

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA PARA USO EM VIRABREQUIM EM UM
MOTOR ALTERNATIVO DE COMBUSTÃO INTERNA

por

Henrique Nunes Caitano

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Abril de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Caitano, Henrique Nunes
Análise de aços de alta resistência para uso em
virabrequim em um motor alternativo de combustão
interna / Henrique Nunes Caitano. -- 2023.
15 f.
Orientadora: Cintia C. Petry Mazzaferro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Aços de alta resistência. 2. Virabrequim. 3.
Motor Alternativo. 4. Tratamento Térmico. I.
Mazzaferro, Cintia C. Petry, orient. II. Título.

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

Henrique Nunes Caitano

ANÁLISE DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA PARA USO EM VIRABREQUIM EM UM
MOTOR ALTERNATIVO DE COMBUSTÃO INTERNA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte/Processos de Fabricação/Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof^ª. Dr^ª Cintia C. Petry Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof^ª. Dr^ª Cintia C. Petry Mazzaferro (Presidente)

Prof. Dr André João de Souza

Prof. Dr Arnaldo Ruben Gonzalez

Porto Alegre, Abril de 2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me apoiaram e incentivaram durante esta jornada acadêmica. Primeiramente, agradeço a minha família, que sempre esteve ao meu lado, me dando amor, suporte e encorajamento em cada etapa da minha vida. Aos meus amigos, por me fazerem sorrir nos momentos difíceis e por me ajudarem a manter o equilíbrio entre estudos e lazer. Aos meus professores e orientadores, pelos ensinamentos valiosos e pelo incentivo à pesquisa e à busca pelo conhecimento. E, por fim, agradeço a mim mesmo, por ter tido a coragem de enfrentar os desafios e superar as dificuldades que surgiram pelo caminho. Este trabalho é resultado de muito esforço, dedicação e amor, e é dedicado a todos aqueles que contribuíram para a minha formação como pessoa e como acadêmico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao professor Paulo Carollo que fez todo este sonho ser possível.

À equipe do Laboratório de Materiais, que auxiliaram na realização dos testes.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) por ter me dado acesso a uma educação gratuita e de qualidade.

À minha família por ter me apoiado tanto emocionalmente quanto financeiramente nos anos em que realizei a graduação.

Caitano, Henrique. **Análise de aços de alta resistência para uso em virabrequim em um motor alternativo de combustão interna**. 2023. 14. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

O virabrequim é um componente importante em motores de combustão interna, transformando o movimento linear dos pistões em movimento rotativo. A qualidade e a durabilidade do virabrequim são cruciais para o desempenho e confiabilidade do motor, e a escolha da matéria-prima pode afetar diretamente esses fatores. Um estudo foi realizado com o objetivo de comparar as propriedades de dois aços utilizados na produção de virabrequins produzidos por uma empresa do ramo metalomecânico usando as mesmas etapas de produção e assim verificar a possibilidade de substituição do atual aço usado por outro de menor custo. A liga atualmente utilizada, SAE 8620, foi comparada com uma liga alternativa, DIN 16MnCr5, em três condições de teste: forjada a frio, temperada e revenida e cementada. Testes de tração e dureza foram realizados, juntamente com análises metalográficas para obter as propriedades mecânicas e metalúrgicas. Os resultados mostraram que o material DIN 16MnCr5 apresentou resultados semelhantes ou superiores em relação ao SAE 8620 e possui custo menor em cerca de 11%. Concluiu-se que o material DIN 16MnCr5 é uma excelente alternativa, mas é necessário realizar testes dinâmicos e funcionais para avaliar a vida em fadiga do material e do componente produzido, bem como avaliar a viabilidade de produção com esta substituição.

