

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

FELIPE CENTENARO ROY

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DIN 16MnCr5 E SAE 8620H PARA
PRODUÇÃO DE VIRABREQUINS FORJADOS A FRIO PARA MOTORES A
COMBUSTÃO

Porto Alegre

2024

FELIPE CENTENARO ROY

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DIN 16MnCr5 E SAE 8620H PARA
PRODUÇÃO DE VIRABREQUINS FORJADOS A FRIO PARA MOTORES A
COMBUSTÃO

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

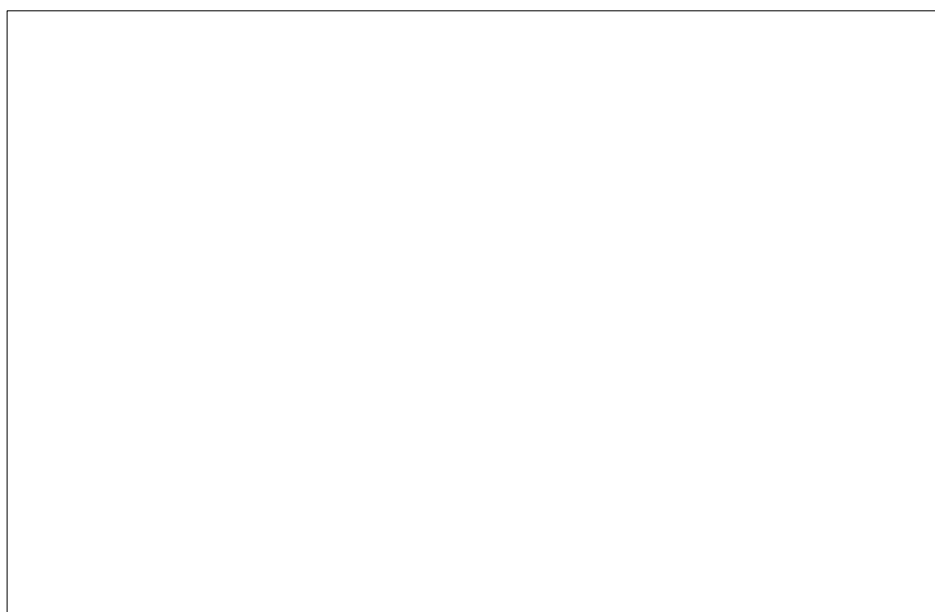
Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação



Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FELIPE CENTENARO ROY

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DIN 16MnCr5 E SAE 8620H PARA
PRODUÇÃO DE VIRABREQUINS FORJADOS A FRIO PARA MOTORES A
COMBUSTÃO

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

Coordenador: Rodrigo de Lemos Peroni

Aprovado em: 09/09/2024

BANCA EXAMINADORA

Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito

Dr. Leonardo Fonseca Oliveira

Prof. Dr. Thiago Marques Ivaniski

Dedico este trabalho a minha esposa, Michele, por sempre me apoiar e motivar na busca dos meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, por este presente que é a vida, pela saúde, trabalho, pelas pessoas que você coloca no meu caminho e que alguns deles me inspiram, me desafiam, me encorajam e me ajudam a ser cada dia melhor;

A minha esposa Michele pelo amor, carinho, paciência, compreensão, por me apoiar e me incentivar nas minhas decisões e também por me ajudar a vencer os desafios e os obstáculos que a vida proporciona;

Ao amigo Paulo Leal, por me incentivar, encorajar e motivar na participação deste pós graduação, assim como toda a ajuda prestada durante esta caminhada.

Aos colegas de trabalho Henrique Caitano e Vanessa Reis, pelo apoio nos ensaios realizados e nas sugestões, ao Martim Wunsche pelas correções, ao Anderson Souza por todo o suporte e incentivo na participação deste programa e também ao João Tavares por todo apoio prestado.

Fica aqui também um agradecimento especial ao Prof. Dr. Rafael Nunes, pela oportunidade, pelo tempo disponível e por todo suporte e apoio, além de ter passado conhecimentos imensuráveis durante o desenvolvimento deste trabalho e do programa de pós graduação.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em chegar a algum objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

(José de Alencar¹)

¹José de Alencar foi um romancista, dramaturgo, jornalista, advogado e político brasileiro. Foi um dos maiores representantes da corrente literária indianista e o principal romancista brasileiro da fase romântica.

RESUMO

Atualmente o aço SAE 8620H é o único material homologado, em uma empresa do setor privado no Rio Grande do Sul, para utilização em forjados a frio utilizados para a fabricação de virabrequins, o que aumenta significativamente o risco de desabastecimento e o impacto em custos devido as frequentes flutuações nos valores de matéria prima no mercado. A fim de mitigar os riscos de desabastecimento e buscar reduzir o impacto em custos, verificou-se que aço DIN 16MnCr5 poderia ser uma alternativa para o aço SAE 8620H. Buscando validar a equivalência entre ambos os aços, foi realizado um estudo comparativo entre os materiais, através de: análise da composição química, ensaio de tração, ensaio de forjabilidade, metalografia, dureza, análise da profundidade de camada cementada e avaliação geométrica após o forjamento. Através dos resultados dos ensaios realizados, tem-se para o material DIN 16MnCr5: maior teor de Manganês e Cromo e um menor teor de Níquel e Molibdênio; resultados superiores em todos os aspectos mecânicos exceto para a resistência a tração; deformabilidade equivalentes e sem defeitos superficiais; dureza e análise de camada dentro dos limites de especificações e por fim as análises geométricas e metalográficas também apresentaram resultados equivalentes para ambos os materiais.

Palavras-chave: Forjado a frio. Virabrequim.

CHARACTERIZATION OF DIN 16MNCr5 AND SAE 8620H MATERIALS FOR PRODUCTION OF COLD FORGED CRANKSHAFTS TO COMBUSTION ENGINES

ABSTRACT

Currently, the SAE 8620H steel is the only approved material, in a private sector company in Rio Grande do Sul, for use in the cold forging to manufacture crankshafts, which significantly increases the risk of shortages and the cost's impact due frequent fluctuations in raw material costs in the market. In order to mitigate the risks and reduce the impact on the costs, it was identified that steel DIN 16MnCr5 could be an alternative to steel SAE 8620H. Looking to validate the equivalence between both materials, a comparative study was carried out between both materials: chemical composition analysis, tensile test, forgeability test, metallography, hardness, analysis of the depth of the cemented layer and geometric evaluation after forging. Through the results of the tests carried out, it was observed for the material DIN 16MnCr5: higher content of Manganese and Chromium and a lower content of Nickel and Molybdenum; better results in all mechanical aspects, except for tensile strength; equivalent deformability and without surface defects; hardness and layer analysis within specification limits and finally the geometric and metallographic analyses also showed equivalent results for both materials.

Key-words: Cold forged. Crankshaft

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Virabrequim monolítico para motor de quatro tempos/multicilindros	21
Figura 2: Virabrequim montado para motocicleta/motosserras monocilíndricas	21
Figura 3: Principais etapas de fabricação de um virabrequim forjado	22
Figura 4: Virabrequim forjado a frio utilizado em motosserras	22
Figura 5: Formas de escoamento no forjamento	23
Figura 6: Temperatura de recristalização para conformação a frio e a quente	24
Figura 7: Componentes forjados a frio	25
Figura 8: Interação entre as principais variáveis do processo de conformação	30
Figura 9: Ensaio de compressão longitudinal em corpo-de-prova cilíndrico	32
Figura 10: Desenho esquemático do ensaio de compressão	33
Figura 11: Principais etapas do processo e o escopo das análises	35
Figura 12: Corpo de prova para ensaio de tração: matéria-prima	37
Figura 13: Dimensões dos billets para o ensaio de forjabilidade	38
Figura 14: Seção de corte do Corpo de Prova para análise	39
Figura 15: Pontos e região para avaliação da dureza	40
Figura 16: Características geométricas avaliadas no forjado	41
Figura 17: Comparativo gráfico dos elementos que compõem os aços	43
Figura 18: Gráfico Tensão x Deformação: SAE 8620H e DIN 16MnCr5	45
Figura 19: Gráfico dos resultados do limite de escoamento e resistência a tração	46
Figura 20: Gráfico dos resultados do alongamento e estrição	46
Figura 21: Gráfico resistência a tração: certificado versus resultados dos ensaios	48
Figura 22: Resultados resistência tração ensaio interlaboratorial SAE 8620	49
Figura 23: Resultados limite escoamento ensaio interlaboratorial SAE 8620	50
Figura 24: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 50T	50
Figura 25: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 75T	51
Figura 26: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 100T	51
Figura 27: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 125T	51
Figura 28: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 150T	52
Figura 29: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 160T	52
Figura 30: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 170T	52
Figura 31: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 180T	53
Figura 32: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 190T	53

Figura 33: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 200T ..	53
Figura 34: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 210T ..	54
Figura 35: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 220T ..	54
Figura 36: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 230T ..	54
Figura 37: Forjamento com carga de 300T DIN 16MnCr5	55
Figura 38: Comparativo gráfico da deformação verdadeira	56
Figura 39: Metalografia matéria-prima com ampliação óptica de 500X.....	58
Figura 40: Metalografia matéria-prima com ampliação óptica de 1000X.....	58
Figura 41: Metalografia forjado com ampliação óptica de 500X.....	59
Figura 42: Metalografia forjado com ampliação óptica de 1000X.....	59
Figura 43: Metalografia pré-usinagem com ampliação óptica de 500X.....	60
Figura 44: Metalografia pré-usinagem com ampliação óptica de 1000X.....	60
Figura 45: Metalografia ToTo com ampliação óptica de 500X	61
Figura 46: Metalografia ToTo com ampliação óptica de 1000X	61
Figura 47: Metalografia usinagem final com ampliação óptica de 500X.....	62
Figura 48: Metalografia usinagem final ampliação óptica de 1000X	62
Figura 49: Comparativo gráfico da dureza superficial (HB) – antes ToTo.....	64
Figura 50: Comparativo gráfico da dureza de núcleo (HRC) – após ToTo.....	64
Figura 51: Comparativo gráfico da profundidade de camada (CHD) – após ToTo....	66
Figura 52: Comparativo gráfico dos resultados geométricos	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço SAE 8620H.....	18
Tabela 2: Composição química do aço DIN 16MnCr5	19
Tabela 3: Classificação dos aços ligados e não ligados	27
Tabela 4: Principais ensaios de forjabilidade	31
Tabela 5: Quantidade de amostras produzidas e coletadas	35
Tabela 6: Quantidade de Corpos de Prova (CP) e Ensaios	36
Tabela 7: Análise da composição química do aço SAE 8620H.....	42
Tabela 8: Análise da composição química do aço DIN 16MnCr5.....	42
Tabela 9: Resultados do ensaio de tração SAE 8620H	44
Tabela 10: Resultados do ensaio de tração DIN 16MnCr5	45
Tabela 11: Resultados do ensaio de deformabilidade do material SAE 8620H	55
Tabela 12: Resultados do ensaio de deformabilidade do material DIN 16MnCr5	56
Tabela 13: Análise dureza superficial Brinell (HB) – antes do tratamento térmico...	63
Tabela 14: Análise dureza de núcleo Rockwell (HRC) – após tratamento térmico ...	63
Tabela 15: Resultados da análise de camada (profundidade - CHD) - após ToTo ...	65
Tabela 16: Resultado da avaliação geométrica do material SAE 8620H	67
Tabela 17: Resultado da avaliação geométrica do material DIN 16MnCr5	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CHD	<i>Case Hardness Depth</i>
CP	Corpo de Prova
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> Instituto Alemão para Normatização
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
LE	Limites de Especificação
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
PPGE3M	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
ToTo	Tratamento Térmico
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

k_f	[Mpa]	Tensão de Escoamento
F	[N]	Força
A	[mm ²]	Área de seção transversal instantânea
φ	[-]	Deformação Verdadeira
h	[mm]	Altura instantânea
h_o	[mm]	Altura inicial
d	[mm]	Diâmetro
ε	[%]	Alongamento
l_o	[mm]	Comprimento inicial
l_f	[mm]	Comprimento inicial
Z	[%]	Estricção
A_o	[mm ²]	Área inicial
A_f	[mm ²]	Área final

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 MATERIAIS.....	18
2.1.1 Aço SAE 8620H	18
2.1.2 Aço DIN 16MnCr5	18
2.1.3 Composição química dos materiais	19
2.2 VIRABREQUIM.....	19
2.3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA	23
2.4 FORJAMENTO A FRIO	24
2.4.1 Matérias-primas para forjamento a frio	26
2.4.2 Vantagens e desvantagens do forjamento a frio	27
2.4.3 Fraturas em forjamento a frio	28
2.5 ENSAIO DE FORJABILIDADE	29
2.5.1 Ensaio de recalque	32
2.5.2 Controle dos materiais e do produto	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL.....	36
3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	36
3.3 ENSAIO DE FORJABILIDADE	38
3.4 ANÁLISE METALOGRAFICA	39
3.5 ENSAIO DE DUREZA.....	39
3.6 ANÁLISE DE CAMADA.....	40
3.7 AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL.....	42
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	44
4.3 ENSAIO DE FORJABILIDADE	50
4.4 ANÁLISE METALOGRAFICA	57
4.4.1 Metalografia da matéria-prima	57
4.4.2 Metalografia do forjado	58
4.4.3 Metalografia do pré-usinado	59

4.4.4 Metalografia tratamento-térmico	60
4.4.5 Metalografia da usinagem final.....	61
4.5 ENSAIO DE DUREZA.....	62
4.6 ANÁLISE DE CAMADA.....	65
4.7 AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA.....	67
4.8 CUSTOS	69
4.9 CONSIDERAÇÕES GERAIS	70
5 CONCLUSÕES.....	72
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
REFERÊNCIAS.....	74

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais o risco de desabastecimento e o impacto em custos devido as frequentes flutuações nos valores de matéria-prima devem ser mitigadas para que o negócio possa continuar sendo competitivo. Além disso, usando como base a análise de risco da cadeia de suprimentos, podemos afirmar que uma fonte única de matéria-prima aplicada a um produto de alta complexidade como o virabrequim é de alto risco para o negócio, pois o tempo de homologação de uma nova fonte não é rápido. Com o objetivo de reduzir estes riscos, buscou-se uma matéria-prima alternativa, ou seja, o aço DIN 16MnCr5. Com objetivo de avaliar a equivalência entre o material SAE 8620H utilizado atualmente no processo de fabricação dos virabrequins e o material alternativo proposto DIN 16MnCr5, realizou-se uma análise comparativa de ambos os materiais onde considerou-se a avaliação das principais propriedades físicas, químicas e mecânicas, através da realização dos seguintes ensaios: composição química, tração, forjabilidade, metalografia, dureza, profundidade de camada cementada (*Case Hardness Depth* - CHD) e avaliação geométrica.

Este trabalho foi desenvolvido parte no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e parte em uma empresa do setor privado. Neste trabalho são empregados conhecimentos adquiridos nas disciplinas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) além dos conhecimentos profissionais do mestrando.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre dois materiais indicados para forjamento a frio de virabrequins, ou seja, o aço SAE 8620H utilizado atualmente e o aço alternativo DIN 16MnCr5. A análise comparativa entre ambos os materiais tem o intuito de:

- a) Obter através de ensaios metalúrgicos dos materiais, informações a respeito das principais propriedades químicas, físicas e mecânicas de interesse do aço e do virabrequim ao longo do processo de manufatura, ou seja, desde a matéria-prima até a sua condição final de fabricação;

- b) Avaliar a possibilidade de recomendar o aço proposto DIN 16MnCr5 para teste dinâmico e/ou funcional em máquina, através da avaliação dos resultados obtidos através dos ensaios metalúrgicos realizados;
- c) Comparar os resultados obtidos com os resultados submetidos nos certificados pelos fornecedores ou com as normas dos materiais com o intuito de ter uma maior confiabilidade para posterior teste dinâmico e/ou funcional;
- d) Avaliar os potenciais impactos e/ou influências para o produto em caso de divergências e/ou diferenças encontradas nos resultados das propriedades químicas, físicas e mecânicas durante a avaliação comparativa dos materiais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS

A escolha adequada do material para o processo de forjamento é de extrema importância para o desempenho do processo e do produto. Os materiais avaliados neste trabalho são o SAE 8620H e o DIN 16MnCr5, no qual ambos são indicados para o processo de conformação a frio.

2.1.1 Aço SAE 8620H

O aço SAE 8620H é um material com baixo teor de carbono e indicado para cementação e posterior beneficiamento. Após cementado, a dureza superficial pode chegar a 62 HRC enquanto que a dureza de núcleo pode variar entre 30 e 45 HRC. O material é empregado em mecanismos onde requer maior resistência ao desgaste, apresenta ótima forjabilidade, boa temperabilidade e boa usinabilidade. Este aço é utilizado para a manufatura de componentes mecânicos como: virabrequins, pinos guia, anéis de engrenagem, cruzetas, catracas, eixos, coroas, pinhões e engrenagens em geral. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço SAE 8620H.

Tabela 1: Composição química do aço SAE 8620H

Limites	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Min	0,180	0,150	0,700	-	-	0,400	0,400	0,150	-
Max	0,230	0,350	0,900	0,035	0,040	0,600	0,700	0,250	0,350

Fonte: (OBERG et al., 2012)

2.1.2 Aço DIN 16MnCr5

O aço DIN 16MnCr5 é um material com baixo teor de carbono e indicado para cementação e posterior beneficiamento. Após cementado, a dureza superficial e a dureza de núcleo são similares ao material SAE 8620H. Este aço é utilizado para a manufatura de componentes mecânicos como: engrenagens, suporte de ferramentas, pinos e peças onde há exigência de dureza superficial para resistência ao desgaste, apresenta uma ótima forjabilidade e boa usinabilidade. A Tabela 2 apresenta a composição química do aço DIN 16MnCr5.

Tabela 2: Composição química do aço DIN 16MnCr5

Limites	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Min	0,140	-	1,00	-	-	0,80	-	-	-
Max	0,190	0,40	1,30	0,035	0,035	1,10	0,25	0,06	0,35

Fonte: Norma DIN EN 10263-4 (2002); DIN 1654 (1989)

2.1.3 Composição química dos materiais

Conforme CAMPBELL (2008), a razão mais importante para adicionar elementos de liga na composição química dos aços é aumentar a temperabilidade sendo que os elementos mais eficazes para isso são: manganês, cromo, molibdênio e níquel. De acordo com a *ASM International Handbook*, os quatro (4) elementos de ligas citados anteriormente, quando adicionados na composição química do aço, tem como principais efeitos os listados a seguir:

- i. Cromo: geralmente é adicionado ao aço para aumentar a resistência à corrosão e à oxidação, melhorar a resistência a altas temperaturas e aumentar a temperabilidade, bem como aumentar a resistência ao escoamento. Além disso é um formador de carboneto que é benéfico para resistência ao desgaste e também retarda o amolecimento durante o revenimento.
- ii. Manganês: tem como um forte efeito o aumento da temperabilidade e contribui também para o aumento da resistência mecânica e dureza, mas em menor grau do que o carbono.
- iii. Molibdênio: tem como efeito o aumento da temperabilidade e tem como particularidade manter a temperabilidade entre os limites de especificação, além de ser o único em aumentar a resistência à tração em altas temperaturas. Além disso é um formador de carbonetos.
- iv. Níquel: os aços com níquel são facilmente tratados termicamente e melhora a tenacidade, além de ser um forte estabilizador de austenita. Em combinação com o Cromo, o Níquel produz ligas de aço com maior temperabilidade, maior resistência ao impacto e maior resistência à fadiga.

2.2 VIRABREQUIM

O virabrequim é um dos componentes mais importantes dos motores a combustão e tem como função converter o movimento linear em movimento rotativo,

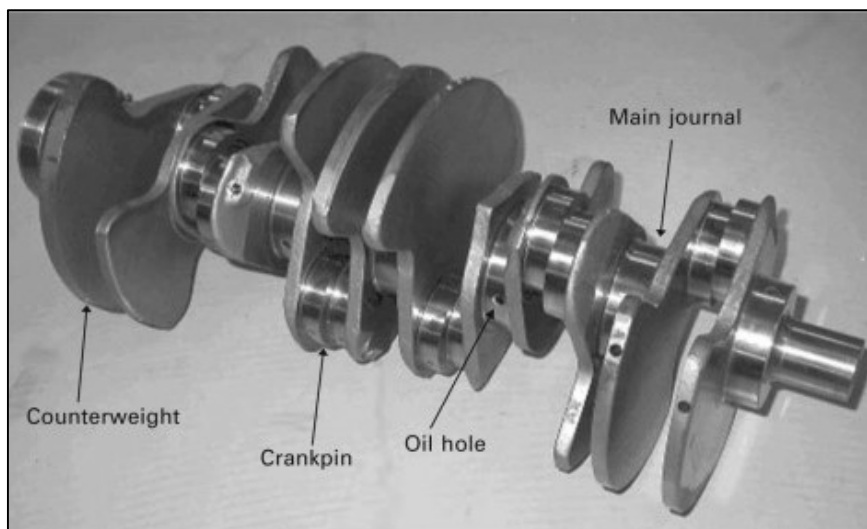
além disso, possuem contrapesos para suavizar as rotações do motor. O virabrequim se conecta ao pistão através de uma biela e o principal objetivo desta biela é transferir o movimento do pistão e entregá-lo ao virabrequim. À medida que o virabrequim recebe o movimento pela biela, o virabrequim transforma o movimento linear em movimento rotativo (STOJANOVIC & GLISOVIC, 2016).

Os virabrequins podem ser fabricados em aço forjado ou ferro fundido. Os virabrequins para aplicação em alto volume e baixa carga são geralmente construídos em ferro fundido nodular. Motores com baixo consumo de combustível e que exigem uma alta relação potência-deslocamento, geralmente são utilizados virabrequins forjados (YAMAGATA, 2005). Os virabrequins devem possuir uma resistência à fadiga e ao desgaste para garantir uma longa vida operacional do motor, baseado nisso é de extrema importância a utilização de materiais de alta resistência. A seleção de materiais e métodos de fabricação dependem do tipo de motor e da geometria e design do virabrequim (MYAGKOV et al., 2014).

Os virabrequins de ferro fundido são economicamente mais baratos, mas possuem um tempo para fabricação maior se comparado com os virabrequins forjados, porém tem um melhor aproveitamento do metal o que pode se tornar mais econômico quando o projeto é de alta complexidade. A resistência ao desgaste dos virabrequins fundidos aumenta devido à presença de grafite no ferro fundido e com isso a confiabilidade do virabrequim também é melhorada devido à alta resistência cíclica do ferro fundido, no entanto, a resistência mecânica dos virabrequins de ferro fundido se torna inferior se comparado aos forjados e também se torna mais difícil determinar defeitos internos de fundição (MYAGKOV et al., 2014).

