligados PL22 e PL41, respectivamente.

Figura 87 – Resultado staircase para aço-carbono microligado 30MnVS6

1	2										3	4	5	6	7	8	
F _A (kN)	x Falha					o Não Falha					x	o	z	f	zf	z ² f	
12,04			x		x							2	0	3	2	6	18
11,94		o		o		x		x				2	2	2	2	4	8
11,84	o						o		x		o	1	3	1	1	1	1
11,74										o		0	1	0	0	0	0
Amostra Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
Somatório das colunas 3, 4, 6, 7 e 8												5	6	-	5	11	27
															C	A	E

Fonte: Do autor, adaptado de ISO 3800:1993

Figura 88 – Resultado staircase para aço-carbono ligado PL22

1	2										3	4	5	6	7	8	
F _A (kN)	x Falha					o Não Falha					x	o	z	f	zf	z ² f	
10,54			x						x			2	0	2	2	4	8
10,44		o		x		x		o		x		3	2	1	3	3	3
10,34	o				o		o				o	0	4	0	0	0	0
Amostra Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11						
Somatório das colunas 3, 4, 6, 7 e 8												5	6	-	5	7	11
															C	A	E

Fonte: do autor, adaptado de ISO 3800:1993

Figura 89 – Resultado staircase para aço-carbono ligado PL41

1	2										3	4	5	6	7	8
F_A (kN)	x Falha					o Não Falha					x	o	z	f	zf	z ² f
10,74								x			1	0	3	1	3	9
10,64					x		o		x		2	2	2	2	4	8
10,54		x		o			o			o	1	3	1	1	1	1
10,44	o		o								0	2	0	0	0	0
Amostra Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11					
Somatório das colunas 3, 4, 6, 7 e 8											4	7	-	4	8	18
														C	A	E

Fonte: do autor, adaptado de ISO 3800:1993

Através da Equação 6, chegou-se aos seguintes valores de carga dinâmica média para 50 % de probabilidade de sobrevivência das peças (F_{A50}), conforme Quadro 28.

Quadro 28 – Resultado cargas dinâmicas para 50 % probabilidade de sobrevivência das peças.

Material	F_{ao} (kN)	ΔF_{AII} (kN)	A	C	X	F_{A50} (kN)
30MnVS6	11,74	0,1	11	5	- 0,5	11,91
PL22	10,34	0,1	7	5	- 0,5	10,43
PL41	10,44	0,1	8	4	- 0,5	10,59

Fonte: do autor (2016)

O desvio padrão $S(F_A)$ da carga dinâmica média para 50 % de probabilidade de sobrevivência das peças também foi calculado para todos os materiais testados, conforme Equação 7. O Quadro 29 expressa estes resultados.

Quadro 29 – Desvio padrão das cargas dinâmicas para 50 % probabilidade de sobrevivência das peças.

Material	ΔF_{AII} (kN)	A	C	E	$S(F_A)$ (kN)
30MnVS6	0,1	11	5	27	0,095
PL22	0,1	7	5	11	0,044
PL41	0,1	8	4	18	0,086

Fonte: do autor (2016)

Utilizando-se métodos estatísticos foi possível calcular, através da Equação 8, a carga dinâmica média para 99 % de probabilidade de sobrevivência das peças (F_{A99}). Estes valores estão expressos no Quadro 30.

Quadro 30 – Resultado cargas dinâmicas para 99 % probabilidade de sobrevivência das peças.

Material	F_{A50} (kN)	T	S(F_A) (kN)	F_{A99} (kN)
30MnVS6	11,91	2,764	0,095	11,65
PL22	10,43	2,764	0,044	10,30
PL41	10,59	2,764	0,086	10,35

Fonte: do autor (2016)

Conforme os resultados obtidos, pode-se concluir, quando comparando o aço-carbono microligado 30MnVS6 com o aço-carbono ligado PL22 (que possuem a mesma carga estática), que o microligado resiste a uma carga dinâmica superior ao PL22, em aproximadamente 13 %.

Entretanto, percebe-se conforme a Figura 90 abaixo que os parafusos produzidos com aço microligado sempre romperam na região abaixo da cabeça, enquanto que os parafusos produzidos com o aço PL22 sempre romperam no primeiro filete de rosca engajado, condição esta, mais esperada devido à distribuição dos esforços do teste (KLOSS & THOMALA, 1979).