PALAVRAS-CHAVE: Virabrequim, Tratamento térmico, Durezas, Ensaio de Tração

Caitano, Henrique. **Analysis of high strength steels for use in crankshaft in an alternative internal combustion engine**. 2023. 14. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

The crankshaft is an important component in internal combustion engines, transforming the linear motion of the pistons into rotary motion. The quality and durability of the crankshaft are crucial for the performance and reliability of the engine, and the choice of raw material can directly affect these factors. A study was conducted with the objective of comparing the properties of two steels used in the production of crankshafts manufactured by a metalworking company using the same production steps, and thus verifying the possibility of substituting the current steel used for a cheaper one. The currently used alloy, SAE 8620, was compared with an alternative alloy, DIN 16MnCr5, in three test conditions: cold forged, tempered and quenched, and carburized. Tensile and hardness tests were performed, along with metallographic analysis to obtain mechanical and metallurgical properties. The results showed that DIN 16MnCr5 material had similar or superior results compared to SAE 8620 and is about 11% more economical. It was concluded that DIN 16MnCr5 material is an excellent alternative, but dynamic and functional tests are necessary to evaluate the fatigue life of the material and the component produced, as well as to evaluate the production viability with this substitution.

KEYWORDS: Crankshaft, Heat treatment, Hardness, Tensile Test

NOMENCLATURA

Símbolos

N

Newton

kg

Quilograma

MPa

Mega Pascal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Revisão Bibliográfica	1
1.3 Objetivos	3
2. MATERIAIS E MÉTODOS	3
2.1 Metodologia de planejamento	3
2.2 Análise dos materiais	3
2.3 Condições de teste	3
2.4 Confeção dos corpos-de-prova	4
2.5 Realização das análises	5
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	6
3.1 Composição Química	6
3.2 Microestruturas e tamanhos de grãos	7
3.3 Durezas	10
3.4 Profundidade de camada cementada	11
3.5 Ensaio de tração	12
REFERÊNCIAS	15

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O virabrequim é um dos componentes fundamentais em motores de combustão interna, pois é responsável por transformar o movimento linear dos pistões em movimento rotativo, que é transmitido para o eixo de transmissão do veículo. Sendo assim, a qualidade e a durabilidade do virabrequim são fatores cruciais para o desempenho e a confiabilidade do motor (MINUCCI, 2010).

A escolha da matéria-prima utilizada nos virabrequins, assim como o seu processo de fabricação, pode afetar diretamente a resistência e a durabilidade desse componente. Portanto, é essencial realizar uma análise criteriosa das propriedades mecânicas e metalúrgicas do material antes e após o processo de fabricação (MINUCCI, 2010).

1.2 Revisão Bibliográfica

Um motor térmico é uma máquina térmica capaz de transformar calor em trabalho. O calor pode ser obtido de diferentes fontes, sendo elas: combustão, energia elétrica, energia atômica, entre outras. A classificação dos motores pode ser feita quanto a forma de se obter trabalho mecânico, quanto ao comportamento do fluido ativo, quanto a ignição, entre outras (BRUNETTI, 2018).

Os motores alternativos de combustão interna são motores onde a massa dos gases produto da combustão fazem parte do fluido ativo e o trabalho é obtido pelo movimento de um pistão e convertido em rotação contínua por um sistema de biela-manivela. O motor alternativo é composto por diversos componentes, entre eles: pistão (êmbolo), biela, válvula, volante, virabrequim, entre outros (BRUNETTI, 2018).

O virabrequim é o componente do motor que, junto da biela, transforma o movimento de translação do pistão em movimento de rotação. Esse componente é considerado crítico para a efetividade e bom funcionamento do motor, tendo ele uma geometria complexa (MONTAZERSADGH, 2007). O virabrequim é um componente do motor que sofre carregamentos cíclicos durante toda sua vida útil, o componente está submetido a tensões multiaxiais, uma vez que está sujeito a carregamentos complexos (MINUCCI, 2010).

Tendo em vista que o componente ainda está exposto a vibrações e em contato direto com diversas partes quentes do motor, é extremamente necessário que o mesmo possua alta resistência ao desgaste e considerável resistência mecânica. Logo, é comum seja feito de aço forjado ou fundido (MONTAZERSADGH, 2007).