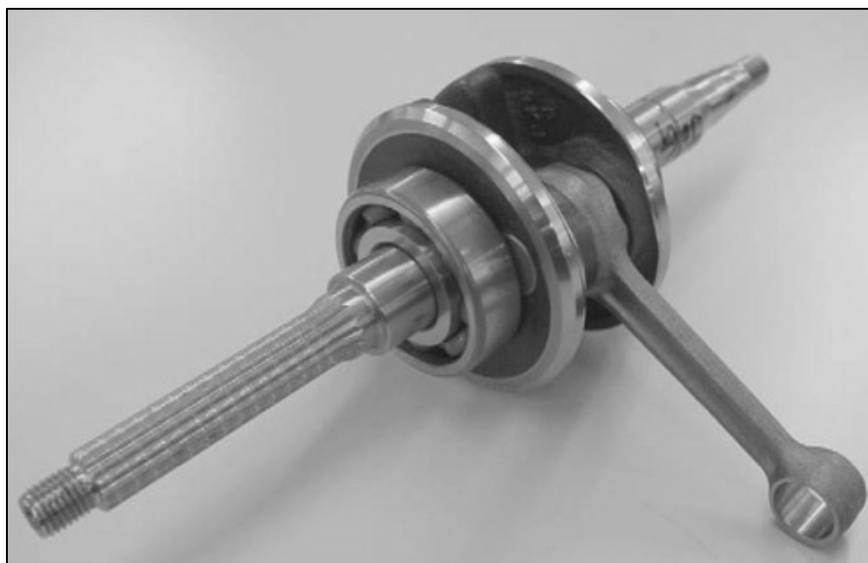
Existem dois tipos de virabrequim, o tipo monolítico exemplificado na Figura 1, e utilizado em motores multicilindros e com indicação de moente (*crankpin*), munhão (*main journal*), canal de óleo (*oil hole*) e contrapeso (*counterweight*), além do tipo fabricado e montado a partir de elementos separados, exemplificado na Figura 2, e utilizado principalmente em motocicletas e motosserras.

Figura 1: Virabrequim monólítico para motor de quatro tempos/multicilindros



Fonte: (YAMAGATA, 2005)

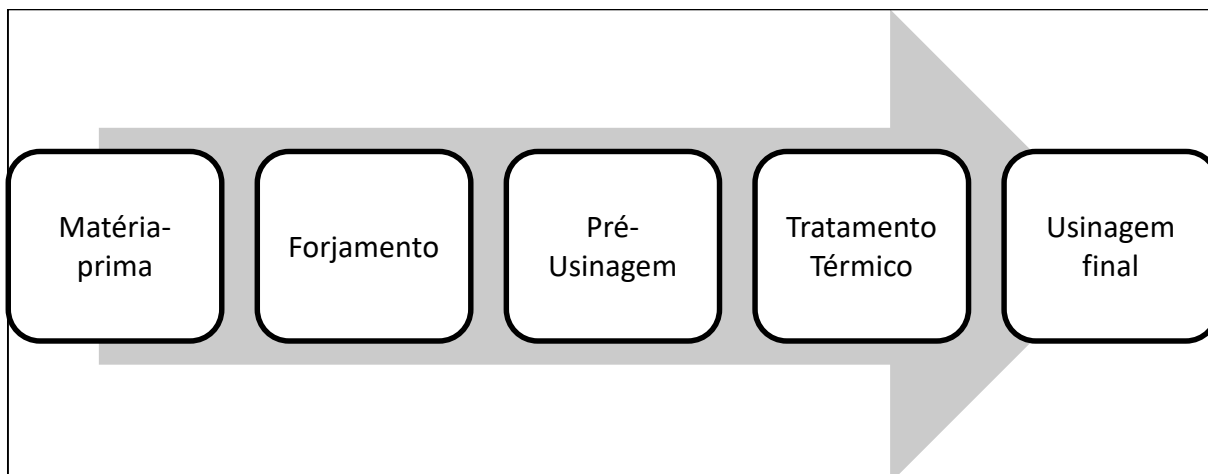
Figura 2: Virabrequim montado para motocicleta/motosserras monocilíndricas



Fonte: (YAMAGATA, 2005)

De forma geral, como os motores de motosserras apresentam um baixo consumo de combustível, exigem uma alta relação de potência-deslocamento e necessitam de uma alta resistência mecânica dos virabrequins, em sua maioria a utilização de virabrequins forjados se torna mais viável se comparados com os virabrequins fundidos. As principais etapas do processo de fabricação de um virabrequim forjado podem ser verificadas na Figura 3:

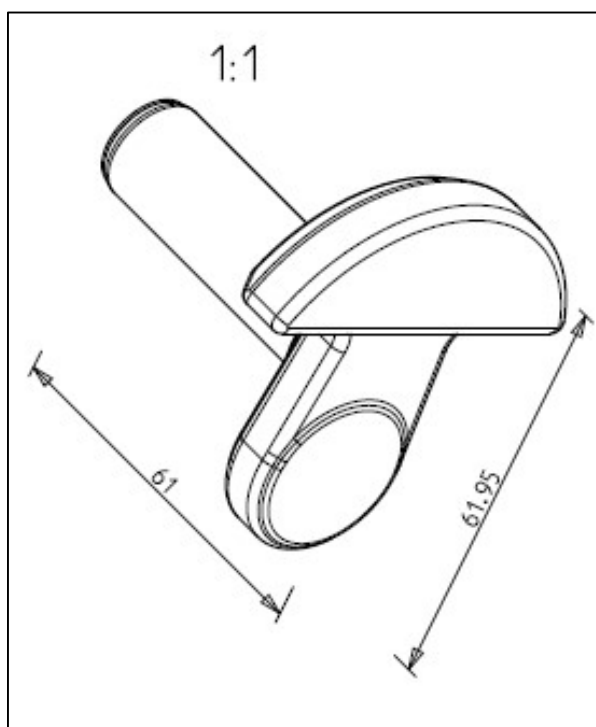
Figura 3: Principais etapas de fabricação de um virabrequim forjado



Fonte: Elaborado pelo autor

O objeto de estudo deste trabalho é realizar o comparativo entre dois materiais esferoidizados, SAE 8620H e o aço DIN 16MnCr5, indicados para o processo de forjamento. Estes materiais serão utilizados na produção de virabrequins através do processo de forjamento a frio e tendo como aplicação final a montagem em motores de combustão utilizados em motosserras. A Figura 4 apresenta um virabrequim forjado a frio utilizado em motosserras e com dimensões de 61,00 mm por 61,95 mm.

Figura 4: Virabrequim forjado a frio utilizado em motosserras



Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

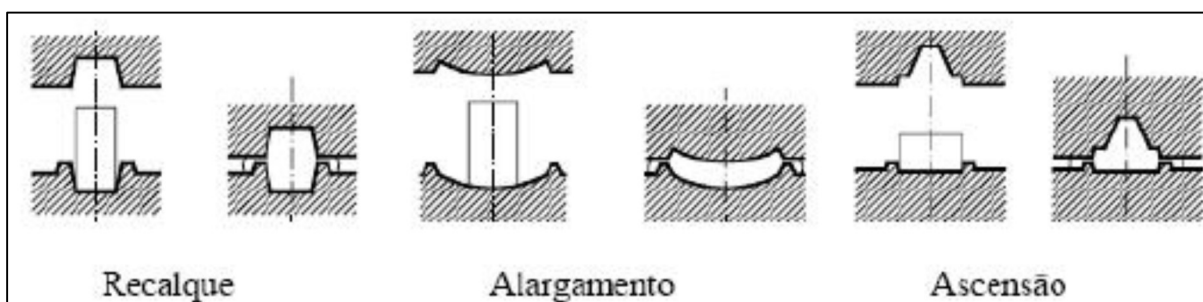
Os processos de fabricação de produtos metálicos são classificados em seis principais grupos: fundição, conformação mecânica, usinagem, soldagem, tratamento térmico e tratamento superficial (BRESCIANI et al., 1991).

Dentre estes processos, destaca-se o grupo de conformação mecânica no qual consiste em um componente em sua forma inicial geometricamente simples, por exemplo uma geratriz, no qual através de esforços de compressão é plasticamente conformado de tal modo que assume o perfil da ferramenta de trabalho pré-estabelecida. A transformação se dá de uma geometria relativamente simples para uma geometria mais complexa (CETLIN & HELMAN, 2005).

O processo de forjamento destaca-se como um dos mais estudado da conformação dos metais, este processo pode ser classificado em função da temperatura de trabalho, como: quente, a morno ou a frio (BRESCIANI et al., 1991).

O processo de forjamento envolve aplicação de um estado de compressão direta, com a deformação ocorrendo basicamente por recalque, alargamento e ascensão, conforme Figura 5 (BRAGA, 2005):

Figura 5: Formas de escoamento no forjamento



Fonte: (BRAGA, 2005)

Geralmente, o processo de forjamento requer operações posteriores de acabamento e tratamento térmico, com o objetivo de atender a forma geométrica e as propriedades mecânicas requeridas e desejadas para o produto final (BRAGA, 2005).

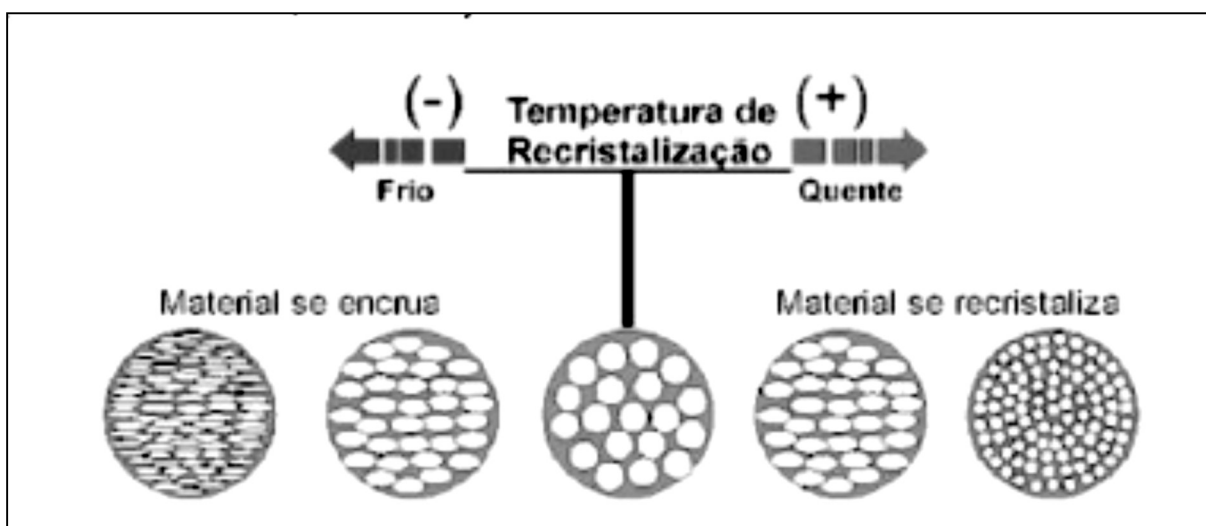
Dentre os processos de conformação mecânica, o forjamento a frio é um dos que pode ser utilizado com o objetivo de otimização dos processos, ou seja, substituir e/ou reduzir operações de acabamento e tratamento térmico além de garantir tolerâncias dimensionais menores que o forjamento a quente e um melhor acabamento superficial (SCHAEFFER, 2001).

2.4 FORJAMENTO A FRIO

O forjamento a frio é um processo no qual o material é submetido a conformação em temperatura ambiente (abaixo da temperatura de recristalização) e forçado a escoar através da aplicação de uma força compressiva no sentido de se conformar plasticamente em uma diversidade de formas ou perfis de ferramentas. Os perfis após forjamento são de forma geral usualmente simétricos, com pequenas assimetrias e sem rebarbas (ALTAN & NGAILE, 2005).

As operações de forjamento podem ser realizadas a quente, a morno e a frio, sendo que a diferenciação destas operações pode ser feita em função da temperatura de recristalização conforme ilustrado na Figura 6 (BRAGA, 2005).

Figura 6: Temperatura de recristalização para conformação a frio e a quente



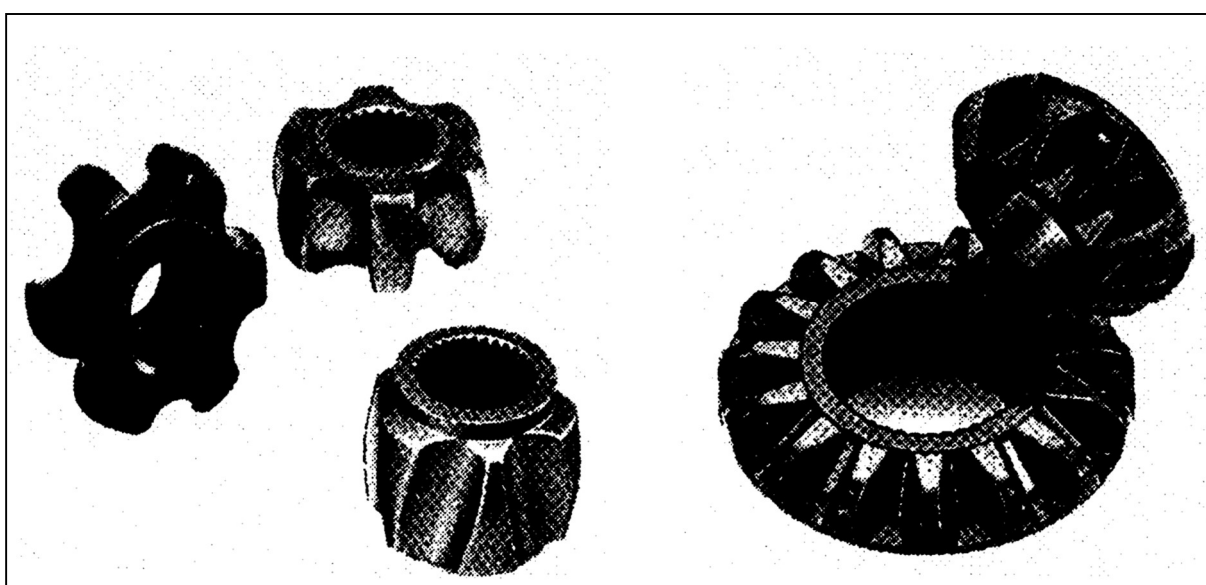
Fonte: (BRAGA, 2005)

O forjamento a frio, em seu estado inicial, é realizado sem pré-aquecimento da matéria-prima ou das ferramentas, que posteriormente se aquecem durante o processo de conformação. O aquecimento durante o processo de conformação depende da modificação de forma, velocidade de deformação e de outros parâmetros de processamento (SILVEIRA, 2019 apud BILLIGMANN & FELDMANN, 1979).

Em comparação ao forjamento a quente e morno, o forjamento a frio se destaca em relação a ambos, pois viabiliza a fabricação de componentes com maior precisão dimensional, geometrias mais complexas e com geometria próxima da condição final requerida (*near net shape*), eliminando assim operações secundárias de alto custo como por exemplo é o caso da usinagem (SCHAEFFER, 2001).

As primeiras aplicações de forjamento a frio foram em materiais não ferrosos como o chumbo, zinco e cobre. Quanto ao uso dos aços, inicialmente, empregou-se quase que exclusivamente em aços não ligados. O efeito do encruamento do material provoca o aumento de resistência o que é de extrema relevância na aplicação de projetos de engenharia. Atualmente também já são forjados a frio aços que apresentam alta resistência mecânica (SCHAEFFER, 2001). Na Figura 7 é possível visualizar exemplos de componentes forjados a frio.

Figura 7: Componentes forjados a frio



Fonte: (SCHAEFFER, 2001)

Componentes forjados a frio podem obter melhores propriedades mecânicas se comparado com componentes usinados, ou seja, as propriedades mecânicas podem ser até 40% maiores. Além disso, o forjamento a frio em comparação com aços tratados termicamente e com dureza similares, permitem limites de escoamento até 20% maiores. Como o forjamento a frio é voltado para produção e automação em alto volume de produção, pode ser mais econômico do que outros processos de fabricação alternativos quando produzido em alta escala (GRAIN et al., 2007).

Dependendo do grau de trabalho a frio, aços carbono e de baixa liga podem atingir resistências altas, ou seja, normalmente atingem resistência à tração superiores a 690 MPa e resistência ao escoamento superior a 620 MPa. Conseqüentemente, os limites de escoamento do projeto podem ser em torno de 15 a 20% maiores se comparado com os aços tratados termicamente e com a mesma

dureza. Além disso, limites de escoamento acima de 690 MPa podem ser atingidos em aços carbono. Propriedades ainda mais altas são alcançadas com aços de baixa liga que são forjados a frio (GRAIN et al., 2007).

A utilização dos materiais vai além dos aços ferrosos. Geralmente, os aços para forjamento a frio incluem aços de baixa liga e/ou aço carbono com teor de carbono inferior a 0,45%. No entanto, praticamente qualquer liga com um alongamento à tração superior a 10% ou que possa obter uma redução de área maior que 25% podem ser utilizados no forjamento a frio, incluindo: algumas classes e graus de aço inoxidável, ligas de alumínio, latão e bronze (GRAIN et al., 2007).

2.4.1 Matérias-primas para forjamento a frio

Os materiais mais utilizados para produção de peças forjadas são os: aços comuns e ligados, aços estruturais, aços para cementação e beneficiamento, aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, aços ferramenta, ligas de alumínio, ligas de cobre (especialmente os latões) e ligas de magnésio (KALPAKJIAN et al., 2021).

Em relação a matéria-prima a ser utilizada no processo de forjamento a frio, deve-se levar em consideração alguns fatores importantes em relação as propriedades do material a ser utilizado (FLAUSINO, 2010 apud BILLIGMANN & FELDMANN, 1979), como:

- Tratamento térmico antes do processo de forjamento;
- Material deve estar esferoidizados;
- Estrutura metalográfica;
- Tamanho de grão;
- Velocidade de deformação;
- Comportamento da curva de escoamento;
- Ductilidade.

A Tabela 3 apresenta a classificação de alguns aços ligados e não ligados, considerando a conformabilidade do material na condição de temperatura a frio do material e da ferramenta (BICHINHO et al., 2016 apud BILLIGMANN & FELDMANN, 1979):

Tabela 3: Classificação dos aços ligados e não ligados

Conformabilidade a frio dos aços ligados e não ligados				
Ótima	Boa	Regular	Ruim	
1008	1018	1035	1045	
1010	1020	1038	1050	
1013	1022	1040	1060	
1016	1024	2330	1070	
1017	1030	3140	1080	
3115	3120	4130	1340	
5015	3130	4140	4340	
5115	4037	5140	4640	
	5120	8640	6150	
	8620		52100	

Fonte: (BICHINHO et al., 2016 apud BILLIGMANN & FELDMANN, 1979)

Deve ser lembrado que os materiais acima citados também sofrem influência em sua conformabilidade pelo tipo de processo de conformação a frio, lubrificação utilizada e condições de acabamento superficial do ferramental (BICHINHO et al., 2016 apud BILLIGMANN & FELDMANN, 1979).

2.4.2 Vantagens e desvantagens do forjamento a frio

Flexibilidade de projeto, eliminação e/ou redução de operações secundárias e tratamento térmico estão entre as muitas das razões e vantagens pelas quais o forjamento a frio muitas vezes é escolhido (GRAIN et al., 2007).

Quando comparado com os outros processos de conformação mecânica, o forjamento a frio tem como principais vantagens (SCHAEFFER, 2001):

- Menor quantidade de matéria-prima requerida;
- Possibilidade de utilização de matéria-prima de menor custo (mais barata);
- Obter produtos mais próximo da condição final (*near net shape*);
- Viabilidade de produzir componentes com geometrias mais complexas;
- Redução de operações subseqüente e tempo de processamento;
- Alta precisão dimensional se comparado com outros processos de forjamento;

- Bom acabamento superficial (geralmente obtém-se rugosidade comparável ao retificado);
- Melhorias das propriedades mecânicas (aumenta o limite de resistência, o limite de escoamento e a dureza).

Em contrapartida, devido a necessidade de alta pressão e esforços para conformação do material, o forjamento a frio tem como principais desvantagens (SCHAEFFER, 2001):

- Necessidade de prensas com maior capacidade;
- Pressões elevadas nas ferramentas (necessidade de aços especiais);
- Maior custo do ferramental (ferramentas com alta resistência);
- Viabilidade econômica para produção em grande escala;
- Recozimento intermediário para se obter grandes deformações;
- Tempo maior para preparação e ajuste das ferramentas;

2.4.3 Fraturas em forjamento a frio

O forjamento a frio é uma operação de difícil conformação para concepção de um determinado componente mecânico que tem limitações quanto a deformabilidade do material e a vida útil da ferramenta. Em comparação com os processos de forjamento a quente e a morno, as forças de deformação do forjamento a frio são relativamente altas, conseqüentemente o material forjado a frio tem tendência a ocorrência de trincas devido à alta deformação que excede o limite de ductilidade do material (KILIÇASLAN, 2017).

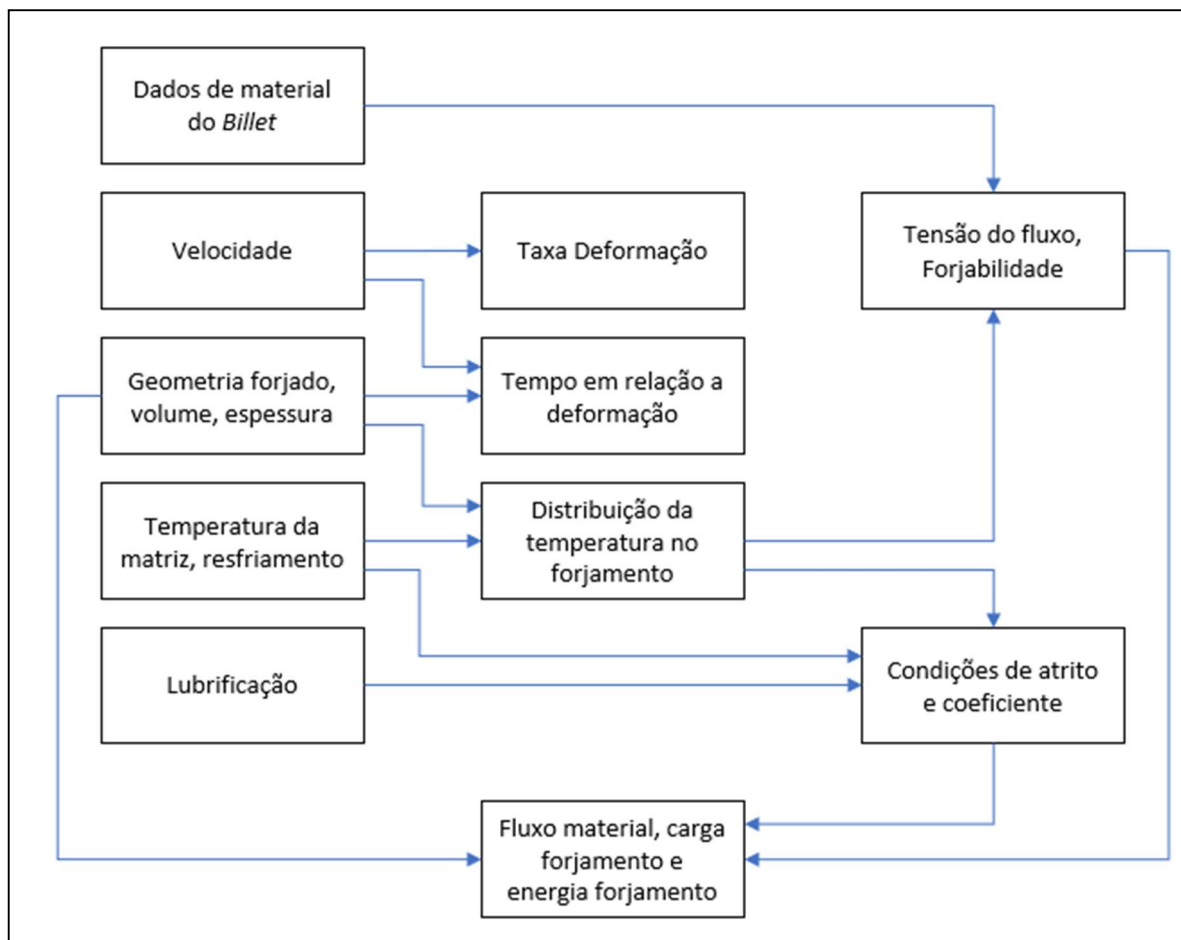
A classificação dos tipos de trincas é sugerida pela literatura sendo a fratura dúctil dividida em três grupos: trincas na superfície livre, trincas na superfície em contato com a ferramenta e trincas internas. Elas podem ocorrer durante operações de recalque, prensagem e extrusão radial em que tensões de tração desenvolvem-se na superfície livre em expansão podendo levar à fratura prematura do componente ou corpo de prova avaliado (VRIES, 1993 apud OKAMOTO, T., T. Fukuda, 1973)

2.5 ENSAIO DE FORJABILIDADE

A forjabilidade ou trabalhabilidade como também pode ser chamado, especificamente para processos de forjamento, pode ser definida como a facilidade de dar forma a um determinado material com geometria simples por meio de deformações plásticas sem a ocorrência e/ou surgimento de defeitos. Após a deformação do material, alguns defeitos e/ou problemas podem surgir no componente como: trincas, microestrutura indevida, incorreto fluxo de material e grãos austeníticos não homogêneos. Tais defeitos resultam em propriedades mecânicas impróprias ou não desejáveis para o componente, gerando assim refugo ou retrabalho, e sendo vistos também como um problema de forjabilidade do material (ALTAN & NGAILE, 2005).