Figura 90 – Falha por fadiga 30MnVS6 x PL22



Fonte: do autor (2016)

Isto se deve, possivelmente, aos valores de concentração de tensão mais elevados encontrados na região da cabeça durante a conformação do parafuso, como pode ser observado com os resultados das simulações computacionais previamente expostas. A falha na região da cabeça não ocorreu nos aços carbono ligados, pois os mesmos passaram pelo processo de tratamento térmico que contempla a etapa de revenimento, a qual diminui esta concentração de tensão.

Quanto aos resultados obtidos para o aço-carbono ligado PL41, o mesmo mostrou desempenho similar ao PL22 no que se refere à carga dinâmica. Entretanto, por se tratar de parafusos temperados e revenidos para a classe de resistência 10.9, o material foi submetido a uma carga estática maior do que os demais aços ensaiados, que sugere sua aplicação para juntas que necessitem uma maior força de aperto.

4.8 Resultados Gerais

O Quadro 31 resume todos os resultados dos ensaios encontrados, para o aço 30MnVS6, quando comparado com as exigências da norma ISO 898-1:2013. Os aços PL22 e PL41, atenderam o especificado pela ISO 898-1:2013, exceto o ensaio de charpy, que para o aço PL22 ficou fora do mínimo especificado. Por não se tratar de um ensaio obrigatório exigido pela norma, as discussões ficaram apenas em cima do aço carbono microligado 30MnVS6.

Quadro 31 – Resultados gerais aço-carbono microligado 30MnVS6

Resultados Gerais Aço-Carbono Microligado 30MnVS6		
Propriedade Física ou Mecânica	Atende/Não atende ISO 898-1:2013	Comentários
Composição Química	Não atende	O percentual de Enxofre (S) ficou fora do especificado.
Metalografia	Não atende	O aço microligado não apresenta microestrutura martensítica, e sim, ferrítica-perlítica.
Resistência à Tração	Atende Plenamente	Valor médio de resistência à tração 968,50 N/mm ² .
Resistência ao Escoamento	Atende Plenamente	Valor médio de resistência ao escoamento 952,45 N/mm ² .
Resistência à Tração Oblíqua	Atende Plenamente	Valor médio de resistência à tração oblíqua 961,55 N/mm ² .
Alongamento	Não atende	Valores de alongamento ficaram abaixo do especificado para todas as classes.
Estricção	Não atende	Valores de estricção ficaram abaixo do especificado para todas as classes.
Proof Load	Atende Plenamente	Resistiu a forças aplicadas para as classes 9.8 sem apresentar deformação permanente.
Dureza de Núcleo	Atende Plenamente	O aço microligado apresentou dureza elevada suficiente para atingir a classe de resistência 9.8
Carbonetação	Atende Plenamente	Este material não apresentará carbontação, pois não passa pelo processo de tratamento térmico.
Descarbonetação	Atende Plenamente	Este material não apresentará descarbonetação, pois não passa pelo processo de tratamento térmico.
Resistência ao Impacto	Não atende	O material não resistiu os 27 J mínimos especificados pela norma para as altas classes de resistência.
Fadiga	Não Aplicável	Apesar da norma ISO 898-1 não especificar valores de resistência a fadiga, o aço microligado se mostrou 13 % mais resistente quando comparado a parafusos da classe de resistência mecânica 8.8.

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

4.9 Análise Preliminar de Viabilidade Econômica

O grande benefício desse tipo de análise é conseguir identificar através de projeções e números o real potencial de retorno do investimento em questão e, portanto, definir se o projeto deve ir adiante ou não.

Como pode ser visto com os resultados dos ensaios realizados, o aço-carbono microligado 30MnVS6 não atendeu todas as propriedades mecânicas estabelecidas pela norma ISO 898-1:2013 para a classe de resistência 8.8.

Para a análise de viabilidade econômica se aproximar da realidade da empresa supõe-se que o aço-carbono microligado 30MnVS6 poderia substituir o aço-carbono ligado PL22, sem a necessidade do tratamento térmico, em casos especiais, onde a aplicação não exigir determinada característica para a classe de resistência 8.8, salvo prévia informação ao cliente.