Aço é um dos materiais mais usados na indústria siderúrgica, mecânica e na construção civil. Sua popularidade é resultado do seu baixo custo de produção, da fácil aplicabilidade e da disponibilidade de matéria-prima em relação aos outros materiais (KRAUSS, 2005).

Aço é a liga ferro-carbono, contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação. Quando são adicionados outros elementos químicos além dos considerados normais estes passam a ser conhecidos como aço ligados. Esta adição de elementos químicos visa a obtenção de certas características especiais, ou seja, a melhoria de alguma propriedade do aço, como: aumento da resistência, da temperabilidade, da usinabilidade, da resistência à corrosão, da resistência ao desgaste, melhorar a soldabilidade, entre outros (CHIAVERINI, 1990).

Com o intuito de padronizar os aços ligados, os mesmos são geralmente classificados segundo alguma norma. A comumente utilizada em todo mundo para aços é a classificação

normativa SAE (Society of Automotive Engineers - EUA). A classificação SAE é baseada na composição química do aço. A cada composição normalizada pela SAE corresponde uma numeração específica.

Além da mudança da composição química afetar diretamente as propriedades do aço, o tratamento térmico do mesmo também possui extrema importância na alteração das propriedades físicas e mecânicas.

O tratamento térmico consiste no conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades e conferir-lhes determinadas características. Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes: remoção de tensões, aumento ou diminuição da dureza, aumento ou diminuição da resistência mecânica, melhora da ductilidade, melhora da resistência ao desgaste (CHIAVERINI, 1990).

O tratamento térmico de têmpera consiste no resfriamento rápido do aço quando o mesmo se encontra aquecido a uma temperatura acima da de austenitização. O objetivo final do tratamento térmico é da transformação da austenita para martensita, e o resfriamento rápido é para que não ocorra a difusão dos átomos de forma a haver a decomposição da austenita para as fases ferrita e perlita (CHIAVERINI, 1990).

Em comparação com as outras fases, a martensita é a que confere maior resistência mecânica ao aço. É amplamente usada para aumentar a dureza, a resistência ao impacto e o desgaste (KRAUSS, 2005). Contudo, temos como consequência uma redução na sua ductilidade, tenacidade e o aparecimento de tensões internas (CHIAVERINI, 1990).

Após realizar um tratamento térmico de têmpera em uma peça é necessário realizar o tratamento térmico chamado de revenimento ou revenido (COLPAERT, 2008). Este procedimento é necessário devido à extrema fragilidade da martensita (SILVA, 2008), microestrutura formada na têmpera. O revenimento visa eliminar a maioria dos inconvenientes desta microestrutura, além de aliviar ou remover as tensões internas, corrigir a dureza e a fragilidade do material, aumentando sua ductilidade e resistência ao choque (CHIAVERINI, 1990).

O revenimento consiste em aquecer o material a temperaturas abaixo da temperatura de austenitização, por um tempo suficiente para homogeneizar a temperatura por toda peça, a fim de obter as propriedades desejadas (SILVA 2008).

O tratamento de cementação consiste na introdução de carbono na superfície do aço, de modo que este, depois de convenientemente temperado, apresente uma superfície mais dura que o núcleo. Para isso é necessário que o aço entre em contato com uma substância capaz de fornecer carbono, e seja aquecido a uma temperatura superior à da zona crítica (850° a 950°C).. Existem três métodos de cementação: por via sólida, por via gasosa e por via líquida (CHIAVERINI,1990). No presente trabalho, foi empregada a cementação a gás, então será falado apenas sobre ela.

A cementação a gás é o tipo de cementação mais utilizado industrialmente pela sua maior precisão e controle em comparação aos outros métodos de cementação. O processo consiste em expor o componente em um forno com temperatura e atmosfera controlada para formar a camada cementada. É fundamental que a mistura de gases apresente potencial de carbono tal que tenha a capacidade de introduzir carbono na peça devido às reações químicas (MARQUES, 2021).