Com o objetivo de solucionar ou prevenir tais problemas, uma análise preliminar deve ser realizada no material e no processo antes da produção de amostras para teste ou utilização. Na maioria das vezes durante o desenvolvimento de qualquer modelamento de um determinado componente, requer a análise e definição das condições com a aplicação de equações matemáticas apropriadas. Em alguns casos, as soluções podem ser identificadas por equações analíticas (de forma fechada), enquanto em outros casos são necessários aplicação de técnicas numéricas (como Análise de Elementos Finitos - FEA). No caso dos processos de conformação mecânica, como é o caso da operação de forjamento, as principais variáveis e interações dos parâmetros do processo de fabricação são mostradas na Figura 8 (DIETER et al., 2003).

Figura 8: Interação entre as principais variáveis do processo de conformação

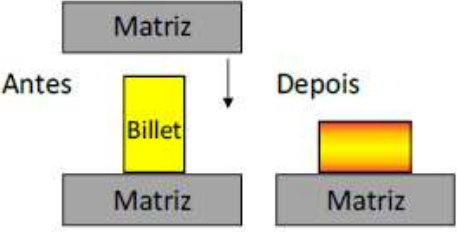
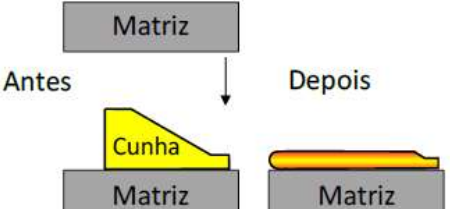
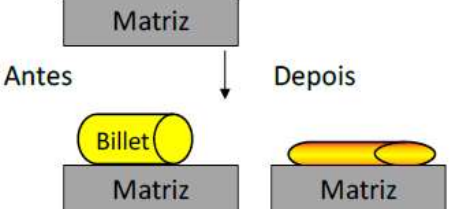
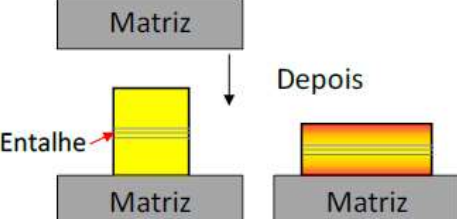
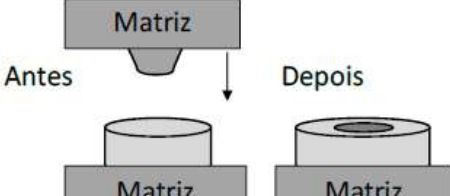


Fonte: (DIETER et al., 2003), adaptado.

Pode ser visto na Figura 8 que para uma análise de conformação de metal, é preciso satisfazer os requisitos, onde podem ser aplicadas equações como: relações de deformação-deslocamento, constitutivas e, em alguns casos mais específico, balanço de calor (DIETER et al., 2003).

Existem diversos tipos de ensaios que podem ser utilizados para se obter um melhor conhecimento do aço a ser utilizado, ou seja, cada ensaio tem como objetivo compreender um aspecto relacionado ao processo. A Tabela 4 apresenta os principais tipos de ensaios de forjabilidade e uma breve descrição do objetivo de cada um deles.

Tabela 4: Principais ensaios de forjabilidade

Ensaio de forjabilidade	Descrição
<p data-bbox="440 367 576 400"><i>Recalque</i></p> 	<p>O ensaio de compressão de um corpo de prova cilíndrico, possibilita caracterizar a curva de escoamento de um determinado material e identificar regiões de baixo fluxo devido ao atrito e perdas térmicas.</p>
<p data-bbox="459 703 555 736"><i>Cunha</i></p> 	<p>O ensaio de compressão de um corpo de prova em forma de cunha, permite caracterizar o efeito de diversos graus de deformação e taxa de deformação do material em apenas um corpo de prova.</p>
<p data-bbox="368 1016 647 1050"><i>Compressão lateral</i></p> 	<p>O ensaio de compressão de um corpo de prova cilíndrico e no sentido horizontal, normalmente é realizado em matrizes planas para o estudo de trincas superficiais em forjados.</p>
<p data-bbox="376 1330 639 1364"><i>Barra com entalhe</i></p> 	<p>O ensaio de compressão de um corpo de prova com entalhe perpendicular ao sentido do carregamento, com o intuito de ser um concentrador de tensões para o estudo de nucleação e propagação de trincas.</p>
<p data-bbox="400 1666 616 1700"><i>Cone truncado</i></p> 	<p>O ensaio de compressão de um corpo de prova cilindro com endentação de uma matriz cônica é relevante para o estudo de propagação de trincas superficiais e subsuperficiais em forjamento a frio.</p>

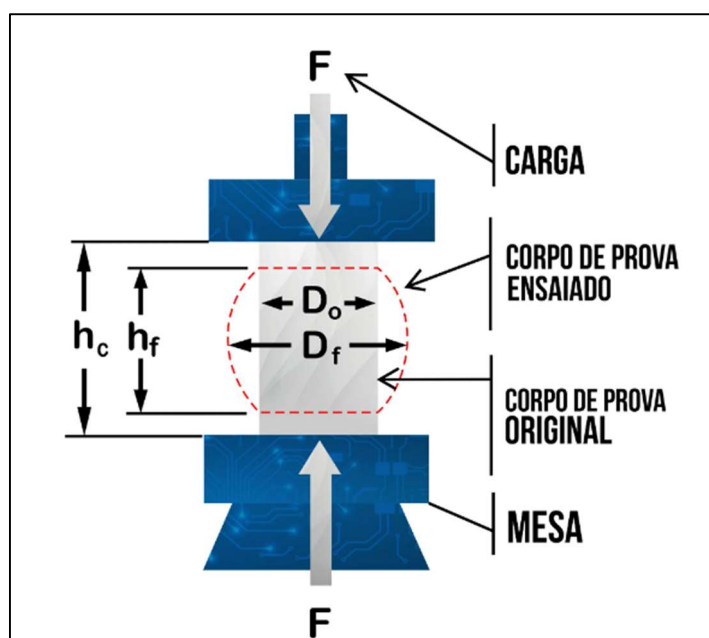
Fonte: (SILVEIRA, 2019 apud VERLINDEN et al., 2007)

Nos tópicos a seguir, será detalhado o ensaio de recalque, devido a este se assemelhar ao processo que está sendo abordado neste trabalho além de as dimensões da barra não possibilitar realizar o ensaio de cunha.

2.5.1 Ensaio de recalque

O ensaio de recalque que também pode ser chamado de ensaio de compressão é um dos mais comuns e pode ser realizado para avaliação do material quanto a sua forjabilidade. O ensaio é realizado com corpo de prova de geometria cilíndrica simples, usualmente chamado de *billet*. O *billet* é submetido a compressão direta em matriz plana. O ensaio de compressão pode ser realizado em uma prensa hidráulica onde são instaladas duas placas lisas, ou seja, uma delas fixa que podemos chamar de mesa e a outra móvel. A placa móvel tem como principal função a aplicação de uma carga compressiva uniaxial no *billet* fazendo com que o corpo de prova ensaiado se comprima. Geralmente para materiais metálicos são utilizados o ensaio de compressão longitudinal em corpo de prova cilíndrico, conforme representado na Figura 9 (DIETER et al., 2003).

Figura 9: Ensaio de compressão longitudinal em corpo-de-prova cilíndrico



Fonte: (BIOPDI - <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-compressao>, 2024)

Para construção da curva de escoamento através do ensaio de compressão, deve-se aplicar uma carga uniaxial uniformemente distribuída em toda a seção

transversal de um corpo de prova cilíndrico. Durante o ensaio se registra a variação do comprimento em função da carga aplicada. Baseando-se nos dados coletados durante o ensaio, através da Equação 1 é possível calcular a tensão de escoamento (k_f), enquanto que a deformação verdadeira ou logarítmica (φ) pode ser calculada através da Equação 2.

Tensão de Escoamento (k_f)

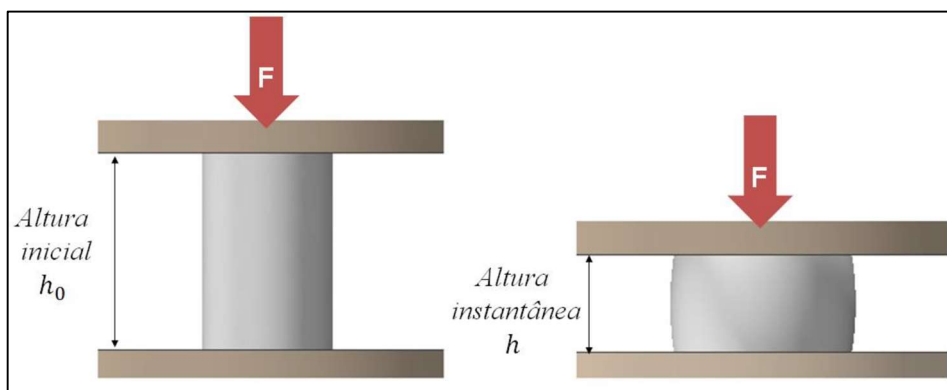
$$k_f = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 1}$$

Deformação Verdadeira (φ)

$$\varphi = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde: F é a força aplicada para comprimir o corpo de prova, A é a área de seção transversal instantânea da amostra, h_0 é a altura inicial do corpo de prova e o h é a altura instantânea do corpo de prova. A Figura 10 representa um desenho esquemático do ensaio de compressão.

Figura 10: Desenho esquemático do ensaio de compressão



Fonte: (ROSIAK, 2020)

2.5.2 Controle dos materiais e do produto

A eficiência e a produtividade de uma operação de conformação são influenciadas por uma série de fatores, como seleção e controle de material, custo do

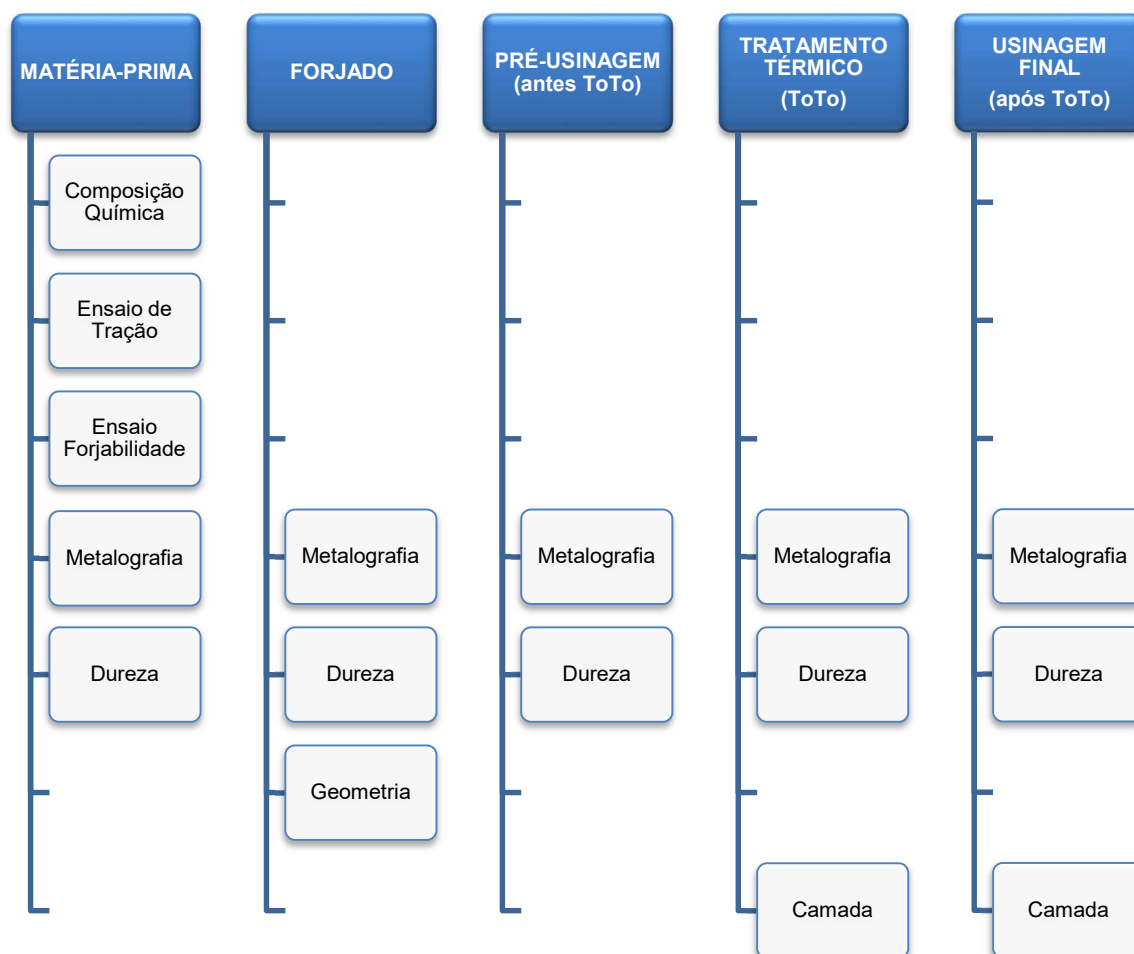
equipamento, desgaste da ferramenta, distorção da peça, controle dimensional ruim, má utilização do material e alto refugo (DIETER et al., 2003).

O controle do material é importante, pois a variação do material pode ter efeitos significativos nas propriedades e características do produto, como tamanho de grão e propriedades mecânicas. A responsabilidade de garantir e verificar as propriedades e características do produto está atrelada ao controle durante o processo de fabricação, ou seja, desde da seleção e recebimento da matéria-prima até a inspeção final do produto acabado. Em modo geral se estabelecem padrões de fabricação para garantir a reprodutibilidade no processamento e a uniformidade do produto. O controle do produto é realizado através dos desenhos técnicos, normas, requisitos específicos do cliente, controles dos parâmetros de processo de fabricação, etc. e tendo como principal objetivo atender os requisitos metalúrgicos, propriedades mecânicas e precisão dimensional. É de extrema importância prever também registros e identificação do produto ao longo de todo o processo de fabricação, para que se houver necessidade seja possível rastrear o histórico dos registros e dados de manufatura do produto (DIETER et al., 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais SAE 8620H e DIN 16MnCr5 utilizados neste experimento foram adquiridos de suas fontes de fornecimento na condição esferoidizados, indicado para o processo de forjamento a frio, e em bobinas. Após preparação da superfície do material recebido, limpeza e revestimento com fosfato, foi realizada pelo fornecedor a seguinte sequência: operação de trefilação para eliminar qualquer desvio da forma da seção transversal circular do material, endireitamento e corte em barras para posterior forjamento. Os virabrequins de ambos os materiais foram tratados termicamente na mesma carga, assim como a usinagem que foi realizada sem ajustes do processo. A Figura 11 ilustra de forma sumarizada das principais etapas do processo de manufatura e o escopo das análises realizadas para cada uma das etapas.

Figura 11: Principais etapas do processo e o escopo das análises



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 5 apresenta a quantidade de amostras produzidas e coletadas a para cada etapa do processo de fabricação para posterior realização dos devidos ensaios e análises.

Tabela 5: Quantidade de amostras produzidas e coletadas

Análise	SAE 8620H		DIN 16MnCr5	
	Qtd produzida	Qtd coletada	Qtd produzida	Qtd coletada
Forjamento	150	30	150	30
Pré-Usinagem (antes ToTo)	120	30	120	30
Tratamento Térmico (ToTo)	90	30	90	30
Usinagem final (após ToTo)	60	60	60	60

A Tabela 6 apresenta a quantidade de corpos de prova e ensaios realizados para cada uma das avaliações definidas no escopo de análises ilustrado na Figura 11.

Tabela 6: Quantidade de Corpos de Prova (CP) e Ensaios

Análise	SAE 8620H		DIN 16MnCr5	
	CP	Ensaios	CP	Ensaios
Composição química	1	3	1	3
Ensaio de tração	3	3	3	3
Ensaio de forjabilidade	13	13	14	14
Metalografia	5	5	5	5
Dureza	15	30	15	30
Análise Camada	6	18	6	18
Geométrica	10	10	10	10
TOTAL	53	82	54	83

3.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL

A análise da composição química dos aços SAE 8620H e DIN 16MnCr5 foi realizada conforme a norma ASTM E415-17. Para realizar a caracterização química dos aços, foi preparado um (1) corpo de prova de cada material, realizado três (3) ensaios em cada um dos corpos de prova e considerado a média dos três (3) resultados obtidos para análise comparativa dos dados. Um espectrômetro de emissão ótica da marca Spectro (modelo Spectromaxx) foi utilizado para quantificar a faixa de elementos químicos de cada material, exceto para o carbono, que foi avaliado utilizando um carbonômetro da marca LECO, modelo C-200 pois apresenta uma melhor acuracidade de análise para este tipo de elemento químico.

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração dos aços SAE 8620H e DIN 16MnCr5 foi realizado conforme a norma DIN EN ISO 6892-1. Os corpos de provas utilizados para a realização dos ensaios foram confeccionados obedecendo as dimensões descritas na norma ASTM E8. Para realizar o ensaio de tração dos aços, foram preparados três (3) corpos de prova de cada material na condição esferoidizados, realizado um (1) ensaio em cada um dos corpos de prova (análise destrutiva) e considerado a média dos três (3)

resultados obtidos para análise comparativa dos dados obtidos. A velocidade do ensaio foi de 10 mm/min. O equipamento utilizado no ensaio foi uma Máquina Universal de Ensaio EMIC DL 6000 do LdTM da UFRGS com velocidade máxima de 300 mm/min.

Os resultados do limite de escoamento e resistência a tração foram retirados do próprio relatório da máquina universal de ensaios enquanto que os resultados do alongamento e estrição, em percentual (%), foram obtidos através das equações apresentadas a seguir:

Área (A)

$$A = \frac{\pi \times d^2}{4}$$

Equação 3

Alongamento (ϵ)

$$\epsilon = \ln\left(\frac{l_o - l_f}{l_o}\right) \times 100$$

Equação 4

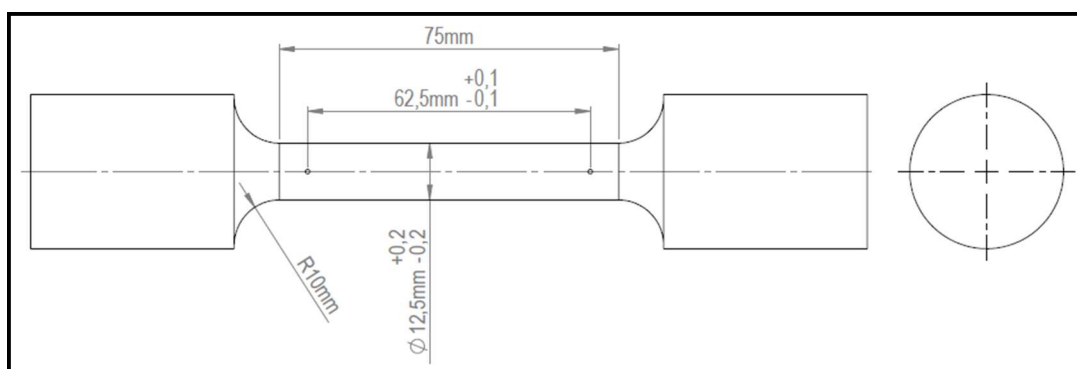
Estricção (Z)

$$Z = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

Equação 5

A Figura 12 ilustra o desenho representativo da usinagem do corpo de prova para o teste de tração, assim como as dimensões utilizadas para a confecção dos corpos de prova.

Figura 12: Corpo de prova para ensaio de tração: matéria-prima

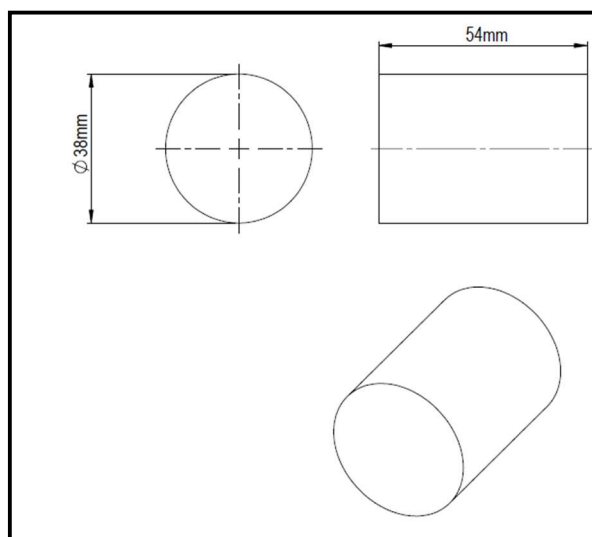


Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 ENSAIO DE FORJABILIDADE

O ensaio de forjabilidade dos aços SAE 8620H e DIN 16MnCr5 foi realizada utilizando *billets* cilíndricos de 38 mm de diâmetro por 54 mm de altura para ambos os materiais, conforme ilustrado na Figura 13. A preparação dos *billets* iniciou-se através do processo de usinagem das barras recebidas do fornecedor para se obter as dimensões desejadas até a fosfatização. Foram preparados treze (13) corpos de prova para o aço SAE 8620H e quatorze (14) corpos de prova para o aço DIN 16MnCr5 e realizado um (1) ensaio em cada um dos corpos de prova (análise destrutiva). O equipamento utilizado no ensaio foi uma Prensa Hidráulica FKL do LdTM da UFRGS com aplicação de cargas entre 50T e 230T para ambos os materiais. Os corpos de prova foram devidamente lubrificados antes da realização do ensaio de forjabilidade, utilizou-se incrementos de cargas de 25T até 150T e incremento de 10T a partir de 150T. O material em estudo DIN 16MnCr5 foi submetido a uma carga de 300T sem prévia lubrificação (mantido somente a lubrificação já existente no equipamento), com o objetivo de verificar a condição de forjabilidade do material em estudo com uma carga maior. Foi realizado o dimensionamento da espessura do corpo de prova antes e após a realização do ensaio para posteriormente calcular a deformabilidade através da aplicação das devidas e determinadas equações. A análise da forjabilidade foi realizada através ensaio de recalque, devido a este se assemelhar ao processo e pelas dimensões da barra não possibilitar realizar o ensaio de cunha.