Sendo assim, a Metalúrgica Hassmann produz em média 1500 toneladas de parafusos por mês. Desta quantia, 40 % equivalem a parafusos de classe de resistência 8.8, ou seja, 600 toneladas. Destas 600 toneladas, 50 % equivalem a casos especiais, onde o aço-carbono microligado 30MnVS6 poderia ser utilizado, totalizando 300 toneladas.

O preço médio do aço-carbono ligado PL22 gira em torno de 4,19 R\$ / Kg. Já para o aço-carbono microligado 30MnVS6, temos o preço médio de 4,86 R\$ / Kg. O custo do processo de tratamento térmico é de 4,00 R\$ / Kg. A partir destes dados obtém-se o Quadro 32.

Quadro 32 – Análise de Viabilidade Econômica

Análise Viabilidade Econômica					
Aço	Consumo por mês (Kg)	Preço do Kg Aço	Preço Tratamento Térmico por Kg	Preço Final em Kg	Custo por mês (R\$)
PL22	300000	4,19	4,00	8,19	2.457.000,00
30MnVS6	300000	4,86	N/A	4,86	1.458.000,00

Fonte: Arquivo Metalúrgica Hassmann S.A (2016).

Os resultados acima mostram que para adquirir e processar o aço no tratamento térmico, a empresa gasta 59 % a mais do que se utilizasse o aço-carbono microligado 30MnVS6 sem a necessidade de tratar termicamente. Este valor equivaleria a uma economia de aproximadamente 1.000.000,00 reais por mês.

Com os valores obtidos, é totalmente viável a utilização do aço-carbono microligado 30MnVS6 para fabricação de parafusos de classe 8.8, em casos onde não se necessita atingir todas as propriedades mecânicas estabelecidas pela ISO 898-1.

5. CONCLUSÃO

Em virtude dos resultados obtidos com os ensaios físicos e mecânicos realizados neste trabalho, pode-se concluir que o aço-carbono microligado 30MnVS6 é caracterizado por ser um material de baixa ductilidade e de baixa tenacidade. Como consequência disto, as propriedades físicas e mecânicas estabelecidas pela norma ISO 898-1:2013, para a fabricação a frio de parafusos, não foram plenamente atendidas e por isso, o aço-carbono microligado 30MnVS6 não pode ser usado para substituir completamente todas as classes de resistência 8.8 e 9.8.

Conclui-se também, que o enxofre (S) encontrado em concentrações superiores do que especifica a norma ISO 898-1:2013 é um dos motivos para os baixos valores nas propriedades mecânicas de alongamento, estrição e resistência ao impacto.

Além disto, a conformabilidade deste material também é outro fator que dificulta sua utilização, pois as simulações mostraram a necessidade de uma maior força de estampagem para conformação das amostras. Este dado pode indicar um maior desgaste de ferramental e também uma limitação quanto à severidade de deformações.

Quanto às vantagens, para os valores obtidos em resistência à tração, resistência ao escoamento, resistência à tração oblíqua, resistência à carga de prova (proof load), e dureza, o aço microligado desempenhou resultados acima do que estabelece a norma para classe de resistência 8.8. As cargas dinâmicas suportadas pelo material microligado 30MnVS6 durante o ensaio de resistência a fadiga, também tiveram um desempenho superior aos outros materiais testados.

Quando analisamos seu custo financeiro, também se verificou uma considerável oportunidade, já que o mesmo não necessita de tratamento térmico para alcançar estas propriedades físicas e mecânicas mencionadas, reduzindo o custo do processo geral.

Por fim, conclui-se que, para utilização do material microligado 30MnVS6 ser viabilizada na conformação a frio de parafusos sem o processo de tratamento térmico, todos estes fatores devem ser levados em consideração e devem ser tratados previamente com o cliente para que seu desempenho mecânico não venha a ocasionar problemas durante a aplicação dos componentes.

6. ANEXOS

ANEXO A - Encruamento, Carbonetação e Descarbonetação

A carbonetação assim como a descarbonetação são propriedades características de peças tratadas termicamente após a conformação. Portanto, os parafusos fabricados com aço microligado 30MnVS6 não sofrem estes fenômenos.

Para verificação da influência do encruamento nas durezas de núcleo e superfície das peças forjada com o material 30MnVS6, o ensaio foi realizado igualmente. No Quadro 33 estão os resultados da dureza encontrados nas amostras fabricadas com aço-carbono microligado. Já os Quadros 34 e 35, apresentam os resultados de dureza encontrados nas amostras produzidas com os aços carbono ligados PL22 e PL41, respectivamente.