O processo de cementação a gás possui os benefícios de ser mais estável, mais limpo e possuir um melhor controle do teor de carbono e da espessura da camada cementada (CHIAVERINI,1990) em relação aos outros métodos de cementação. Após o processo de cementação os aços devem passar pelo processo de têmpera e revenimento.

1.3 Objetivos

O presente estudo tem como finalidade realizar uma análise criteriosa da viabilidade de substituição do aço atualmente utilizado no processo de fabricação de determinados modelos de virabrequins em uma empresa do ramo metalomecânico no Vale dos Sinos que produz ferramentas motorizadas, por uma liga de aço que apresente propriedades análogas, entretanto, com maior disponibilidade no mercado brasileiro. Tal medida objetiva não só promover a redução dos custos de produção, mas também aprimorar a competitividade da empresa em um mercado cada vez mais exigente.

O método de análise do trabalho baseou-se na realização de testes de tração, dureza e análise das microestruturas de ambas as ligas, atual e alternativa, com o intuito de obter as propriedades mecânicas e metalúrgicas e por fim fazer um comparativo entre as mesmas analisando a viabilidade de sua substituição.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Metodologia de planejamento

Antes de iniciar os estudos, foi necessário a utilização de uma metodologia de planejamento, execução e análise de projetos ou ensaios. A técnica escolhida foi o PDCA, o mesmo trata-se de um mecanismo iterativo e contínuo de administração de projetos que se baseia em quatro etapas, sendo elas: Plan (Planejar), Do (fazer), Check (checar) e Act (agir).

2.2 Análise dos materiais

Analisando a liga atualmente utilizada, SAE 8620, e sua possível substituta DIN16MnCr5 (SAE 5115) no processo de fabricação dos virabrequins, tem-se que ambas as ligas são aços para cementação, com uma boa usinabilidade, comumente utilizados na indústria na fabricação de pinos, eixos, engrenagens, ou seja, peças que tem como exigência uma dureza superficial considerável, a fim de evitar o desgaste (CHIAVERINI, 1990).

O SAE 8620 é um aço de baixa liga que contém níquel, cromo e molibdênio, o que lhe confere boa resistência à fadiga, alta tenacidade e boa soldabilidade. A DIN 16MnCr5 (SAE 5115), por sua vez, é uma liga de aço cromo-mangânês que apresenta boa temperabilidade e soldabilidade, além de boa usinabilidade (CHIAVERINI, 1990).

2.3 Condições de teste

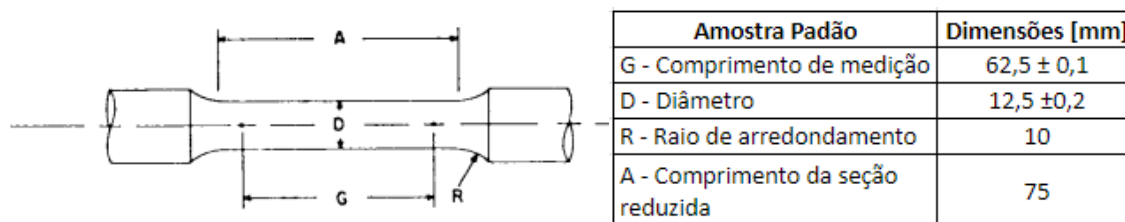
Foram abordadas três condições de teste, sendo elas: condição forjada a frio (que é a condição na qual a matéria-prima é recebida), condição somente temperada e revenida (sem adição de superficial de carbono) e por fim, a condição cementada (com adição de carbono) e temperada e revenida.

As análises que foram realizadas para cada condição de estudo são: teste de tração, dureza Vickers, dureza Brinell e CHD (Case Hardness Depth), que é a profundidade de dureza da camada cementada, além de uma análise metalográfica dos materiais para cada condição com o objetivo de revelar a microestrutura das amostras e avaliar suas características.