Figura 13: Dimensões dos billets para o ensaio de forjabilidade

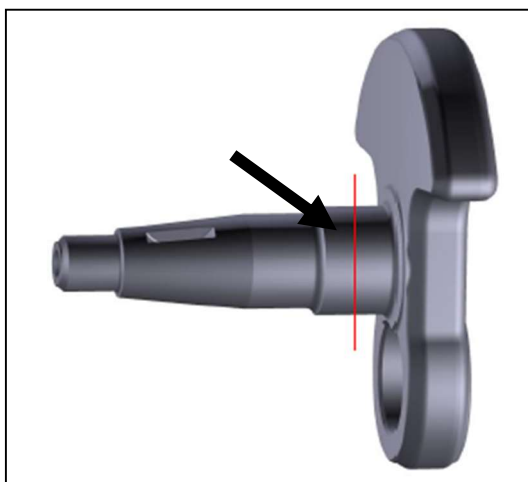


Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 ANÁLISE METALOGRAFICA

A análise metalográfica dos aços SAE 8620H e DIN 16MnCr5 foi realizada conforme orientações da norma ABNT NBR 13284, considerando as seguintes etapas do processo de fabricação: matéria-prima, forjamento, pré-usinagem, tratamento térmico e usinagem final. As amostras foram preparadas seguindo pelo: corte do material conforme ilustrado na Figura 14, identificação dos corpos de prova, embutimento em resina epóxi, polimento em lixa de gramatura 100, 200, 400, 600, 1200, polimento final em pasta de diamante de 2 mm e 1 mm e posterior ataque químico de Nital (2%). Para cada etapa do processo de fabricação foram preparados um (1) corpo de prova do aço SAE 8620H e um (1) corpo de prova do aço DIN 16MnCr5. O registro das imagens foi realizado com o auxílio de um microscópio óptico e com ampliação óptica de 500X e 1000X para cada um dos corpos de prova.

Figura 14: Seção de corte do Corpo de Prova para análise



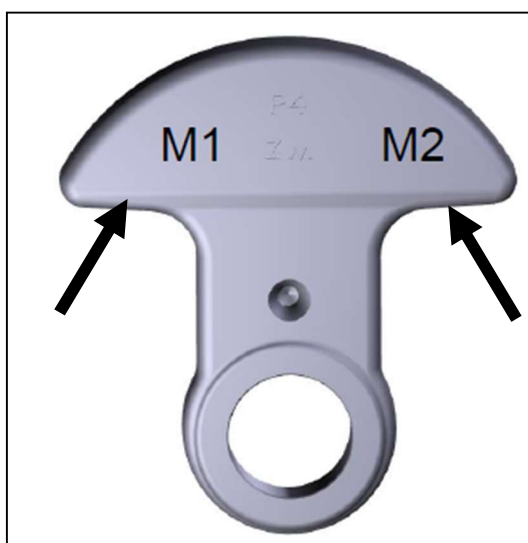
Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 ENSAIO DE DUREZA

A avaliação da dureza dos aços SAE 8620H e DIN 16MnCr5 foi realizada seguindo as orientações da norma DIN EN ISO 6506 (Brinell) e da norma DIN EN ISO 6508 (Rockwell), considerando as seguintes etapas do processo de fabricação: matéria-prima, forjamento, pré-usinagem (antes ToTo), tratamento térmico e usinagem final (após ToTo). As peças produzidas antes do tratamento térmico, ou seja, matéria-prima, forjado e pré-usinado foram avaliadas na escala Brinell (HB 2,5/187,5) com um durômetro modelo UH930 Wolpert enquanto que as peças

produzidas após o tratamento térmico foram avaliadas na escala Rockwell (HRC) com um durômetro modelo 150 CS Qness. Os ensaios de dureza, exceto para a matéria-prima, foram realizados na região do contrapeso conforme ilustra a Figura 15. Para a realização dos ensaios foram coletados três (3) amostras de cada etapa do processo de fabricação, realizado dois (2) ensaios em cada um dos pontos (M1 e M2) e reportado neste trabalho a média de cada uma das amostras avaliadas.

Figura 15: Pontos e região para avaliação da dureza



Fonte: Elaborado pelo autor

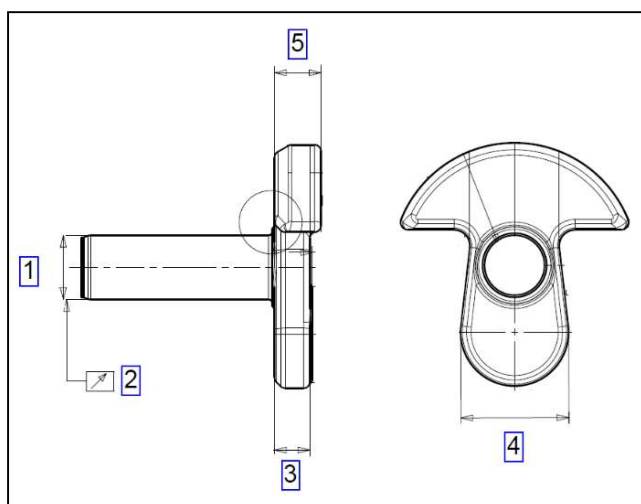
3.6 ANÁLISE DE CAMADA

A avaliação da profundidade da camada cementada dos aços SAE 8620H e DIN 16MnCr5 foi realizada seguindo as orientações da norma DIN EN ISO 6507, considerando as seguintes etapas do processo de fabricação: tratamento térmico e usinagem final (após ToTo). As amostras foram preparadas seguindo pelo: corte do material conforme ilustra a Figura 14, identificação dos corpos de prova, embutimento em resina epóxi, polimento em lixa de gramatura 100, 200, 400, 600, 1200, polimento final em pasta de diamante de 2 mm e 1 mm e posterior ataque químico de Nital (2%). Foram preparados para cada etapa do processo, três (3) corpos de prova para o aço SAE 8620H e três (3) corpos de prova para o aço DIN 16MnCr5 e realizado três (3) ensaios em cada um dos corpos de prova e reportado neste trabalho o resultado da média dos três (3) ensaios realizados. A avaliação da espessura de camada foi realizada com o auxílio de um microscópio óptico e um micro durometro modelo Q10A Qness.

3.7 AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA

A análise geométrica comparativa foi realizada somente na etapa de forjamento do virabrequim, com objetivo de verificar se a matriz atual poderia ser utilizada para realizar o forjamento do aço alternativo DIN 16MnCr5 e manter as dimensões equivalentes as do aço atual SAE 8920H. Para a avaliação geométrica foram coletados na condição dez (10) amostras de cada um dos materiais em estudo na condição forjada, do total de 150 amostras produzidas para cada um dos materiais. A análise geométrica foi realizada em cada amostra coletada utilizando equipamentos convencionais do laboratório de metrologia, ou seja, máquina de medição por coordenadas, paquímetro e micrometro com resolução milesimal. A Figura 16 representa as características avaliadas no forjado no qual estão representadas por um número. Para análise dos dados foi considerada a média dos resultados obtidos. Os referidos valores obtidos são somente para análise comparativa, pois as especificações e tolerâncias do produto são confidenciais.

Figura 16: Características geométricas avaliadas no forjado



Geometria:

- (1) diâmetro do pino (mm);
- (2) batimento do pino (mm);
- (3) espessura contrapeso menor (mm);
- (4) diâmetro contrapeso menor (mm);
- (5) espessura contrapeso maior (mm).

Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios e análises realizadas, assim como a discussão de cada uma delas.

4.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL

A Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam a análise de composição química dos materiais, os limites mínimos e máximos das especificações, os resultados das avaliações individuais e os resultados médios. Observa-se que ambos os materiais atendem as normas de composição química, ou seja, a composição dos materiais está de acordo com os limites especificados pelas normas.

Tabela 7: Análise da composição química do aço SAE 8620H

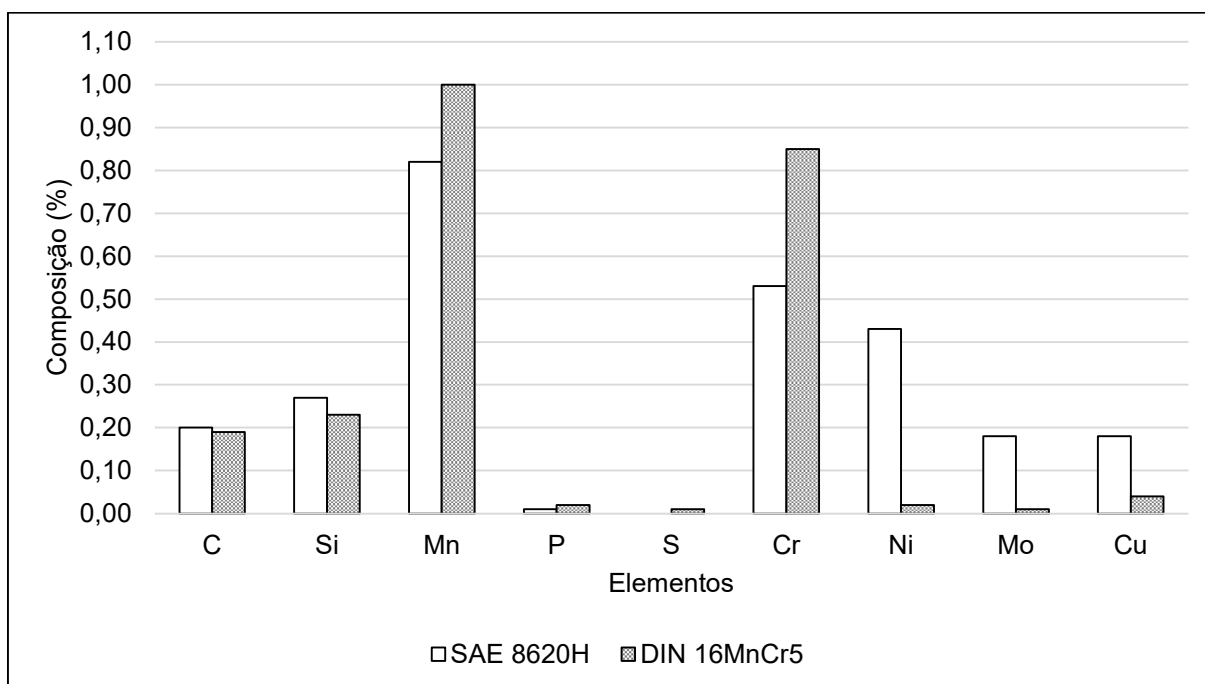
Limites	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Min	0,18	0,15	0,70	-	-	0,40	0,40	0,15	-
Max	0,23	0,35	0,90	0,035	0,040	0,60	0,70	0,25	0,35
Resultados	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
1	0,20	0,27	0,82	0,011	0,001	0,53	0,44	0,18	0,18
2	0,20	0,27	0,81	0,011	0,001	0,53	0,42	0,18	0,17
3	0,20	0,27	0,82	0,011	0,001	0,53	0,42	0,18	0,18
Média	0,20	0,27	0,82	0,011	0,001	0,53	0,43	0,18	0,18
DesvPad	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,006

Tabela 8: Análise da composição química do aço DIN 16MnCr5

Limites	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Min	0,14	-	1,00	-	-	0,80	-	-	-
Max	0,19	0,40	1,30	0,035	0,035	1,10	0,25	0,06	0,35
Resultados	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
1	0,18	0,24	1,01	0,016	0,010	0,85	0,020	0,009	0,04
2	0,19	0,23	0,99	0,017	0,011	0,85	0,021	0,008	0,04
3	0,19	0,23	0,99	0,018	0,010	0,85	0,022	0,009	0,04
Média	0,19	0,23	1,00	0,017	0,010	0,85	0,021	0,009	0,04
DesvPad	0,006	0,006	0,012	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000

A Figura 17 representa em forma gráfica um comparativo dos resultados médios de cada um dos elementos que compõem o material SAE 8620H e o material DIN 16MnCr5, obtidos através da análise de composição química. O desvio padrão foi desprezado no gráfico devido não ter havido divergências significativas entre as avaliações conforme pode ser verificado na Tabela 7 e na Tabela 8.

Figura 17: Comparativo gráfico dos elementos que compõem os aços



Fonte: Elaborado pelo autor

A avaliação comparativa da composição química dos materiais SAE 8620H e DIN 16MnCr5 foram realizadas considerando como referências as dissertações de CRUZ (2014) e DREHMER (2013), onde também foram realizadas análises comparativas da composição química entre dois ou mais diferentes materiais.

Realizando a análise dos resultados obtidos neste trabalho para ambos os aços avaliados, verificou-se que o material DIN 16MnCr5 apresenta um maior teor de Manganês e Cromo e um menor teor de Níquel e Molibdênio se comparado com o material SAE 8620H. A diferença dos demais elementos foi desprezada pois considerou-se que os resultados de ambos os aços são similares e sem impacto para a aplicação do produto. Além disso, se compararmos os resultados do teor de Manganês, Cromo, Níquel e Molibdênio obtidos por CRUZ (2014) e DREHMER (2013)

para os materiais SAE 8620H e DIN 16MnCr5, podemos identificar que os mesmos são equivalentes aos encontrados neste trabalho.

Com base nos efeitos e características descritos na *ASM International Handbook* e também citados por CRUZ (2014), para cada um dos elementos de liga mencionados anteriormente, os mesmos tem grande influência no tratamento térmico, ou seja, temperabilidade, resistência ao desgaste e tenacidade. Além disso um dos fatores que pode explicar o fato de o aço DIN 16MnCr5 apresentar um maior teor de Manganês é que normalmente esta é uma das maneiras menos dispendiosa de aumentar a temperabilidade. O cromo e o molibdênio também estão entre os elementos mais econômicos por unidade de aumento da temperabilidade. O níquel é o mais caro por unidade, mas justificado quando a tenacidade é uma consideração primária.

Baseado nos dados obtidos e ilustrados acima, convém salientar que conforme suas respectivas normas, os resultados encontrados para cada um dos elementos apresentam-se dentro dos seus limites de especificações. Além disso, apesar de o aço DIN 16MnCr5 ter apresentado um menor teor de molibdênio e níquel que pode ser prejudicial ao endurecimento, por outro lado tem um maior teor de cromo e manganês que pode compensar e melhorar esta propriedade, posteriormente confirmados através do ensaio de dureza realizado do tópico 4.5 deste.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

A Tabela 9 e Tabela 10 apresentam, respectivamente, os resultados individuais, médios e o desvio padrão do limite de escoamento, resistência à tração, alongamento e estrição obtidos através do ensaio de tração de ambos os materiais.

Tabela 9: Resultados do ensaio de tração SAE 8620H

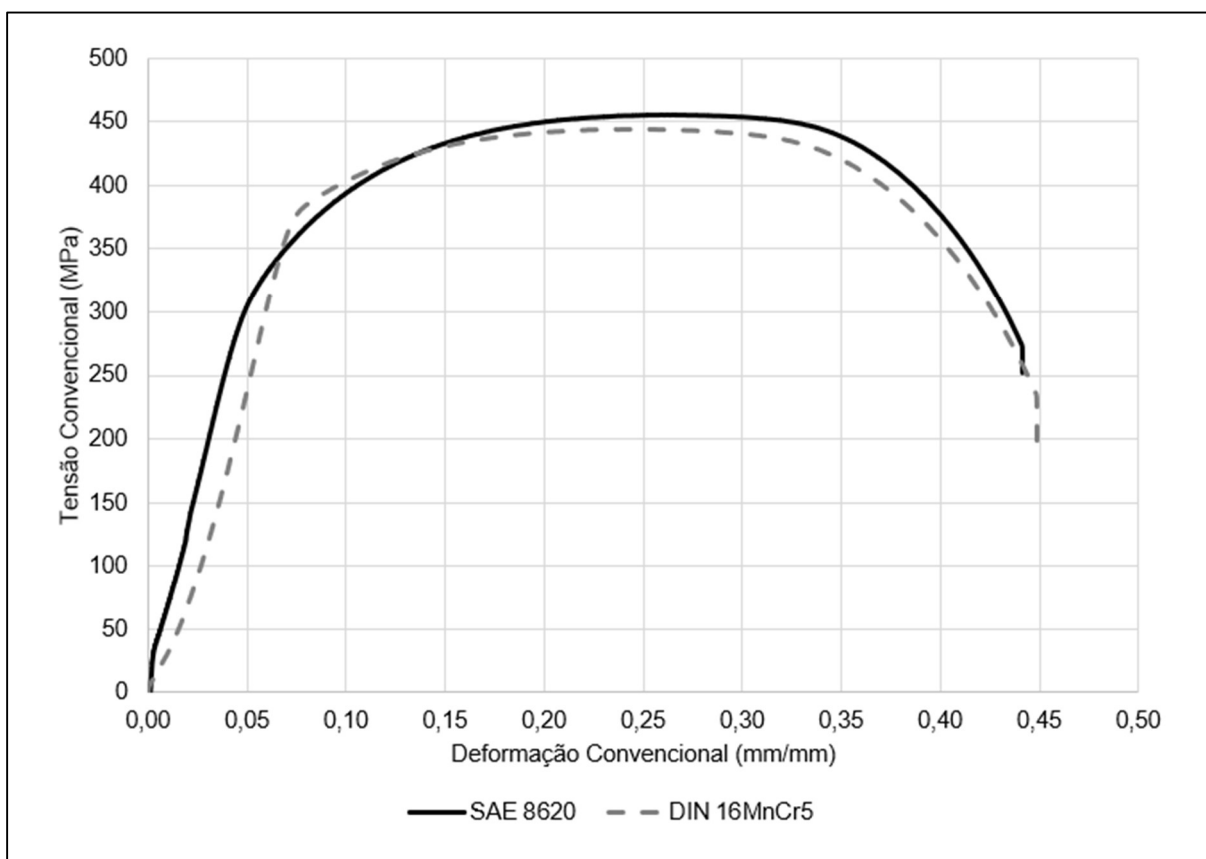
Propriedade	Resultados			Média/ DesvPad
	CP 01	CP 02	CP03	
Limite Escoamento (MPa)	286,1	306,0	285,6	292,6 ± 11,6
Resistência à Tração (MPa)	450,1	455,3	453,2	452,9 ± 2,6
Alongamento (%)	51,0	49,4	51,0	50,5 ± 0,9
Estricção (%)	76,5	77,3	78,1	77,3 ± 0,8

Tabela 10: Resultados do ensaio de tração DIN 16MnCr5

Propriedade	Resultados			Média/ DesvPad
	CP 01	CP 02	CP03	
Limite Escoamento (MPa)	360,9	366,0	351,5	359,5 ± 7,4
Resistência à Tração (MPa)	437,8	438,5	435,6	437,3 ± 1,5
Alongamento (%)	55,4	55,1	54,8	55,1 ± 0,3
Estricção (%)	82,1	82,5	82,5	82,4 ± 0,2

A Figura 18 apresenta o gráfico de tensão de escoamento convencional do aço SAE 8620H e do aço DIN 16MnCr5. Observa-se que para ambos os materiais o patamar de escoamento não é bem definido e apresentam um comportamento dúctil pela forma da curva.

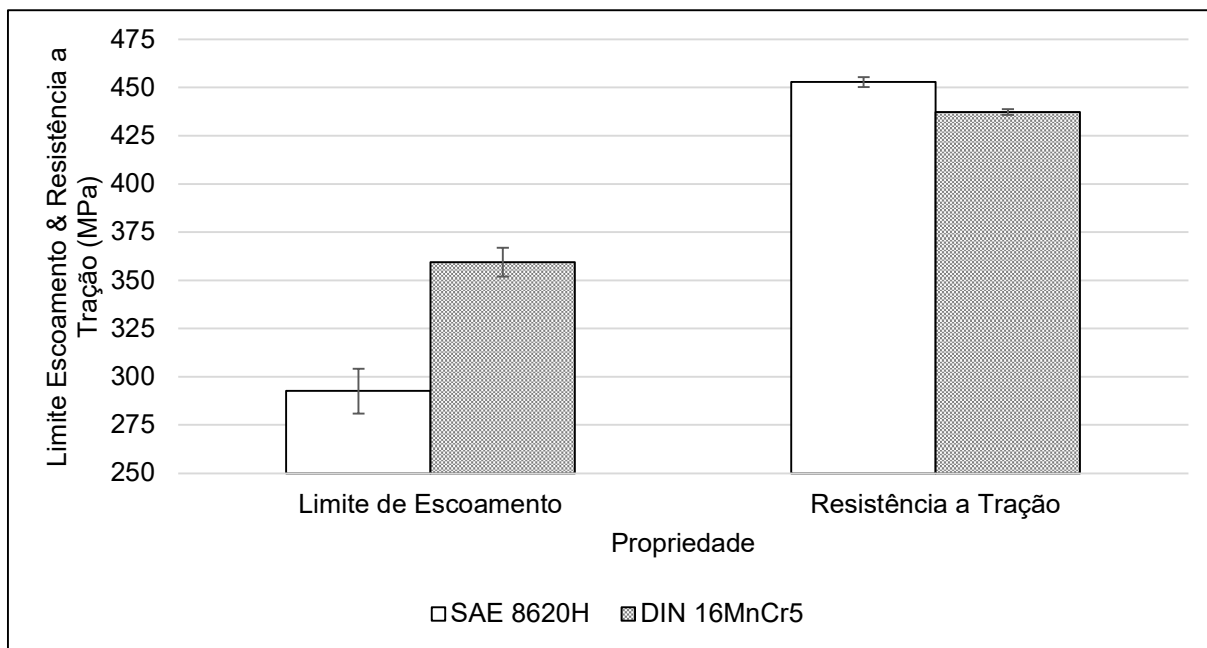
Figura 18: Gráfico Tensão x Deformação: SAE 8620H e DIN 16MnCr5



Fonte: Elaborado pelo autor

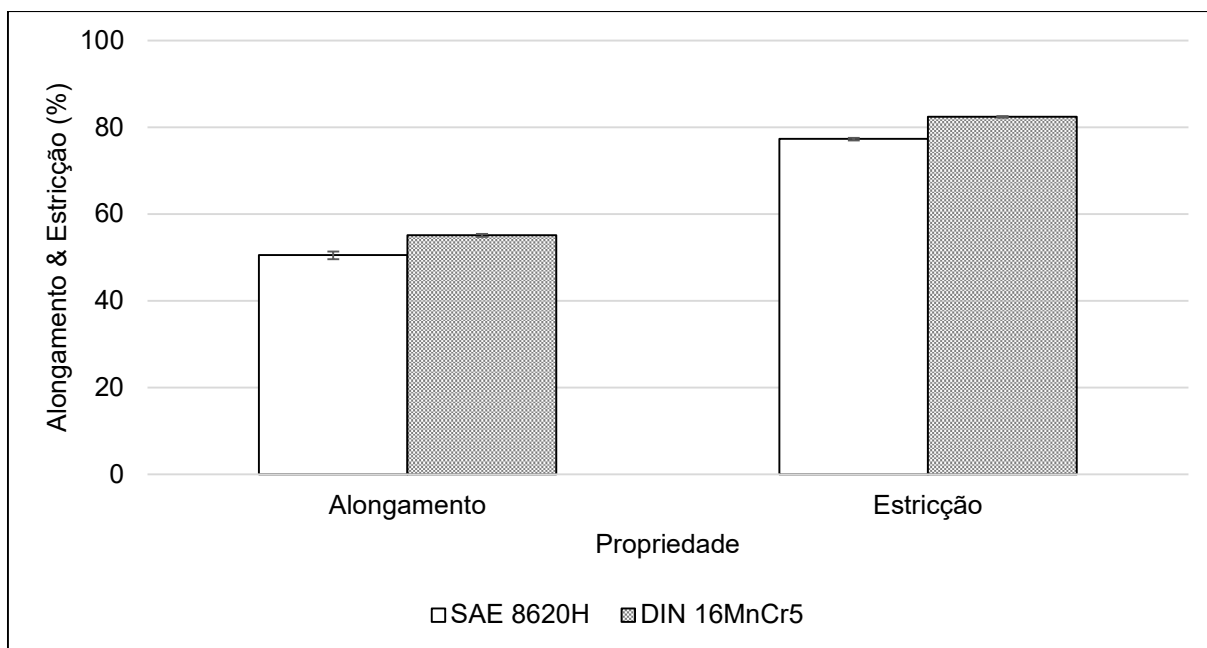
A Figura 19 e Figura 20 apresentam, respectivamente, um comparativo gráfico dos resultados médios e do desvio padrão para as seguintes propriedades: Limite de Escoamento, Resistência à Tração, Alongamento e Estricção.