Quadro 33 – Método da dureza superficial para o aço 30MnVS6

Método da Dureza Superficial						
Amostras N°	1	2	3	4	5	Valor Médio
Dureza de Núcleo 30MnVS6 (HV0,3)	292	297	285	302	311	297
Dureza de Superfície 30MnVS6 (HV0,3)	356	336	343	353	341	346
Diferença Dureza Superficial - Dureza de Núcleo (HV0,3)	64	39	58	51	30	49

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Quadro 34 – Carbonetação pelo método da dureza superficial para o aço PL22

Carbonetação pelo Método da Dureza Superficial						
Amostras Nº	1	2	3	4	5	Valor Médio
Dureza de Núcleo PL22 (HV0,3)	313	328	315	317	319	318
Dureza de Superfície PL22 (HV0,3)	310	305	319	324	295	311
Diferença Dureza Superficial - Dureza de Núcleo (< 30 Vickers)	-3	-23	4	7	-24	NA
Carbonetação	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NA

Fonte: do autor, adaptado de ISSO 898-1:2013

Quadro 35 – Carbonetação pelo método da dureza superficial para o aço PL41

Carbonetação pelo Método da Dureza Superficial						
Amostras Nº	1	2	3	4	5	Valor Médio
Dureza de Núcleo PL41 (HV0,3)	358	351	358	356	360	357
Dureza de Superfície PL41 (HV0,3)	353	349	358	353	351	353
Diferença Dureza Superficial - Dureza de Núcleo (< 30 Vickers)	-5	-2	0	-3	-9	NA
Carbonetação	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NA

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

Através da análise dos resultados, percebemos que os aços PL22 e PL41 não se encontram carbonetados, pois a diferença entre as durezas medidas na superfície, em comparação com a dureza encontrada no núcleo, é menor que 30 Vickers.

Através destes resultados é possível concluir também, que o aço microligado 30MnVS6 apresentou dureza de superfície maior do que a encontrada no núcleo. Isto se deve ao fenômeno do encruamento do material na ponta do parafuso, devido ao cisalhamento do arame durante a operação de corte.

A descarbonetação foi medida através do método dos pontos, conforme manda a norma ISO 898-1:2013. Novamente, por não utilizar do processo de tratamento térmico após a conformação, o aço microligado 30MnVS6 não apresenta descarbonetação. Para os aços-carbono ligados PL22 e PL41, os resultados encontrados estão expressos nos quadros 36 e 37 respectivamente. Como pode ser visto os materiais não apresentaram descarbonetação.

Quadro 36 – Descarbonetação pelo método da dureza de pontos para aço-carbono ligado PL22

Descarbonetação - Dureza de Pontos [HV(2) ≥ HV(1) -30]					
Amostras	1	2	3	4	5
PL22 PTO 1 (HV 0,3)	324	309	302	315	316
PL22 PTO 2 (HV 0,3)	326	311	307	315	321
HV(1) - 30	294	279	272	285	286
[HV(2) ≥ HV(1) -30]	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Descarbonetação	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

Fonte: do autor, adaptado de ISSO 898-1:2013

Quadro 37 – Descarbonetação pelo método da dureza de pontos para o aço-carbono ligado PL41

Descarbonetação - Dureza de Pontos [HV(2) ≥ HV(1) -30]					
Amostras	1	2	3	4	5
PL41 PTO 1 (HV 0,3)	360	367	347	354	359
PL41 PTO 2 (HV 0,3)	372	367	365	370	366
HV(1) - 30	330	337	317	324	329
[HV(2) ≥ HV(1) -30]	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Descarbonetação	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO

Fonte: do autor, adaptado de ISO 898-1:2013

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM INTERNATIONAL HANDBOOK: Materials Park, Alloying: Understanding the Basics**, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23-94A: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**, (2005).

BABU P. B., GROMER S. R., LINGENFELSER D. J. and SHANDLEY G. P., “**Design for Fracture Resistance in Microalloyed Steel Components**”, Conference Proceedings of Fundamentals of Microalloying Forging Steels, Colorado, USA, 8-10 July 1986, pp. 389-424.