Após as definições das condições de teste, foi definido que seriam realizados 5 ensaios de tração para cada condição, totalizando 30 corpos-de-prova no total, tendo em vista que esta

amostragem traria resultados estatisticamente relevantes. Esses ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma da American Society for Testing and Materials - ASTM E8. A geometria de corpo-de-prova escolhida foi definida como a padrão cilíndrica recomendada pela norma de tração, sendo ela mostrada na Figura 1.

Figura 1: Geometria de corpo-de-prova de tração.



Juntamente com a geometria dos corpos de prova, a norma também indicou que o valor para velocidade do ensaio seria 10 mm/min.

2.4 Confeção dos corpos-de-prova

O processo de fabricação dos corpos-de-prova se deu através do seu desenho técnico no software de CAD 3D - CREO. Para a usinagem com o torno CNC dos corpos-de-prova utilizou-se a matéria-prima fornecida no formato de barras forjadas a frio de cada material. O aspecto dos corpos-de-prova após a usinagem pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2: Corpo-de-prova usinado.



Para a realização do processo de têmpera, revenimento e cementação, os corpos-de-prova foram tratados termicamente junto com as cargas de virabrequim produzidos na empresa, onde passaram pelas etapas de: austenitização, cementação a gás, difusão, resfriamento intermediário, têmpera e resfriamento em óleo. Levando em consideração que os corpos-de-prova de cada condição de teste passaram pelos mesmos processos de tratamento térmico, foram realizados dois processos no total. Uma imagem trazendo um corpo-de-prova após a cementação é mostrado na Figura 3.

Figura 3: Corpo-de-prova cementado.



Na confecção dos corpos-de-prova na condição temperada sem adição superficial de carbono, foi utilizado uma pasta de isolamento, Figura 4, com o intuito de evitar que eles passassem pelo processo de cementação a gás. O mesmo processo é comumente empregado em determinadas partes dos virabrequins fabricados pela empresa.

Figura 4: Corpo-de-prova isolado antes do tratamento térmico.



2.5 Realização das análises

Para a análise das durezas usaram-se as normas ASTM E10 e ASTM E92. Os testes de dureza foram executados no Laboratório de Materiais da empresa, com os mesmos corpos de prova utilizados no teste de tração, para o teste de dureza Vickers utilizou-se o equipamento Q10A – Qness, com uma carga de 3 kg e tempo de aplicação de 5 s e para o teste de dureza Brinell utilizou-se o equipamento UH930 – Wolpert, com uma carga 62,5 kg e um tempo aplicação de 13 s. Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LdTM UFRGS). Realizou-se alguns testes preliminares para saber se o Laboratório teria condições de realizar os testes. Para o teste foi utilizado a máquina universal de ensaios modelo DL 60000 - EMIC. Para as medições relacionadas ao alongamento e forças/tensões foram utilizados paquímetro digital, extensômetro e célula de carga.

Notou-se que a alta dureza dos corpos-de-prova proveniente do processo de cementação estava danificando as garras da máquina universal de ensaios. A solução encontrada foi isolar a cabeça dos corpos-de-prova antes de submetê-los ao processo de cementação, evitando o aumento da dureza nesta região dos mesmos, como mostra a Figura 5. Foi usado a mesma pasta protetiva utilizada para isolamento da condição cementada. Contudo atentou-se para que o isolamento não afetasse a região de transição do comprimento útil com a cabeça do corpo-de-prova, pois se trata de um concentrador de tensão. Logo, poderia afetar os resultados, fazendo com que o corpo-de-prova rompesse neste local, assim invalidando o resultado.

Figura 5: Corpo-de-prova com isolamento na região das cabeças.