Figura 19: Gráfico dos resultados do limite de escoamento e resistência a tração



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20: Gráfico dos resultados do alongamento e estricção



Fonte: Elaborado pelo autor

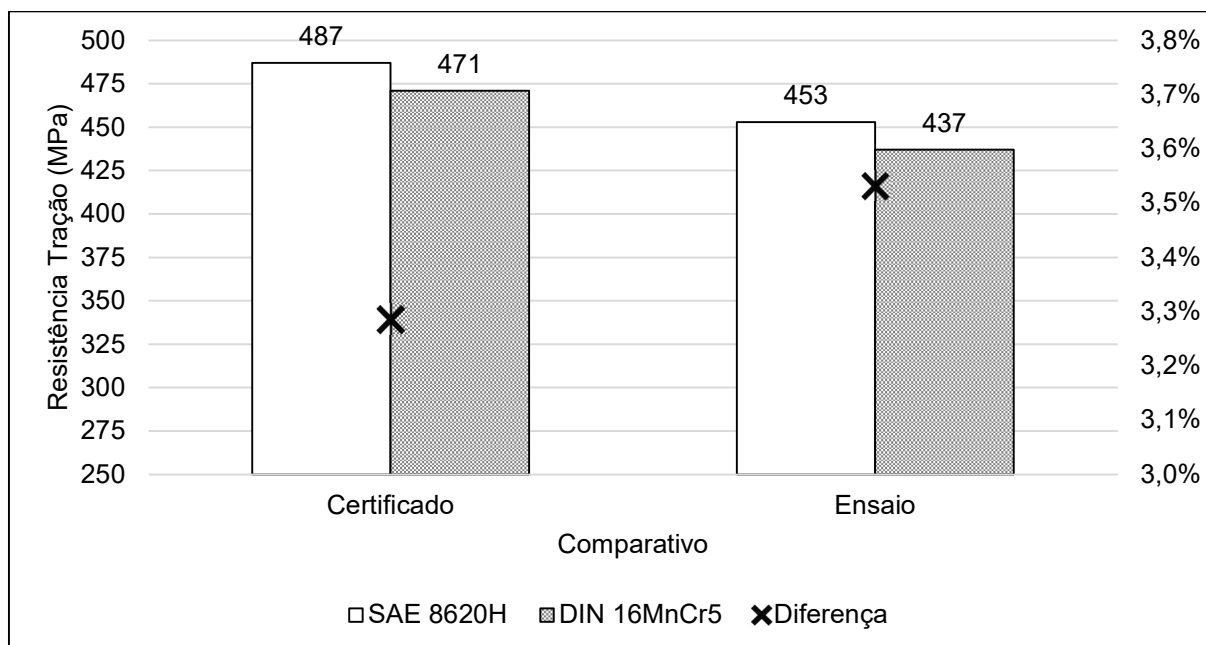
Em termos de limite de escoamento o aço 16MnCr5 apresenta um valor médio de 359 MPa, superior ao apresentado pelo aço 8620H que é de 292 MPa. Em relação a resistência a tração o comportamento dos materiais inverte com o aço 8620H tendo um valor superior se comparado ao aço 16MnCr5.

Em relação ao alongamento o aço 16MnCr5 apresenta valores próximos de 55% enquanto o aço 8620H apresenta valores próximos de 50%, cabe salientar que estes valores elevados de alongamento podem ser explicados pela condição esferoidizada de fornecimento do material. Observa-se também que em relação a estrição o comportamento é semelhante ao alongamento.

O ensaio de tração dos materiais DIN 16MnCr5 e SAE 8620H foi realizado considerando como base ideativa a tese de LIMA (2011), no qual utilizou o ensaio de tração como uma das formas de buscar desenvolver uma nova metodologia para a determinação das curvas de resistência a fratura de materiais com comportamento elasto-plástico de aço API classe X65 utilizado para tubulações de grande diâmetro para transporte de óleo e gás. Em sua avaliação, LIMA (2011) levou em consideração o Limite de Escoamento, Resistência à Tração, Alongamento e a curva Tensão versus Deslocamento. Além das propriedades avaliadas por LIMA (2011), considerou-se neste trabalho também os resultados da estrição. Em relação a forma da disposição dos resultados deste, utilizou-se como base o artigo de VIEIRA (2013) onde realizou um estudo comparativo das propriedades mecânicas através do ensaio de tração de um tubo e de um corpo de prova.

Realizando uma análise comparativa dos resultados obtidos neste trabalho através do ensaio de tração, verificou-se que o material DIN 16MnCr5 apresentou resultados superiores para o limite de escoamento, alongamento e estrição e para a resistência a tração o material SAE 8620H apresentou um resultado 3,5% superior. Buscando obter uma maior confiabilidade nos resultados obtidos, realizou-se um comparativo da resistência a tração obtidos através dos ensaios e dos resultados dos certificados recebido do fornecedor, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21: Gráfico resistência a tração: certificado versus resultados dos ensaios



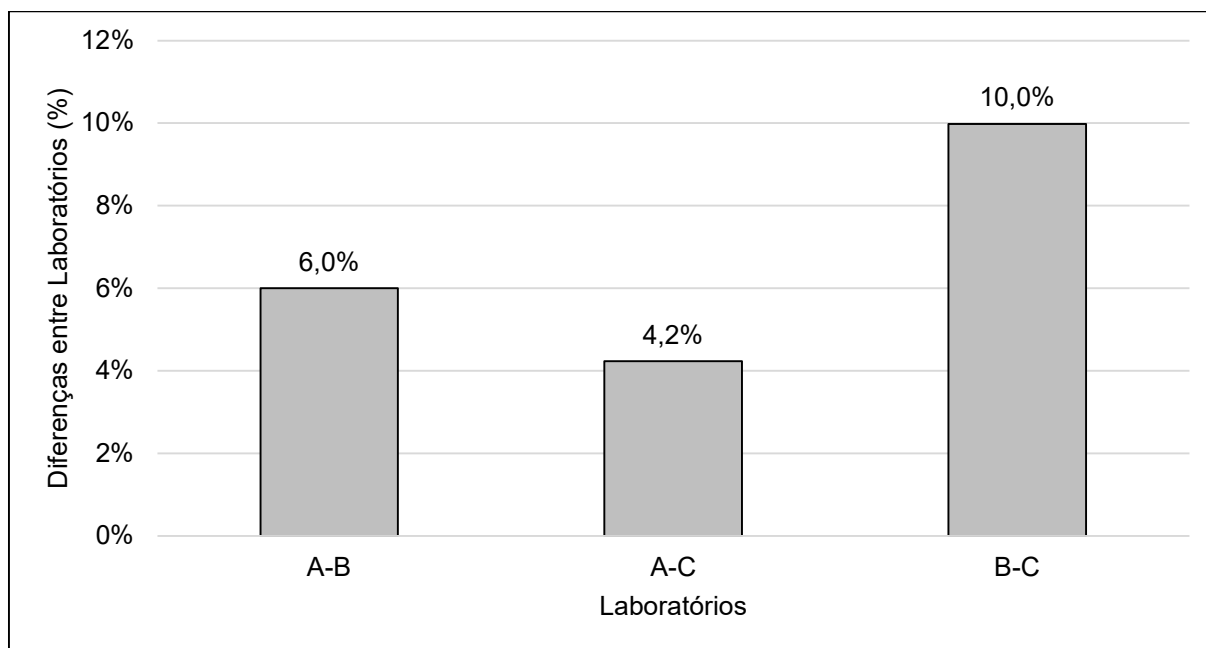
Fonte: Elaborado pelo autor

Através do comparativo da resistência a tração obtidos dos ensaios e dos resultados dos certificados recebidos dos fornecedores, foi possível identificar que o material SAE 8620H apresenta um resultado 3,3% superior, ou seja, muito próximo do resultado de 3,5% obtidos neste trabalho. Verificou-se também, através dos dados obtidos que há uma diferença, para ambos os materiais, em torno de 7,0% entre o ensaio realizado e o certificado recebido do fornecedor, o que é desprezível e aceitável devido a fatores que podem influenciar o resultado durante o ensaio, como por exemplo: imprecisões dos ensaios, comprimento e formato do corpo de prova e velocidade de aplicação da carga.

Apesar de o material SAE 8620H ter apresentado um resultado minimamente superior para a resistência a tração, em torno de 3,5%, podemos afirmar através da análise dos dados que ambos os aços são iguais em relação a esta propriedade e além disso os resultados apresentados e obtidos são coerentes e confiáveis, pois conforme teste interlaboratorial de ensaio de tração em corpos-de-prova retirados de uma barra de aço SAE 8620 realizado por LIBARDI (2010) para intercomparação de resultados de resistência a tração, limite de escoamento, alongamento e estricção entre dois laboratórios externos acreditados pelo INMETRO (A e B) e um Laboratório de Análises e Ensaio de Materiais (C), verificou-se que a resistência a tração apresentou um diferença entre os laboratórios de 4,2% (A-C) a 10,0% (B-C), ilustrado

na Figura 22, mesmo que seguindo os procedimentos de ensaio de acordo com a norma ASTM E8/E8M-09. Apesar da variação encontrada entre os resultados obtidos os dados complementares e estudos realizados indicam que o desempenho dos laboratórios participantes foi satisfatório.

Figura 22: Resultados resistência tração ensaio interlaboratorial SAE 8620

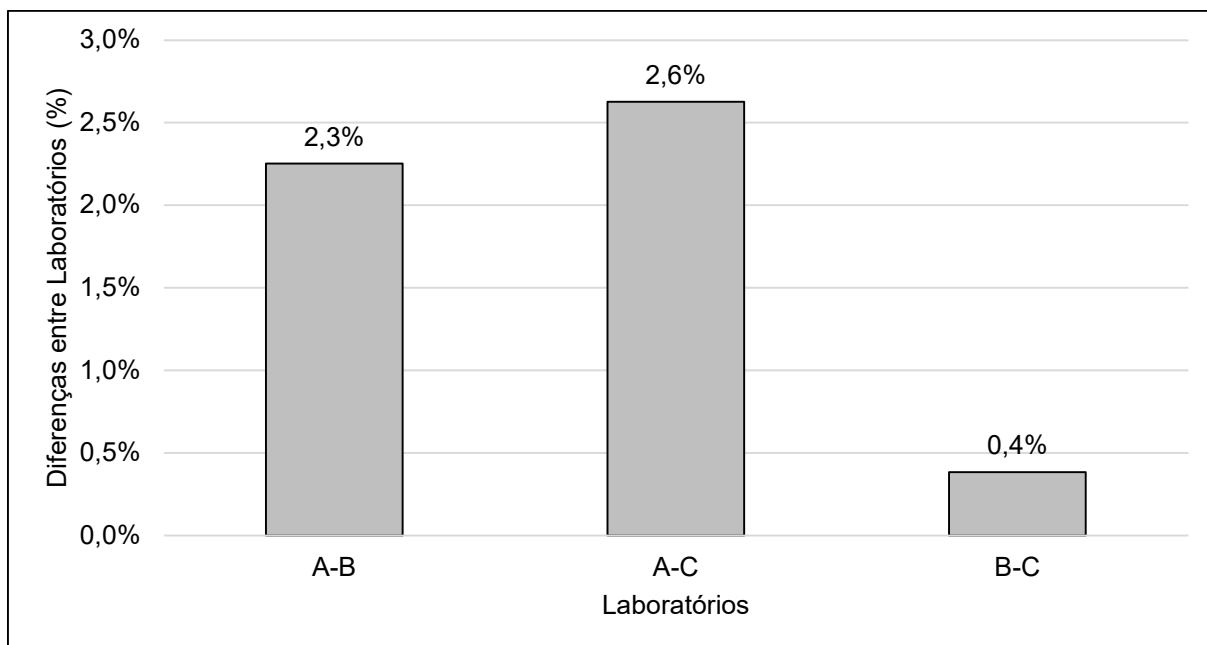


Fonte: Elaborado pelo autor

Em contrapartida, o aço DIN 16MnCr5 apresentou um limite de escoamento 19% superior ao SAE 8620H. Podemos afirmar que os resultados apresentados e obtidos neste trabalho são coerentes e confiáveis, pois conforme teste interlaboratorial de ensaio de tração em corpos-de-prova retirados de uma barra de aço SAE 8620 realizado por LIBARDI (2010) para comparação de resultados de resistência a tração, verificou-se que o limite de escoamento apresentou uma diferença entre os laboratórios de 0,40% (B-C) a 2,60% (A-C), ilustrado na Figura 23. Como as variações dos resultados interlaboratorial para a resistência a tração estão compatíveis coerentes com as variações dos resultados obtidos neste trabalho, podemos assumir que a diferença interlaboratorial pode ser considerada para o limite de escoamento, o que nos leva a confirmar que o limite de escoamento em torno de 19% superior do aço DIN 16MnCr5 em relação ao aço SAE 8620H é um fato. O Limite de Escoamento maior é um fator muito positivo pois esta propriedade é benéfica para a determinada

aplicação em virabrequim, além de que representa o limite superior das forças que podem ser aplicadas sem que haja deformação permanente no componente

Figura 23: Resultados limite escoamento ensaio interlaboratorial SAE 8620

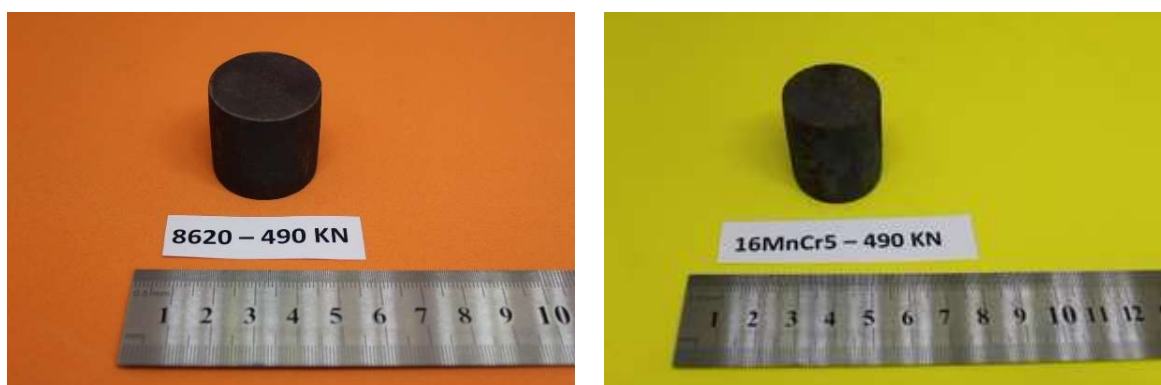


Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 ENSAIO DE FORJABILIDADE

As condições dos materiais após o ensaio de forjabilidade estão ilustrados entre a Figura 24 e a Figura 37. Foram aplicadas cargas entre 50T e 230T e com incrementos de 25T até 150T e 10T a partir de 150T.

Figura 24: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 50T

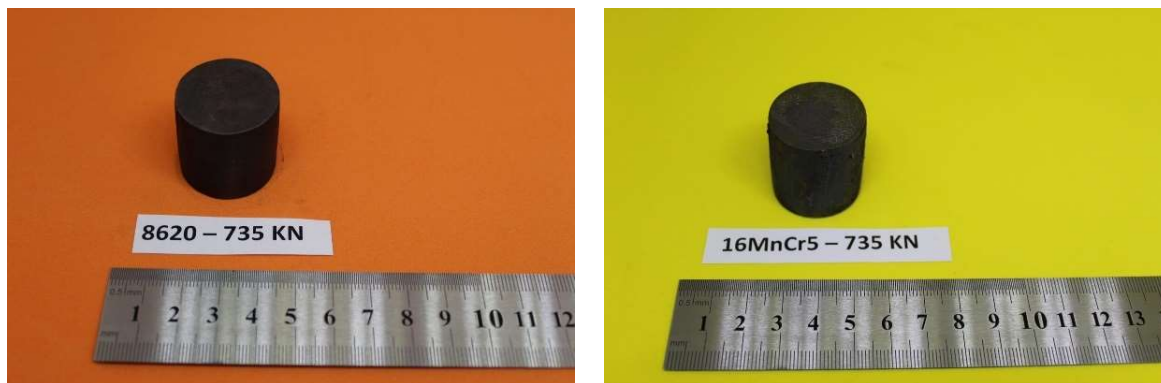


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 25: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 75T