BHADESHIA, H. K. D. H.. Chapter 2: **Bainitic ferrite. In: Bainite in Steels. Transformations, Microstructure and Properties**. 2nd Edition, London, U.K: The University Press, Cambridge, 2001. p.42-60.

BAIN, E. C., **Functions of the Alloying Elements in Steel**, U. S. Steel Corporation, Pittsburgh, PA. ASM. Fourth Printing, 1945.

BARBOSA, João P. **Elementos de máquina**. São Mateus: 2011. Disponível em: <ftp://ftp.ifes.edu.br/Campus/SaoMateus/Coordenadorias/Mecanica/Professores/joaopb/Apostila_Elementos_2011.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2016.

BRESCIANI Filho, Ettore (coord.); ZAVAGLIA, Cecília Amélia Carvalho; BUTTON, Sérgio Tonini; GOMES, Edson; NERY Fernando Antonio da Costa. **Conformação Plástica dos Metais**. – 1.ed. digital – São Paulo: EPUSP, 2011.

CALLISTER, Jr., William D., 1940 – **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma Abordagem Integrada**; tradução Sérgio Murilo Stamile Soares; Revisão técnica Paulo Emílio Valadão de Miranda – 2^a Edição - Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CAMPBELL F. C., “**Elements of Metallurgy and Engineering Alloys**”, Chapter 14, ASM International, 2008 - Technology & Engineering.

CHIAVERINI, Vicente. “**Aços e Ferros Fundidos**” – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7^o edição, 2005.

COLAÇO, Rogério, **Materiais de Construção – Guia de Utilização**, Editores: M^a. Clara Gonçalves, F. Margarido e R. Colaço, Loja da Imagem, 2005.

COLPAERT, Hubertus, **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 3a Ed., Edgard Blücher, São Paulo – SP, 1974.

COSTA, A. L. S., **Avaliação Microestrutural e de Propriedades Mecânicas do Aço SAE 10B22 – Fio Máquina Visando a Otimização do Processo de Fabricação**. Porto Alegre - RS, 2010.

CUDDY, L., J., **Thermomechanical Processing of Microalloyed Austenite**. Eds. A. J. Deardo, G. A. Ratz and P. J. Wray; AIME; Warrendale; p.129; 1982

DALLEFE, Anderson, **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Alumínio Puro**, Porto Alegre – RS, 2008.

DAROIT, Mateus, **Estudo de Aço Microligado ao Vanádio para Produção de Barra Nervurada para Concreto Armado com Característica de Soldabilidade Segundo Norma ABNT NBR 8965:1985**, Porto Alegre – RS, 2012.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 10267: Ferritic-Pearlitic Steels for Precipitation Hardening from Hot-working Temperatures**. Berlin: DIN, 1999

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 8580: Manufacturing processes - Terms and definitions**. Berlin: DIN, 2003

DIETER, G., E. **Metalurgia Mecânica**, 2a Ed., Guanabara Dois, Rio de Janeiro – RJ, 1981.

EBRAHIMI A. and MOSHKARSAR M. M., “**Evaluation of Machinability in Turning of Microalloyed and Quenched- Tempered Steels: Tool Wear, Statistical Analysis, Chip Morphology**”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, 2009, pp. 910-921.

ELGERT, C., Carolina. **Estudo da Influência da Composição Química e dos Parâmetros de Beneficiamento na Tenacidade e na Resistência Mecânica de Aços para Fixadores com Aplicações em Baixas Temperaturas**. Porto Alegre - RS, 2012.

ERISIR, Ersoy, “**Strain Induced Precipitation In Microalloyed Steels Containing Nb, Ti And V**”, Brno, Czech Republic, EU, 2012.

FONTANA GRUPPO. **Technical catalogue: special products**. Veduggio con Colzano: Fontana, 2004.

FUCHS, H. O., STEPHENS, R. I., **Metal Fatigue In Engineering**, 1 ed. United States of America, John Wiley & Sons Inc., 1980.

GARCIA, A., SPIM, J., A., SANTOS, C., A. **Ensaio dos Materiais**. 2ª Ed., LTC, Rio de Janeiro - RJ, 2015.

GLADMAN, T., **The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels**. The Institute of Materials, London, 1997.

GONÇALVES, M. **Processamento termomecânico e evolução microestrutural de ligas de alumínio: aspectos da metalurgia física fundamental**. II Workshop sobre textura e relações de orientação. 2a. ed., São Paulo, 2003, p. 341.