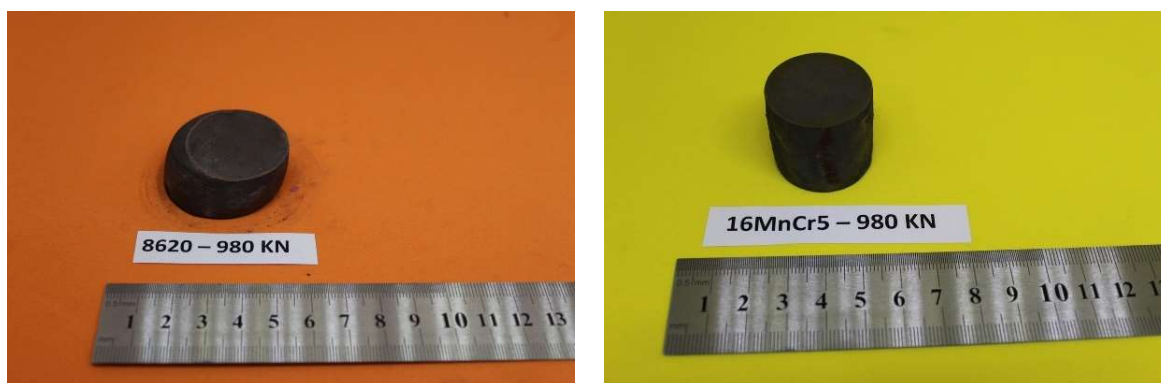


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 100T

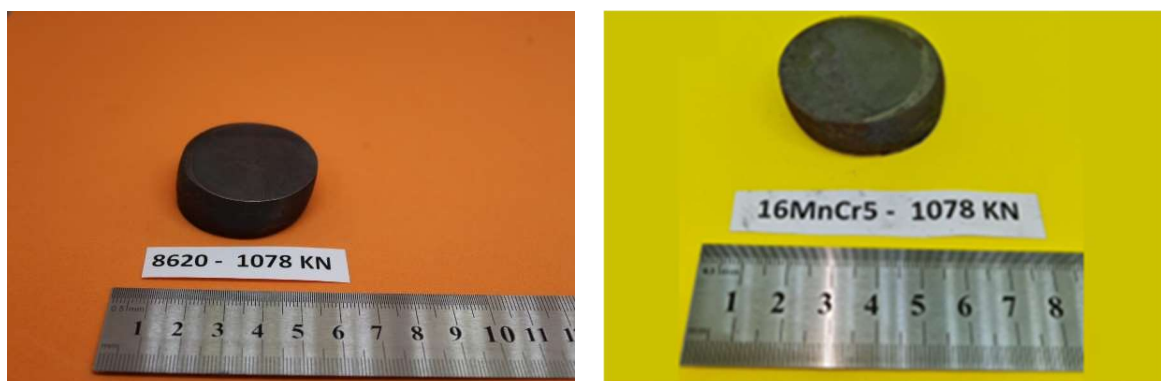


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 125T

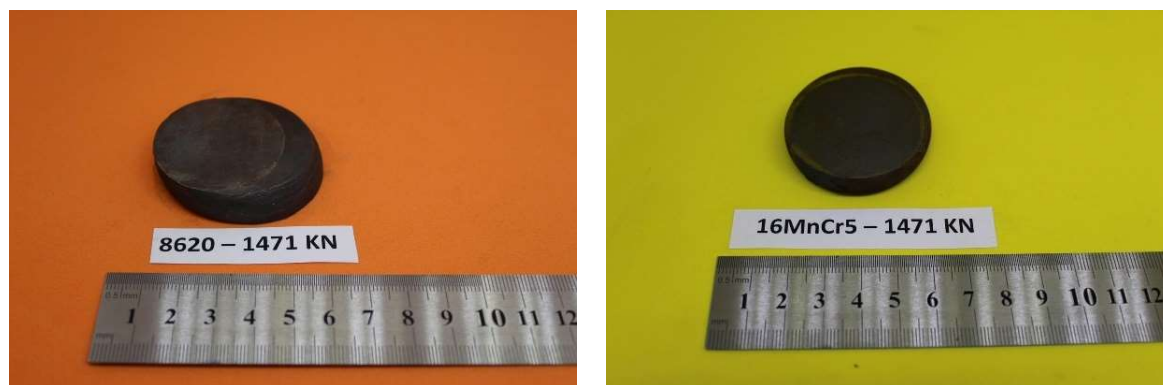


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 150T

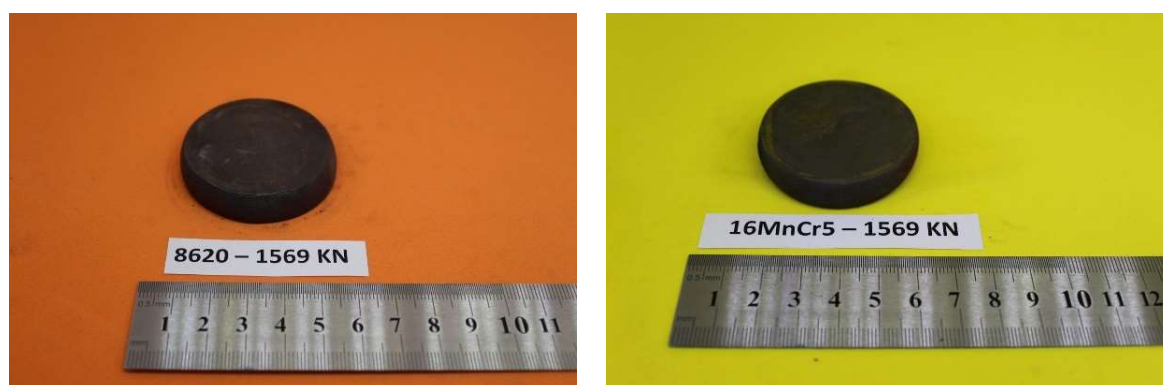


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 160T



A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 170T

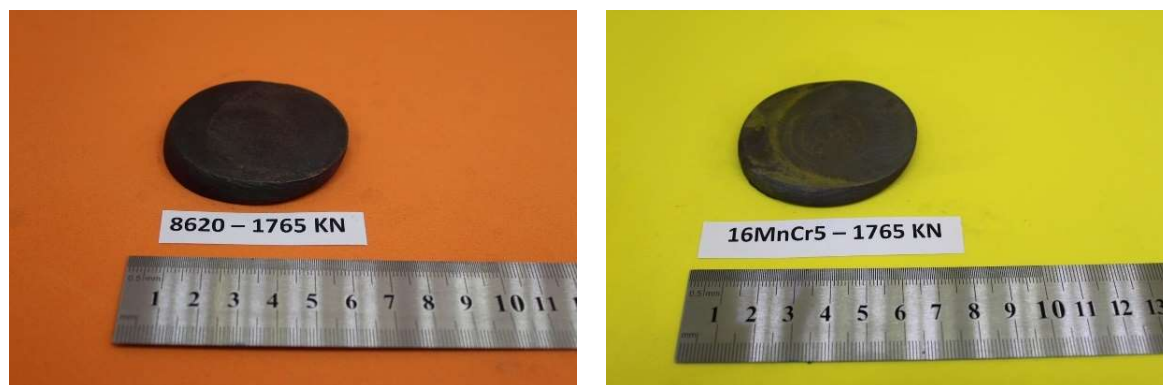


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 180T

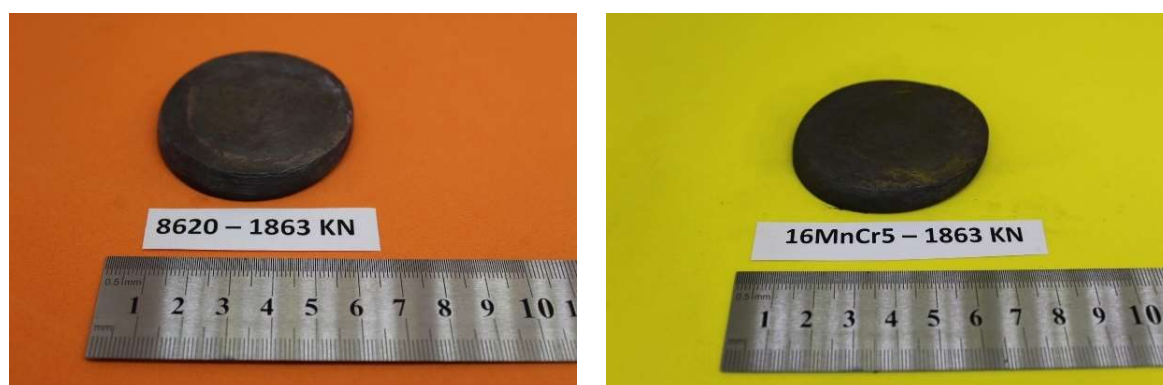


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 190T

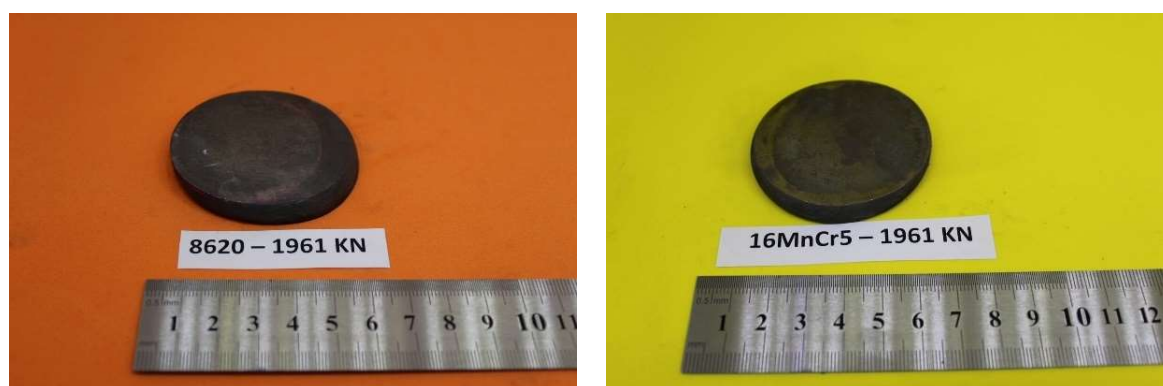


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 200T

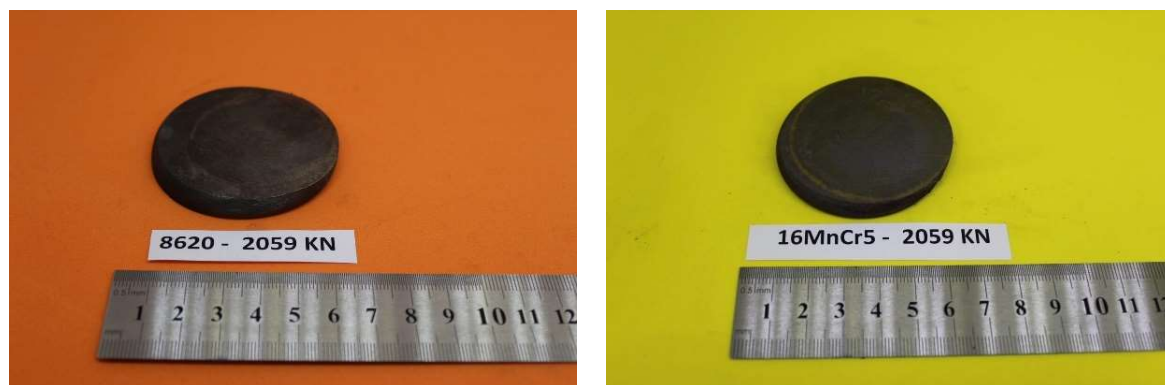


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 210T

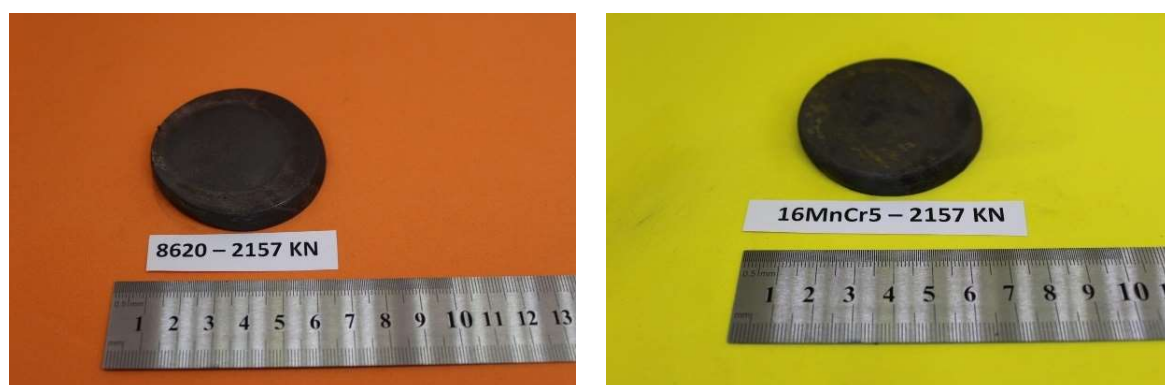


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 220T

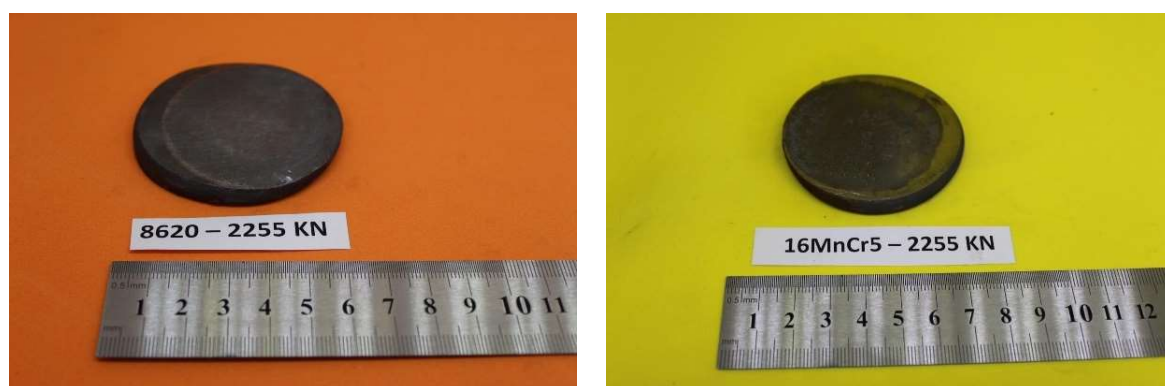


A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36: Condição do material após ensaio de forjabilidade com carga de 230T



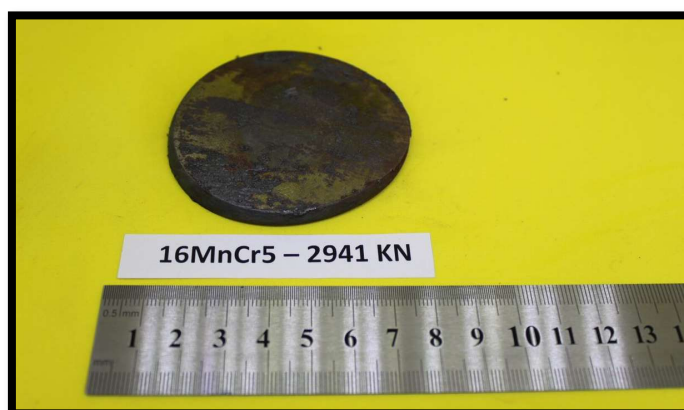
A) SAE 8620H

B) DIN 16MnCr5

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 37 apresenta o corpo de prova após o ensaio de forjabilidade. Nesse ensaio foi utilizada uma carga de 300T sem a adição de lubrificação, ou seja, considerado o lubrificante residual. Após o ensaio o material não apresentou trincas e/ou falhas superficiais.

Figura 37: Forjamento com carga de 300T | DIN 16MnCr5



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam os resultados da deformabilidade de ambos materiais. Os resultados foram obtidos através dos ensaios de forjabilidade e posterior aplicação e cálculo através da Equação 1 e da Equação 2.

Tabela 11: Resultados do ensaio de deformabilidade do material SAE 8620H

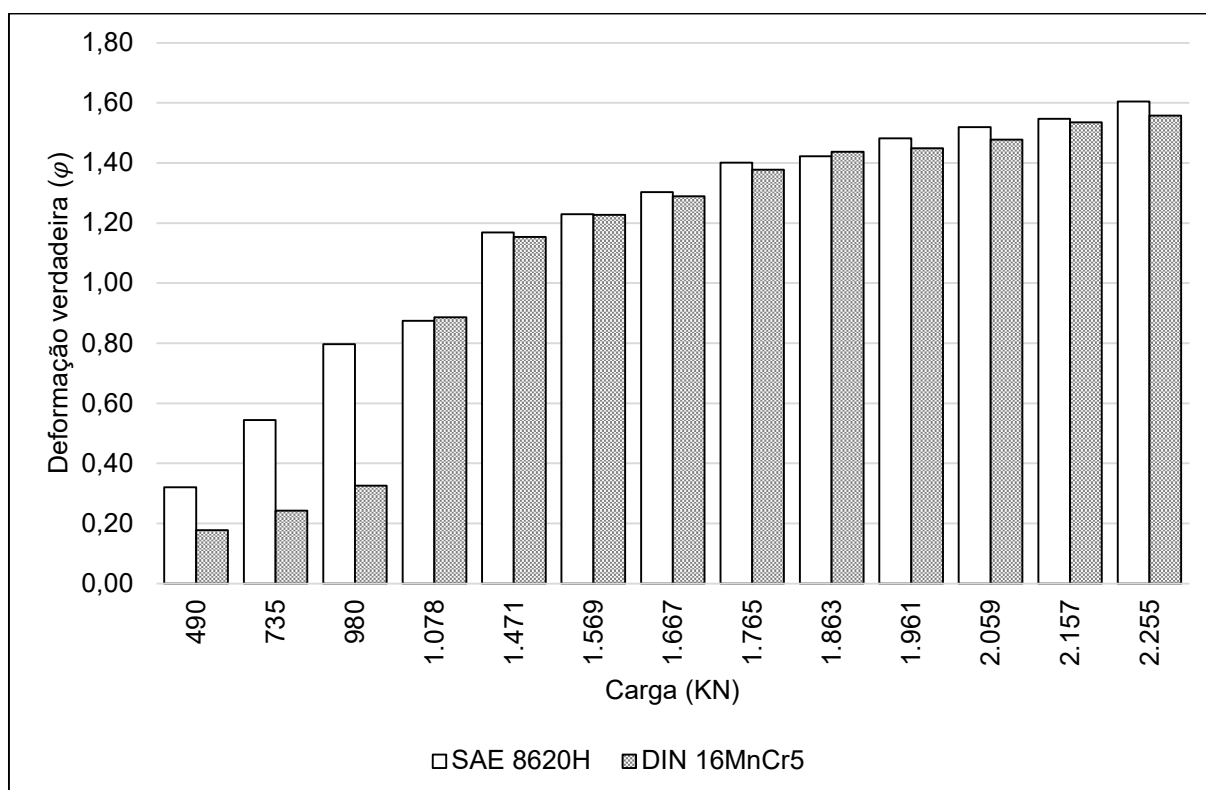
Carga (KN)	L ₀ (mm)	L (mm)	ϕ	Visual: Isento de trincas superficiais?
490	38,00	27,60	0,320	Sim
735	38,00	22,05	0,544	Sim
980	38,00	17,13	0,797	Sim
1.078	38,00	15,85	0,874	Sim
1.471	38,00	11,80	1,169	Sim
1.569	38,00	11,12	1,229	Sim
1.667	38,00	10,33	1,303	Sim
1.765	38,00	9,36	1,401	Sim
1.863	38,00	9,17	1,422	Sim
1.961	38,00	8,63	1,482	Sim
2.059	38,00	8,32	1,519	Sim
2.157	38,00	8,09	1,547	Sim
2.255	38,00	7,63	1,605	Sim

Tabela 12: Resultados do ensaio de deformabilidade do material DIN 16MnCr5

Carga (KN)	L ₀ (mm)	L (mm)	φ	Visual: Isento de trincas superficiais?
490	38,00	31,83	0,177	Sim
735	38,00	29,79	0,243	Sim
980	38,00	27,44	0,326	Sim
1.078	38,00	15,67	0,886	Sim
1.471	38,00	11,99	1,154	Sim
1.569	38,00	11,14	1,227	Sim
1.667	38,00	10,47	1,289	Sim
1.765	38,00	9,59	1,377	Sim
1.863	38,00	9,03	1,437	Sim
1.961	38,00	8,92	1,449	Sim
2.059	38,00	8,67	1,478	Sim
2.157	38,00	8,19	1,535	Sim
2.255	38,00	8,00	1,558	Sim
2.941	38,00	6,44	1,775	Sim

A Figura 38 representa o comparativo em forma gráfica da deformação verdadeira dos aços quando submetido a compressão. Os resultados do gráfico foram obtidos através do ensaio de forjabilidade e dos dados da Tabela 11 e Tabela 12.

Figura 38: Comparativo gráfico da deformação verdadeira



Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando os resultados obtidos através do ensaio de forjabilidade, verificou-se que o material SAE 8620H apresentou uma deformação em torno de 50% maior quando aplicado cargas entre 490 KN e 980 KN, enquanto que com cargas acima de 980KN apresentou uma diferença de deformação entre 1,4% e 3,0% entre os resultados do aço SAE8620H e do aço DIN 16MnCr5. A diferença da deformação verdadeira para cargas baixas se dá devido ao coeficiente de encruamento.

O material DIN 16MnCr5, objeto de estudo, apresentou uma boa forjabilidade assim como o material SAE 8620H. Para as condições de ensaio submetidas, ambos os materiais não apresentaram defeitos superficiais após análise com líquidos penetrantes. O aço DIN 16MnCr5 não apresentou falhas superficiais mesmo quando submetido a uma carga de 300T. A bibliografia *SCHULER Metal Forming Handbook* considera que deformações verdadeiras de $\varphi=1,6$ estão no limite de deformação para processos a frio e neste trabalho obteve-se deformações verdadeiras acima destes valores para o aço 16MnCr5.

Baseado nos resultados e análise dos dados do ensaio de forjabilidade, podemos afirmar que ambos os aços possuem uma boa forjabilidade e apresentaram resultados de deformabilidade equivalentes, além de não terem apresentado defeitos superficiais, mesmo quando submetido a uma carga de 300T.

4.4 ANÁLISE METALOGRAFICA

Realizando uma análise comparativa dos resultados obtidos através da metalografia dos materiais SAE 8620H e 16MnCr5, verificou-se que ambos os aços apresentam microestrutura similar para todas as etapas do processo de fabricação, ou seja, desde a matéria-prima até a usinagem final. A seguir as imagens comparativas da análise metalográfica com ampliação óptica de 500X e 1000X para as seguintes etapas do processo de fabricação: matéria-prima, forjamento, pré-usinagem, tratamento térmico e usinagem final.

4.4.1 Metalografia da matéria-prima

Conforme ilustrados na Figura 39 e Figura 40, verificou-se que ambas as matérias-primas, apresentam microestrutura similar. A microestrutura da matéria-prima é formada por ferrita (regiões mais claras) e cementita esferoidizados (regiões mais escuras). O material SAE 8620H apresenta grau de esferoidização GE 80% enquanto

que o material DIN 16MnCr5 apresenta grau de esferoidização GE 90%. O grau de esferoidização foi determinado conforme a norma ABNT NBR 14677, e utilizado como critério de comparação o aço COPANT 108.

Figura 39: Metalografia matéria-prima com ampliação óptica de 500X

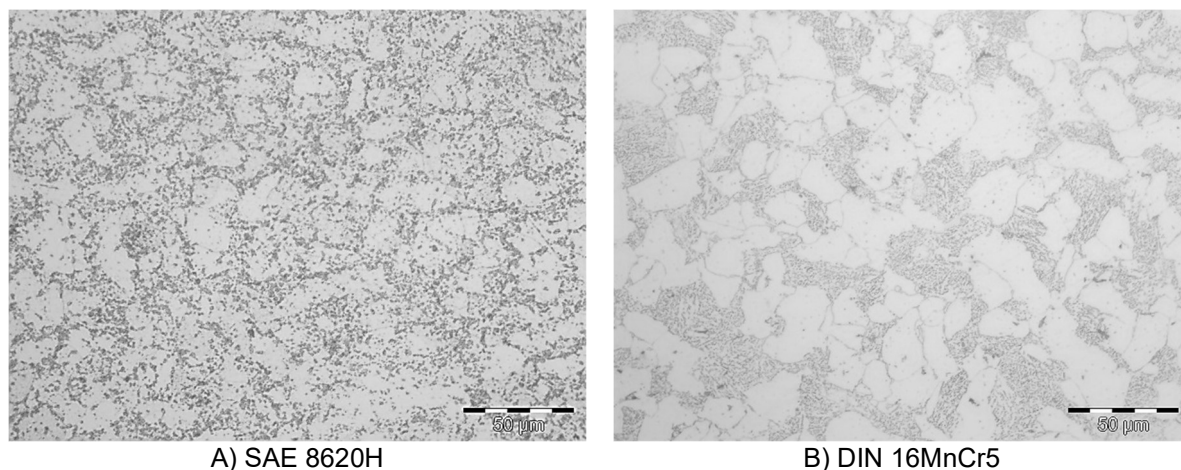
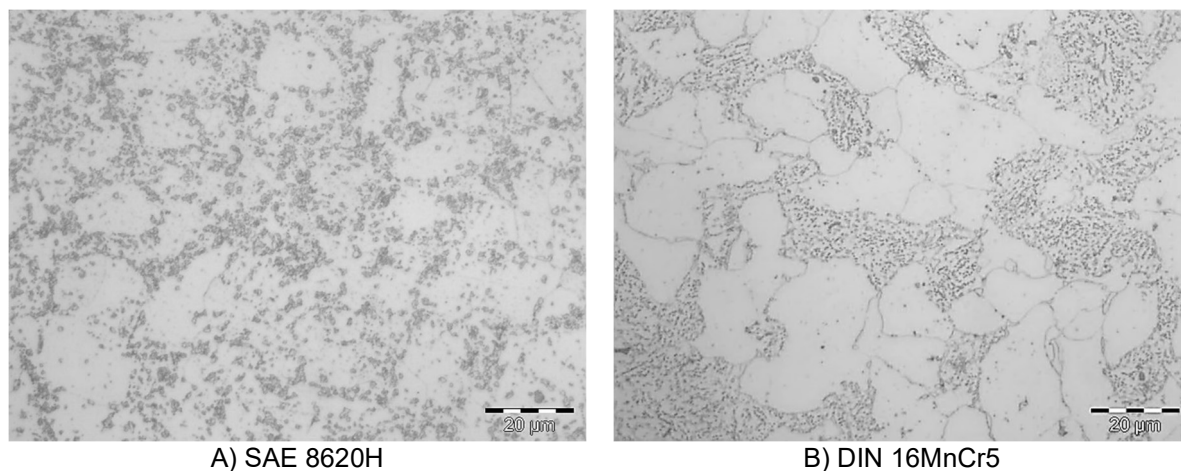


Figura 40: Metalografia matéria-prima com ampliação óptica de 1000X



4.4.2 Metalografia do forjado

A microestrutura do forjado é formada por ferrita (regiões mais claras) e perlita pré-deformada (regiões mais escuras) também observa-se parte da cementita esferoidizada, conforme pode ser verificado na Figura 41 e na Figura 42.

Figura 41: Metalografia forjado com ampliação óptica de 500X

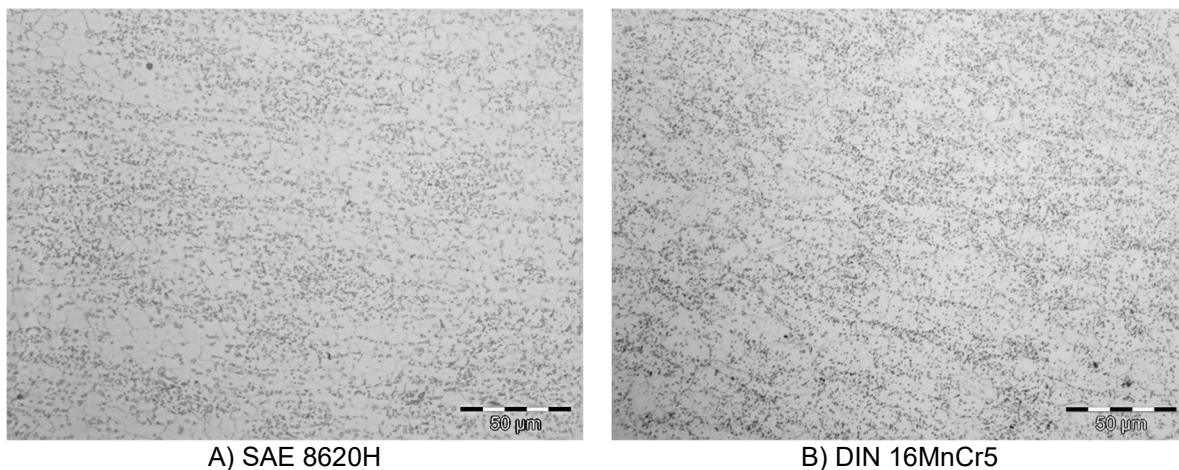
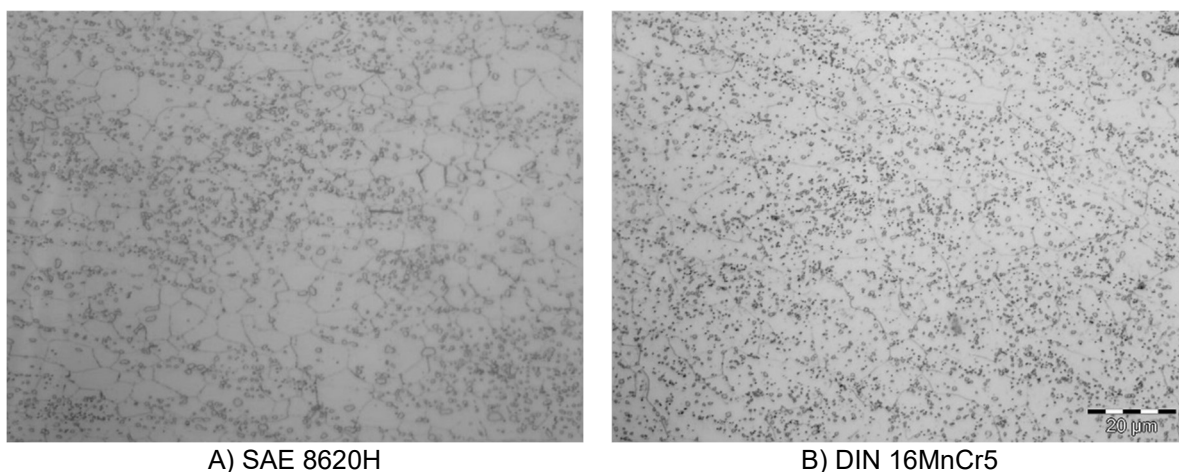


Figura 42: Metalografia forjado com ampliação óptica de 1000X



4.4.3 Metalografia do pré-usinado

A microestrutura do pré-usinado (antes do tratamento térmico) é formada por ferrita (regiões mais claras) e perlita pré-deformada (regiões mais escuras), ou seja, como já era esperado não há alterações na microestrutura do material após usinagem, conforme pode ser verificado na Figura 43 e na Figura 44.

Figura 43: Metalografia pré-usinagem com ampliação óptica de 500X

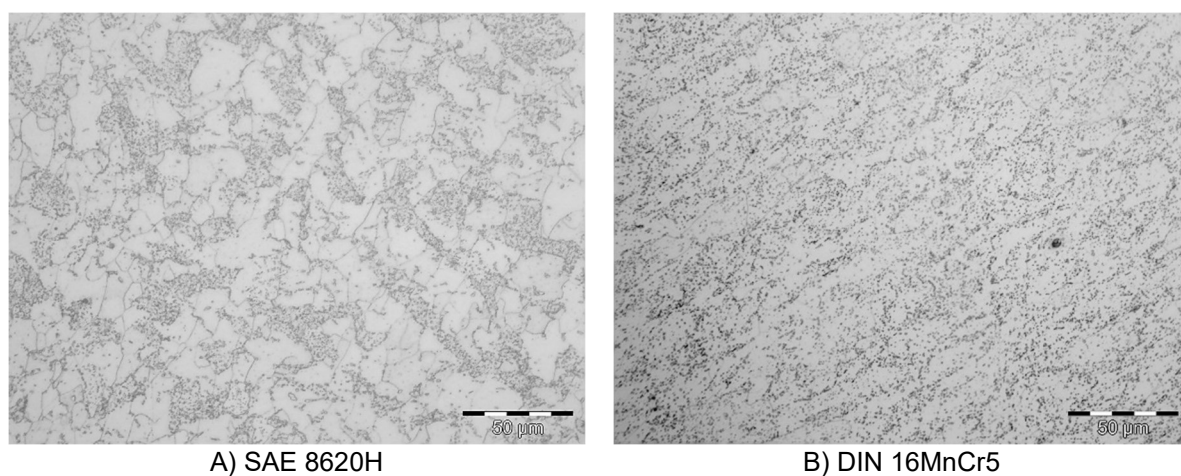
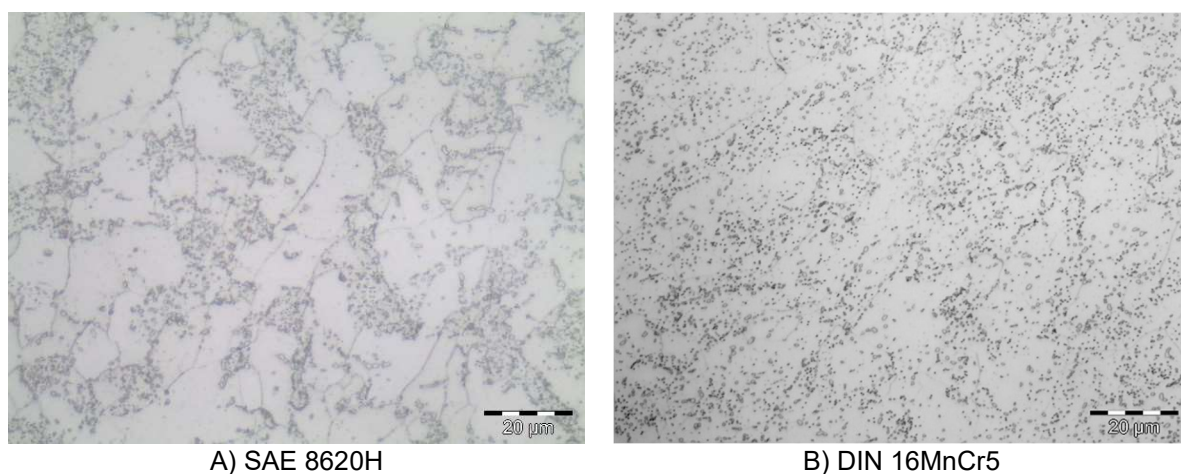


Figura 44: Metalografia pré-usinagem com ampliação óptica de 1000X



4.4.4 Metalografia tratamento-térmico

A microestrutura do tratamento-térmico é formada por martensita revenida, característicos do processo de cementação e tempera no qual o produto foi submetido após a pré usinagem, conforme pode ser verificado na Figura 45 e na Figura 46.

Figura 45: Metalografia ToTo com ampliação óptica de 500X

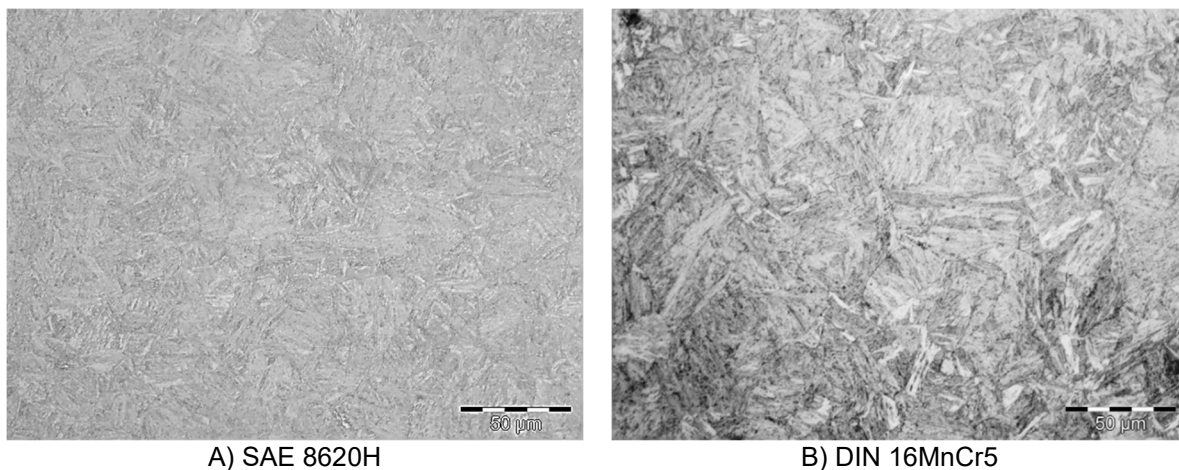
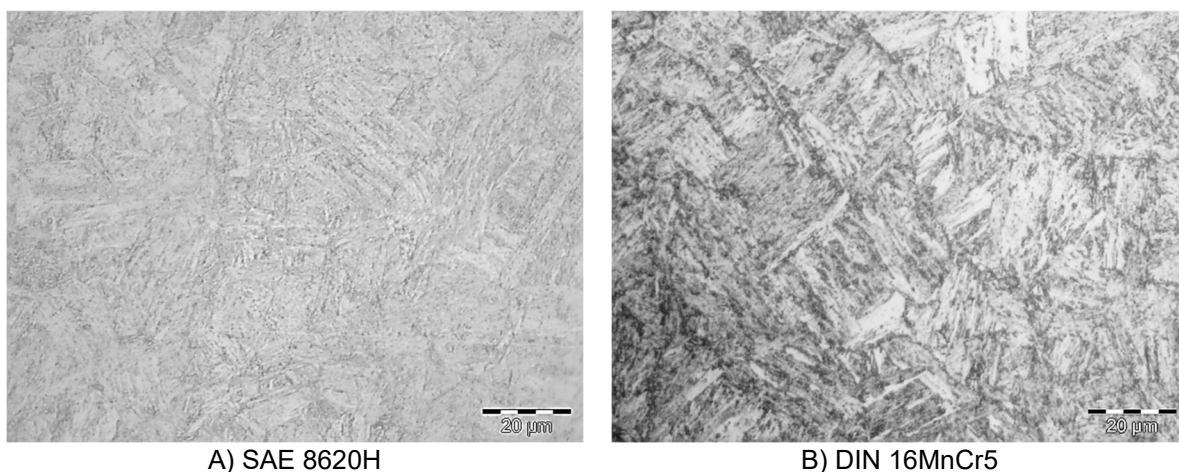


Figura 46: Metalografia ToTo com ampliação óptica de 1000X



4.4.5 Metalografia da usinagem final

A microestrutura da usinagem final (após tratamento térmico é formada por martensita revenida, ou seja, como já era esperado não há alterações na microestrutura do material após usinagem, conforme pode ser verificado na Figura 47 e na Figura 48.

Figura 47: Metalografia usinagem final com ampliação óptica de 500X

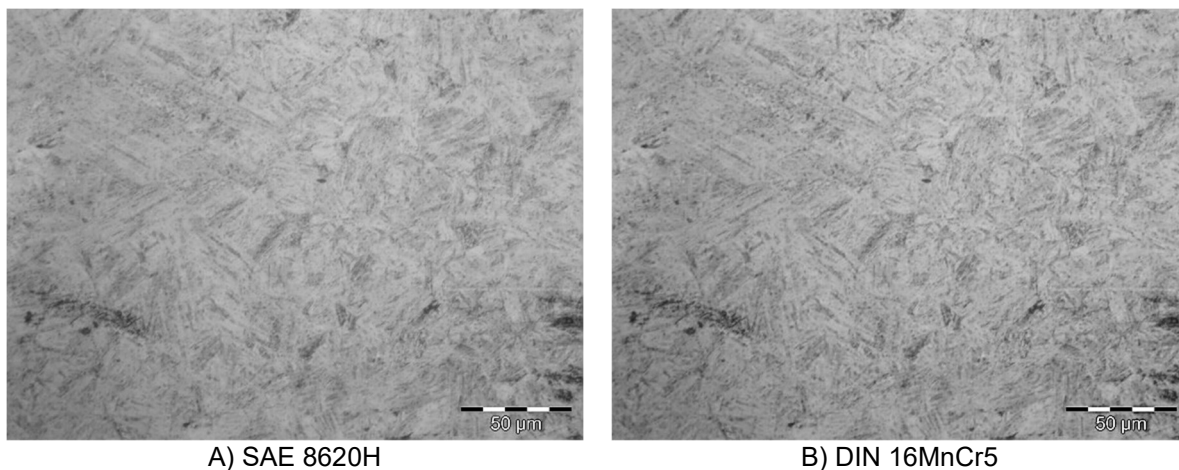
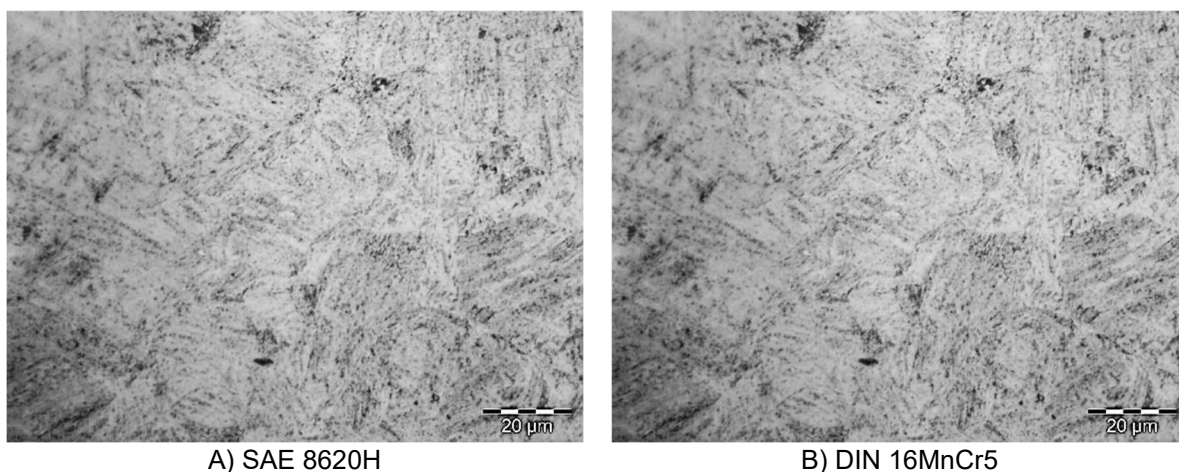


Figura 48: Metalografia usinagem final ampliação óptica de 1000X



4.5 ENSAIO DE DUREZA

A Tabela 13 apresenta os resultados do ensaio de dureza superficial na escala Brinell (HB) obtidos antes do tratamento térmico e a Tabela 14 apresenta os resultados de dureza de núcleo obtidos na escala Rockwell (HRC) avaliados após o tratamento térmico.

Tabela 13: Análise dureza superficial Brinell (HB) – antes do tratamento térmico

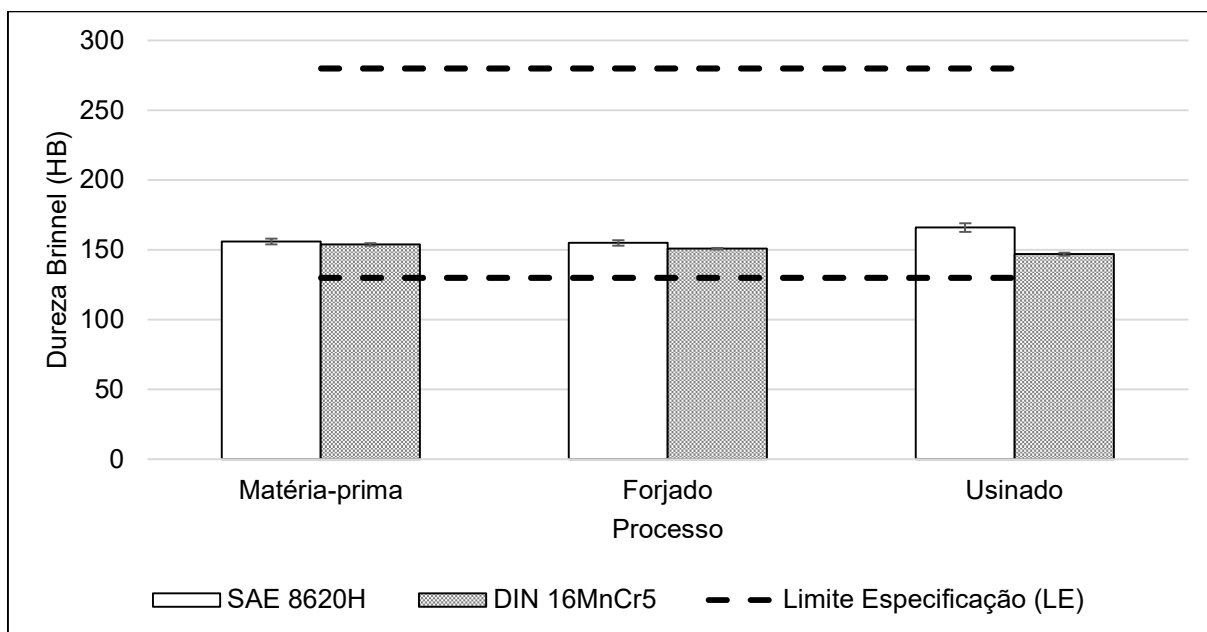
Medição	SAE 8620H			DIN 16MnCr5		
	Matéria Prima	Forjado	Usinado (antes ToTo)	Matéria Prima	Forjado	Usinado (antes ToTo)
1	156	153	169	155	152	146
2	153	155	163	153	151	147
3	157	157	167	154	151	148
Média	156	155	166	154	151	147
DesvPad	2,1	2,0	3,1	1,0	0,6	1,0

Tabela 14: Análise dureza de núcleo Rockwell (HRC) – após tratamento térmico

Medição	SAE 8620H		DIN 16MnCr5	
	ToTo	Usinado (após ToTo)	ToTo	Usinado (após ToTo)
1	56,8	56,6	56,7	56,7
2	56,3	56,1	56,8	56,3
3	56,7	56,8	56,8	56,1
Média	56,6	56,5	56,8	56,4
DesvPad	0,26	0,36	0,06	0,31

A Figura 49 e a Figura 50, apresentam, respectivamente, o comparativo em forma gráfica dos resultados médios e do desvio padrão da dureza superficial antes do ToTo e da dureza de núcleo após o ToTo. Os resultados dos gráficos foram obtidos através do ensaio de dureza e das Tabela 13 e Tabela 14. Observa-se na Figura 49 que antes do tratamento térmico, não há variação significativa na dureza apresentada para ambos os materiais.

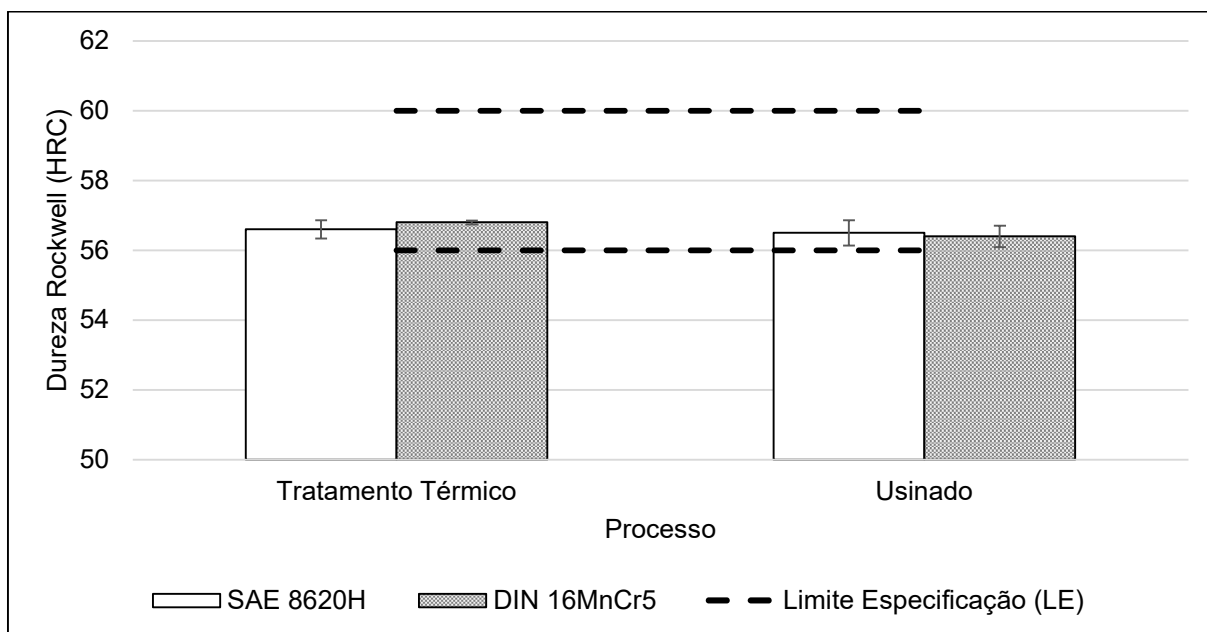
Figura 49: Comparativo gráfico da dureza superficial (HB) – antes ToTo



Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando-se a dureza após o tratamento térmico (Figura 50) também não se observam diferenças significativas entre os dois materiais analisados. E de fato é um comportamento esperado, pois em relação ao tratamento a dureza pode ser um parâmetro de resposta facilmente controlado tendo as informações de curvas de revenimento do material (ASM HANDBOOK 4A, 2013).

Figura 50: Comparativo gráfico da dureza de núcleo (HRC) – após ToTo



Fonte: Elaborado pelo autor

Realizando uma análise comparativa dos resultados de ambos os aços, verificou-se que a matéria-prima e o forjado apresentam dureza equivalente, ou seja, uma variação de 1,3% a 2,6% entre os resultados obtidos, enquanto que na condição usinada antes do ToTo o aço SAE 8620H apresentou uma dureza em torno de 11% superior. Convém salientar que apesar de o aço DIN 16MnCr5 ter apresentado uma dureza inferior na condição usinada antes do ToTo o material atende os limites de especificação (130-280 HBW) da norma DIN EN ISO 6506. Já para a condição após tratamento térmico os resultados das durezas após ToTo e usinagem foram equivalentes, ou seja, uma variação de 0,18% a 0,35% entre os resultados obtidos.

Após análise comparativa dos dados obtidos através do ensaio de dureza e especificações técnicas do produto, podemos afirmar que ambos os materiais apresentam resultados dentro dos limites de especificações dos desenhos e normas. Além disso, mesmo que o estudo realizado por BORSA (2009) tenha sido realizado no material DIN 16MnCr5 forjado a quente além de potenciais diferenças entre os parâmetros de tratamento térmico aplicados neste trabalho e por BORSA (2009), verificaram-se que as durezas superficiais encontradas por BORSA (2009) são similares ao obtido neste trabalho o que é característico de um aço cementado, temperado e revenido.