GORNI, Antônio A., **Estudo Traça Relações Entre Microestrutura E Propriedades Mecânicas Em Aços Estruturais**, São Paulo – SP, 2009.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo R. **Fundamentos da Conformação Mecânica**. 2ed – Editora Art Liber, Belo Horizonte – MG, 2010.

IANNI, Octavio, **1926 – A Era do Globalismo** – 4a Edição – Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 148-1: Charpy pendulum impact test**. Part 1: Test method. Geneva: ISO, 2009.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel - Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes - Coarse thread and fine pitch thread**. Geneva: ISO, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3800: Threaded Fasteners – Axial Load Fatigue Testing – Test Methods and Evaluation of Results**. Geneva: ISO, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4014: Hexagon head bolts** - Product grades A and B. Geneva: ISO, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4762: Hexagon socket head cap screws**. Geneva: ISO, 2004.

KLOOS, K. H., THOMALA, W., **Spannungsverteilung im Schraubengewinde**, VDIZ 121, No. 12, June II, 1979 in German.

LAGNEBORG, R., SIWECKI, T., ZAJAC, S., HUTCHINSON, B., **The Role of Vanadium in Microalloyed Steel**, Swedish Institute for Metals Research. Stockholm, Sweden, 1999.

MACHADO, Marcelo, L., P., **Conformação dos Metais: Fundamentos e Aplicação** – Vitória – ES, 2009.

MATLOCK, D.; Speer, J. **Microalloying concepts and application in long products**. Materials Science and Technology, 2009.

MILATIAS, Sergio. **Como surgiu o parafuso**. São Bernardo do Campo: Editora Milatias, n. 1, 30 dez. 2006. Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=298>>. Acesso em: 10 Maio 2016.

MILBOURN D. J., “**Air-cooled Forging Steels for Automotive Applications**”, Steel Time, Oct. 1996, pp. 351-352.

MILITZER, M.; POOLE, W. J.; SUNJ, W. **Precipitation Hardening of HSLA Steels**. Steel Research 69, n. 7, 1998.

METALÚRGICA HASSMANN S.A. **Catálogo técnico de produtos**. Imigrante: Hassmann, 2012.

MONTEIRO, Carlos F. E. **Sistemas especialistas: projeto de parafusos de união**. 2014. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, jan.2014. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10010231.pdf>>. Acesso em: 10 Maio 2016.

NIEMANN, Gustav. **Elementos de máquinas**. Tradução de Carlos Van Langendonck e Otto Alfredo Rehder. São Paulo: Edgard Blücher, 1971.

PERINI, Felipe, G., **Propriedades Mecânicas e Microestruturais de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga Soldados**, Caxias do Sul – RS, 2008.

PIZZIO, Éverton. **Avaliação de Vida em Fadiga de Uniões Parafusadas. Estudo de caso**, Porto Alegre, 2005.

SCHAEFFER, Lírio. **Conformação mecânica**. 2a ed. Proto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SHIGLEY, Joseph E., MISCHKE, Charles R., BUDYNAS, Richard G.: **Projeto de engenharia mecânica** / tradução João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar. - 7. ed. – Bookman, Porto Alegre, 2005

SICILIANO, F.; ONO, A. A. **Aços microligados para peças forjadas e para cementação**. Anais da X Conferência Internacional de Forjamento (XXVI Senafor, 2006).

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J2340: Categorization and Properties of Dent Resistant, High Strength, and Ultra High Strength Automotive Sheet Steel**. Warrendale: SAE, 1999.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J429: Mechanical and Material Requirements for Externally Threaded Fasteners**. Warrendale: SAE, 2014.

TOFFOLO, Rodrigo, V., B., **Estudo Comparativo dos Aços Microligados API-5L-X60 e API 5L-X70, Usados para a Confecção de Tubos, Quanto à Tenacidade à Fratura**. Ouro Preto – MG, 2008.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. **VDI 2230 – Parte 1: Cálculo sistemático de juntas parafusadas altamente tensionadas. Juntas com um parafuso cilíndrico**. Fevereiro 2003 – Richtlinien – Alemanha

WICKERT, Jonathan, **Introdução a Engenharia Mecânica**, 2ª Ed., Cengage Learning, São Paulo – SP, 2011.