4.6 ANÁLISE DE CAMADA

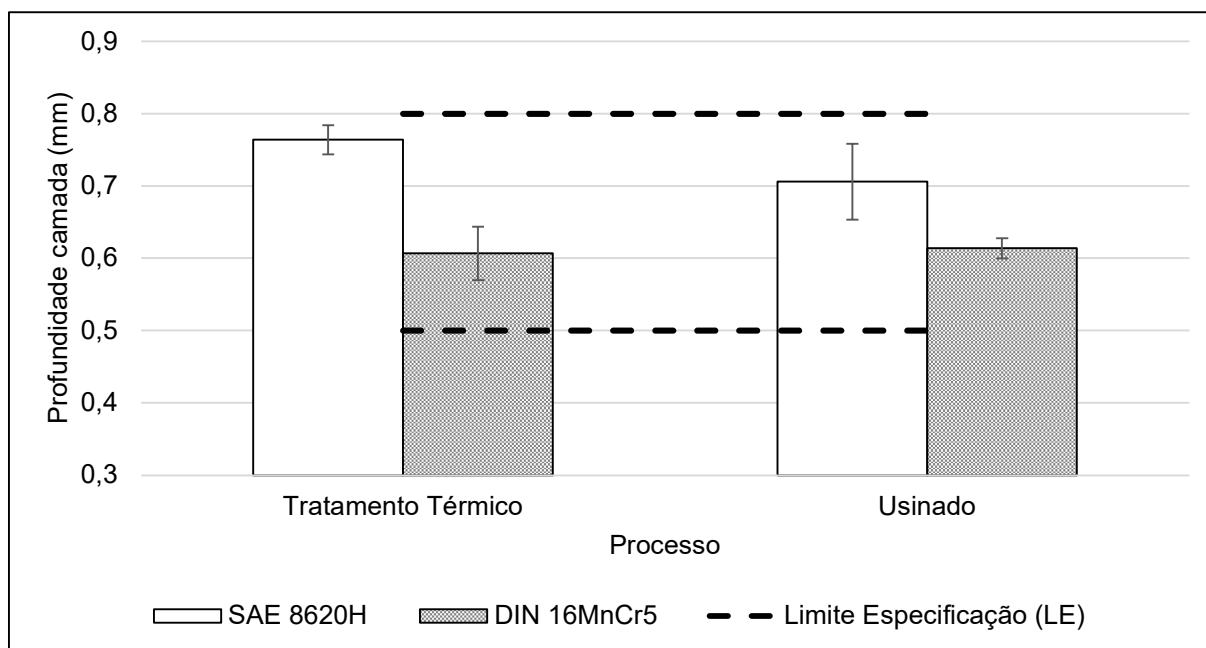
A Tabela 15 apresenta os resultados da profundidade de camada (CHD) em milímetros (mm) após o tratamento térmico e usinado após o tratamento térmico.

Tabela 15: Resultados da análise de camada (profundidade - CHD) - após ToTo

Medição	SAE 8620H		DIN 16MnCr5	
	ToTo	Usinado (após ToTo)	ToTo	Usinado (após ToTo)
1	0,782 mm	0,757 mm	0,640 mm	0,615 mm
2	0,742 mm	0,652 mm	0,614 mm	0,600 mm
3	0,767 mm	0,710 mm	0,567 mm	0,628 mm
Média	0,764 mm	0,706 mm	0,607 mm	0,614 mm
DesvPad	0,02	0,05	0,04	0,01

A Figura 51, apresenta, o comparativo em forma gráfica dos resultados médios e desvio padrão. Os resultados do gráfico foram obtidos através da análise de profundidade de camada e dos dados da Tabela 15.

Figura 51: Comparativo gráfico da profundidade de camada (CHD) – após ToTo



Fonte: Elaborado pelo autor

Os parâmetros de tratamento térmico não foram alterados e ambos os materiais foram processados na mesma carga de tratamento térmico e os resultados apresentados foram satisfatórios. Conforme estudo realizado por RISTOV (2021) tendo como principal objetivo viabilizar o uso do mesmo ciclo de cementação para diferentes aços (SAE 10B22, DIN 16MnCr, GB 20CrMo e SAE 8620), verificou-se que existe a possibilidade de utilizar o mesmo ciclo para os diferentes materiais estudados, exceto em revenimento maiores que 200 °C. Observou-se que com temperatura de revenimento acima de que 200 °C, que não é o caso do objeto de estudo deste, a austenita retida presente na camada cementada tornou-se menos evidente além de reduzir a dureza da camada cementada.

Comparando os resultados obtidos, verificou-se uma diferença na profundidade de camada dos aços avaliados. O aço SAE 8620H apresenta uma profundidade de camada em torno de 21% maior após ToTo e 13% maior após usinagem final. Após análise comparativa dos dados obtidos através da análise de camada e especificações técnicas do produto, podemos afirmar que ambos os materiais

apresentam resultados dentro dos limites de especificações dos desenhos e normas, mesmo que havendo uma diferença entre 13% e 21% na profundidade de camada entre os materiais. Cabe salientar também que os resultados do material DIN 16MnCr5 está em uma faixa de maior segurança em relação a especificação do produto.

4.7 AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA

A Tabela 16 e Tabela 17 apresentam, respectivamente, os resultados da avaliação geométrica do forjado para os aços SAE 8620H e DIN 16MnCr5. A avaliação geométrica é importante parâmetro de qualidade no processo de fabricação, pois vai impactar fortemente nos custos finais da peça produzida. Por exemplo, em um estudo de troca de materiais como matéria-prima de um componente a avaliação geométrica do produto fabricado é de suma importância, pois não seria válida a troca para um material de menor custo se este não atingir as propriedades geométrica especificadas em projeto. Ou ainda, se esta matéria-prima de menor custo apresenta distorções ou empenamentos maiores durante o processo de fabricação levando a custos maiores de usinagem. Desta forma, deseja-se um desempenho em termos dimensionais de ambos os materiais analisados.

Tabela 16: Resultado da avaliação geométrica do material SAE 8620H

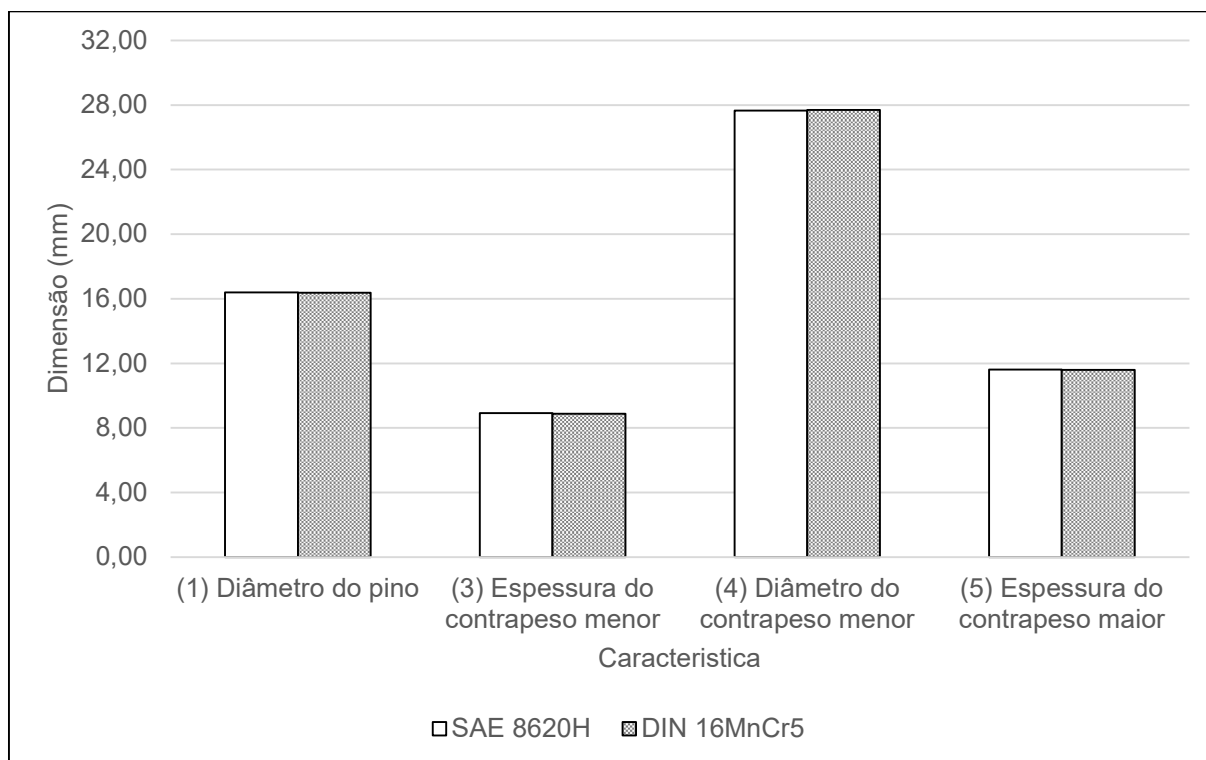
Amostra	Características				
	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)
1	16,393	0,067	8,991	27,691	11,612
2	16,384	0,063	8,903	27,640	11,621
3	16,393	0,033	8,917	27,615	11,627
4	16,398	0,112	8,900	27,678	11,604
5	16,382	0,054	8,928	27,647	11,647
6	16,398	0,148	8,941	27,634	11,665
7	16,392	0,068	8,921	27,689	11,646
8	16,385	0,090	8,955	27,668	11,663
9	16,397	0,093	8,900	27,648	11,616
10	16,397	0,198	8,909	27,663	11,606
Média	16,393	0,079	8,919	27,656	11,624
DesvPad	0,006	0,049	0,029	0,025	0,023

Tabela 17: Resultado da avaliação geométrica do material DIN 16MnCr5

Amostra	Características				
	1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)	4 (mm)	5 (mm)
1	16,373	0,117	8,871	27,731	11,593
2	16,381	0,102	8,929	27,693	11,605
3	16,370	0,059	8,869	27,697	11,593
4	16,378	0,116	8,871	27,695	11,592
5	16,371	0,069	8,869	27,681	11,590
6	16,374	0,098	8,886	27,674	11,606
7	16,386	0,167	8,967	27,698	11,587
8	16,381	0,091	8,862	27,700	11,591
9	16,381	0,107	8,883	27,671	11,605
10	16,378	0,116	8,871	27,695	11,592
Média	16,378	0,105	8,871	27,695	11,593
DesvPad	0,005	0,030	0,034	0,017	0,007

Comparando os resultados obtidos através da análise geométrica, verificou-se que ambos os materiais apresentam resultados similares. Com isso podemos afirmar que a ferramenta utilizada para forjamento do material SAE 8620H pode também ser utilizada para o material DIN 16MnCr5, pois mesmo com a utilização de um material alternativo as dimensões se mantiveram praticamente as mesmas quando se comparam ambos os materiais, e além disto o material proposto DIN 16MnCr5 não interferiu na usinabilidade do produto, uma vez que os desvios padrões encontrados foram muito baixos quando comparados aos limites das especificações. Assim, a Figura 52 representa o comparativo em forma gráfica dos resultados geométricos. Os dados do gráfico foram obtidos através da análise geométrica e da Tabela 16 e da Tabela 17. Considerado no gráfico a média dos valores obtidos. As características geométricas avaliadas abaixo estão representadas por um número e as definições podem ser verificadas na Figura 16 do tópico 3.7. O desvio padrão foi desprezado no gráfico devido não ter havido divergências significativas entre as avaliações conforme pode ser verificado na Tabela 16 e Tabela 17.

Figura 52: Comparativo gráfico dos resultados geométricos



Fonte: Elaborado pelo autor

4.8 CUSTOS

A competitividade do mercado exige cada vez mais produtos com melhor qualidade e menor custo, tarefa está designada e atribuídas aos responsáveis por desenvolvimentos de novos produtos ou até mesmo ao *Supply Chain* que muitas vezes em parceria com a cadeia de suprimento necessitam buscar fontes alternativa de matéria-prima ou fornecedores com o objetivo de reduzir custos e/ou até mesmo obter uma melhor robustez do produto. Na maioria dos casos a substituição para uma fonte alternativa requer o atendimento mínimo das características e propriedade do produto atual que as vezes se sobressaem em relação as especificações técnicas da engenharia. Buscando a viabilização de produtos, opções econômicas devem ser adotadas, ou seja, escolha da matéria-prima adequada, confecção do ferramental, definição dos parâmetros de processos ideais e meios de controles adequado, sendo que também deve ser levado em conta o aumento da produtividade, sem que este afete a qualidade do produto. Baseando-se nos fatores listados anteriormente, realizou-se um comparativo preliminar de custos entre os materiais SAE 8620H e DIN 16MnCr5 onde levou-se em consideração em um primeiro momento somente a

substituição da matéria-prima, até por que acredita-se que a utilização do material DIN 16MnCr5 não acarretará impacto significativo em outros fatores que possam vir a inviabilizar a substituição. Por fim, a homologação do material proposto DIN 16MnCr5 representa uma economia de 10% se comparado com o material SAE 8620H, além de minimizar o risco de desabastecimento por se obter uma segunda fonte de fornecimento de matéria-prima aprovada.

4.9 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Baseado nos resultados obtidos através dos ensaios realizados, foi possível observar que os aços avaliados SAE 8620H e DIN 16MnCr5 possuem equivalências mesmo que haja pequenas diferenças em suas propriedades. A seguir estão destacados os principais fatores que se leva a afirmar que os materiais apresentam certa equivalência:

- i. Composição química: o aço DIN 16MnCr5 tem um menor teor de molibdênio e níquel que pode ser prejudicial ao endurecimento, mas por outro lado tem um maior teor de cromo e manganês que podem compensar e melhorar esta propriedade. Os resultados do ensaio de dureza demonstram resultados equivalentes para ambos os materiais, ou seja, a diferença entre os elementos não impacta na dureza do produto, vindo a confirmar que o maior teor de cromo e manganês está compensando para obter o endurecimento especificado.
- ii. Ensaio de tração: o material DIN 16MnCr5 apresentou resultados superiores em todos os aspectos mecânicos, exceto para a resistência a tração onde apresentou um resultado 3,6% inferior, apesar disso, podemos afirmar que a resistência à tração é equivalente. Em contrapartida, o aço DIN 16MnCr5 apresentou o limite de escoamento 19% superior, ou seja, potencialmente é a resultante do aço ter apresentado um teor de Cromo maior. Além disso, o limite de escoamento maior é benéfico para aplicação do produto pois representa o limite superior das forças que podem ser aplicadas sem que haja deformação permanente no componente.

- iii. Deformabilidade: ambos os materiais apresentaram deformabilidade homogênea com cargas acima de 980 KN, não havendo assim a necessidade de alterar a capacidade da prensa atual.
- iv. Forjabilidade: sem presença de defeitos superficiais para ambos os materiais com cargas entre 25T e 230T, além disso, mesmo submetendo o aço DIN 16MnCr5 a uma carga de 300T, o mesmo não apresentou defeitos superficiais.
- v. Análise metalográfica: os resultados para ambos os aços foram equivalentes e apresentaram microestrutura coerentes para cada etapa do processo, ou seja, matéria-prima apresentou ferrita e cementita esferoidizada, forjado/pré-usinado apresentou ferrita e perlita pré-deformada e tratamento-térmico/usinagem final após tratamento apresentou martensita que é característico de um material cementado, temperado e revenido.
- vi. Ensaio de dureza: os resultados para ambos os aços foram equivalentes, exceto para o usinado antes do tratamento térmico onde o aço DIN 16MnCr5 apresentou uma dureza 11% inferior, mas convém salientar que apesar da dureza inferior o material atende os limites de especificação da norma.
- vii. Análise de camada: o material SAE 8620H apresenta uma profundidade de camada maior após o ToTo. Apesar disso, os resultados encontram-se dentro dos limites de especificações, além de o material DIN 16MnCr5 estar em uma faixa de maior segurança em relação a especificação do produto.
- viii. Avaliação geométrica: ambos os materiais apresentam resultados equivalentes. Com isso a ferramenta utilizada para o material SAE 8620H também pode ser utilizada para o material DIN 16MnCr5, ou seja, não há necessidade de aquisição e confecção de uma nova matriz (ferramenta).

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos através dos ensaios realizados, foi possível concluir que os aços avaliados SAE 8620H e DIN 16MnCr5, possuem equivalências apesar de haver algumas pequenas diferenças em suas propriedades. A conclusão deste está baseado nos resultados apresentados através dos ensaios realizados para a caracterização e comparação das propriedades dos materiais.

Os resultados obtidos demonstram que o material DIN 16MnCr5 possui um melhor desempenho no ensaio de tração, mais especificamente no limite de escoamento, o que é benéfico para aplicação do produto pois representa o limite superior das forças que podem ser aplicadas sem que haja deformação permanente no componente, além de apresentar os resultados de profundidade de camada em uma faixa de maior segurança com relação a especificação do produto. Assim, conclui-se que essas diferenças em propriedades possivelmente teriam um impacto positivo em relação a utilização do material DIN 16MnCr5 em virabrequim.

A homologação e uso do material DIN 16MnCr5 minimizaria significativamente os riscos de desabastecimentos pois teríamos uma segunda fonte de matéria-prima homologada.

Por fim, recomenda-se a realização dos testes dinâmicos e/ou funcionais em máquina para o material proposto DIN 16MnCr5, de modo a confirmar o desempenho adequado desse material em substituição ao SAE 8620H.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir algumas sugestões de trabalhos:

- i. Testes de fadiga para ambos materiais com objetivo de avaliar a influência das diferenças químicas (composição química) e mecânicas (resistência a tração) encontradas.
- ii. Testes comparativo de durabilidade dos virabrequins no Laboratório de Testes da Engenharia para ambos os materiais com o objetivo de avaliar se o material DIN 16MnCr5 atende as normas e especificações internas de teste da empresa fabricante da motosserra.
- iii. Teste em campo (usuário final) e em operação para ambos materiais com o objetivo de avaliar o comportamento da máquina em condições de uso reais.

REFERÊNCIAS

- ALTAN, T., & NGAILE, G. (2005). Cold and Hot Forging. In *Cold and Hot Forging* (1st ed.). <https://doi.org/10.31399/asm.tb.chffa.9781627083003>
- ASM HANDBOOK 4A. (2013). *ASM HANDBOOK 4A, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals and Processes* (Jon Dossett and George E. Totten (ed.)). ASM International.
- BICHINHO, R. D. S., CÉZAR, J. L., VERNEY, J. C. K. DE, SANTOS, L. H. DOS, & SCHAEFFER, L. (2016). *Estudo do processo de forjamento a frio para um componente pistão de freio.* [https://www.cbcm-metalfforming.com/publicacoes/2016/Estudo do processo de forjamento pistao de freio..pdf](https://www.cbcm-metalfforming.com/publicacoes/2016/Estudo%20do%20processo%20de%20forjamento%20pistao%20de%20freio..pdf)
- BILLIGMANN, J., & FELDMANN, H. D. (1979). *Estampado y Prensado a Máquina* (Reverté (ed.); 2nd ed.).
- BIOPDI - <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-compressao>. (2024). *Ensaio de Compressão: Definição, Importância e Aplicações.* <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-compressao/>
- BORSA, M. B. N. de O. (2009). *Avaliação do crescimento anormal de grão em um aço DIN 16MnCr5 forjado a morno* [Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/18989>
- BRAGA, L. F. (2005). *Simulação Computacional por Elementos Finitos do Processo de Forjamento em Matriz Fechada de Rodas SAE 4140 de Utilização em Ponte Rolante* [Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais]. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://bib.pucminas.br/teses/Eng Mecanica_BragaLF_1.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://bib.pucminas.br/teses/Eng_Mecanica_BragaLF_1.pdf)
- BRESCIANI, F. E., ZAVAGLIA, C. A. C., BUTTON, S. T., GOMES, E., & NERY, F. A. D. C. (1991). *Conformacao plastica dos metais* (4th ed.). Unicamp.
- CAMPBELL, F. C. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International.
- CETLIN, R. P., & HELMAN, H. (2005). *Fundamentos da Conformação* (Artliber (ed.); 2nd ed.).
- CRUZ, M. P. N. (2014). *Efeito da composição química, da atmosfera cementante e dos ciclos termoquímicos na microestrutura e dureza de aços baixo carbono cementados e temperados* [Universidade Federal de Santa Catarina]. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/129411>
- DIETER, G. E., Kuhn, H. a., & Semiatin, S. L. (2003). Handbook of Workability and Process Design. In ASM International (Ed.), *Handbook of Workability and Process Design*.

- DREHMER, A. (2013). *Determinação da espessura de camadas duras em aços por técnicas magnéticas* [Universidade de Caxias do Sul]. <https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/811>
- FLAUSINO, P. C. A. (2010). *Desgaste de uma matriz de forjamento a quente considerando o amaciamento devido ao revenimento* [Universidade Federal de Minas Gerais]. <http://hdl.handle.net/1843/BUDB-8DHKZR>
- GRAIN, F., Boosts, F., Life, F., Alloys, I., Quality, B., Size, F., Shape, P., Expands, C., Design, M., Improvement, C., Forgings, H., Optimum, D., & Forgings, C. (2007). FORGING SOLUTIONS Design Engineering Information From FIA. *Forging Industry Association*. www.forging.org
- KALPAKJIAN, S., SCHMID, S., & SEKAR, V. (2021). Manufacturing engineering and technology in SI units. In *Pearson Education Centre*. [/content/one-dot-com/one-dot-com/se/en/Nordics-Higher-Education/subject-catalogue/engineering/ManufacturingEngineering-and-Technology-7th-SI-Edition.html](https://www.pearson.com/content/one-dot-com/one-dot-com/se/en/Nordics-Higher-Education/subject-catalogue/engineering/ManufacturingEngineering-and-Technology-7th-SI-Edition.html)
- KILIÇASLAN, C. (2017). Predicting Material Fracture In Cold Forging. *The International Journal of Forging Business & Technology*.
- LIBARDI, R. (2010). Ensaio De Tração De Um Aço Sae 8620 Conforme ASTM E8 / E8M - Uma Comparação Interlaboratorial. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção, UNIMEP*. https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_113_739_15484.pdf
- LIMA, T. R. S. de. (2011). *Desenvolvimento de metodologia para determinação de curvas de resistência à fratura de materiais elasto-plásticos pela análise do campo deformacional à frente da ponta da trinca* [Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/36011>
- MYAGKOV, L. L., MAHKAMOV, K., CHAINOV, N. D., & MAKHKAMOVA, I. (2014). *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance*. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/crankshaft>
- OBBERG, E., Jones, F. D., Horton, H. L., & Ryffel, H. H. (2012). Machinery's handbook: a reference book for the mechanical engineer, designer, manufacturing engineer, draftsman, toolmaker, and machinist. In *Machinery's handbook*. Includes index.
- OKAMOTO, T., T. Fukuda, and H. H. (1973). *Material fracture in cold forging Systematic classification of working methods and types of cracking in cold forging*.
- RISTOV, B. H. (2021). *Avaliação da influência de elementos de liga sobre a profundidade e dureza de camadas cementadas em aços de construção mecânica baixa liga*. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/223255>
- ROSIK, A. (2020). *Estudo da deformabilidade a frio do aço microligado ao vanádio DIN 30MnVS6* [Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. <http://hdl.handle.net/10183/223779>

- SCHAEFFER, L. (2001). *Forjamento - Introdução ao processo* (Imprensa Livre (ed.); 1st ed.).
- SCHULER Metal Forming Handbook. (1998). *Metal Forming Handbook - Softcover reprint of the original* (S. GmbH (ed.); 1st ed.).
- SILVEIRA, A. C. de F. (2019). *Estudo para Aplicação do Aço Bainítico de Resfriamento Contínuo DIN 18MnCrSiMo6-4 em Forjamento a Quente* [Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/212384>
- STOJANOVIC, B., & GLISOVIC, J. (2016). Automotive Engine Materials. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.01946-9>
- VERLINDEN, B., Driver, J., & Samajdar, I Doherty, R. D. (2007). *Thermo-mechanical Processing of Metallic Materials*. Pergamon/Elsevier. <https://books.google.com.br/books?id=lj1zIAEACAAJ>
- VIEIRA, D. M. M. (2013). *Estudo comparativo das propriedades mecânicas através de ensaio de tração em corpos de prova normalizados e em componentes*. <https://doi.org/10.5151/2594-4711-23238>
- VRIES, M. A. J. de. (1993). *Defects and defect avoidance in cold forging* [Eindhoven University of Technology]. <https://research.tue.nl/files/46851023/496248-1.pdf>
- YAMAGATA, H. (2005). The science and technology of materials in automotive engines. *The Science and Technology of Materials in Automotive Engines*. <https://doi.org/10.1533/9781845690854>