Por fim, foi possível realizar todos os ensaios de tração e determinar as propriedades mecânicas das amostras. Os cálculos aconteceram por meio de sub-rotinas de cálculo pré-existentes no software INSTRON Bluehill e através de verificações dimensionais antes e após a realização dos ensaios.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Composição Química

Realizou-se a determinação da composição química das amostras utilizadas nos testes, com o objetivo de determinar se estava de acordo com os limites aceitáveis. A caracterização química foi realizada no Laboratório de Materiais da empresa utilizando o equipamento MAXx Lmm 14 - Spectromaxx. A Tabela 1 mostra os valores nominais esperados para as duas ligas de aço e a Tabela 2 mostra os valores encontrados.

Tabela 1: Valores nominais de composição química dos aços DIN16MnCr5 e SAE 8620. Fonte: ASTM A29/A29M - Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	Al (%)	Cu (%)
SAE 8620	0,14 - 0,18	0,15 – 0,30	1,0- 1,20	Máx. 0,02	Máx. 0,035	0,80 – 1,1	Máx. 0,05	-	0,02 – 0,05	Máx. 0,1
DIN 16MnCr5	0,19 - 0,25	0,15 - 0,35	0,60- 0,95	Máx. 0,03	Máx. 0,035	0,35 – 0,65	0,15 – 0,30	0,35 – 0,75	0,015 -0,05	Máx 0,25

Tabela 2: Valores encontrados para a composição química dos aços DIN16MnCr5 e SAE 8620.

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)	Ni (%)	Al (%)	Cu (%)
SAE 8620	0,14	0,24	1	0,02	0,0097	0,83	0,003	0,025	0,023	0,035
DIN 16MnCr5	0,2	0,26	0,79	0,02	0,012	0,53	0,16	0,49	0,016	0,13

Comparando a composição química das ligas, observa-se que no aço DIN 16MnCr5 há valores mais altos de manganês, cromo e carbono e valores mais baixos de níquel e molibdênio, se comparado com no aço SAE 8620.

Tendo em vista que os virabrequins são componentes críticos nos motores de combustão interna e sua aplicação tem como requisito uma alta resistência ao desgaste. Logo, a influência de cada elemento na liga é de extrema importância.

A literatura (ASM Handbook, 1990) indica que no aço DIN 16MnCr5, o carbono e o cromo contribuem para o aumento da resistência ao desgaste e da dureza superficial, e que o manganês aumenta a temperabilidade da liga. Já no aço SAE 8620, o níquel e o cromo

contribuem para o aumento da resistência à fadiga e da dureza superficial, e o molibdênio aumenta a temperabilidade da liga.

Ao final da análise crítica da composição química dos aços em questão, constatou-se que ambos apresentam os elementos químicos necessários para que possam atender às exigências do componente (virabrequim) em sua aplicação.

3.2 Microestruturas e tamanhos de grãos

Com o objetivo de maximizar as características desejadas durante a fabricação do componente e os processos de tratamento térmico aos quais cada grupo de amostras foi submetido, uma microestrutura distinta foi obtida em cada uma das condições. Essas diferentes microestruturas podem ter um impacto significativo nas propriedades mecânicas do componente, como sua resistência, dureza e tenacidade. Por esse motivo, é fundamental compreender as relações entre a microestrutura e as propriedades mecânicas, a fim de garantir que o componente atenda aos requisitos de desempenho e qualidade estabelecidos.

Observa-se que as amostras submetidas a forjamento a frio apresentam uma microestrutura constituída por ferrita e perlita (Figuras 6(a) e 7(a)), enquanto as amostras tratadas termicamente, conforme esperado, apresentam uma microestrutura formada somente por martensita revenida (Figuras 6(b) e 7(b)). É relevante destacar que a presença de ferrita e perlita nas amostras forjadas a frio pode favorecer uma maior ductilidade e tenacidade em relação às amostras temperadas, a qual tende a exibir maior dureza e resistência mecânica.

Figura 6: Aço SAE 8620 - Microestrutura com ataque químico de Nital 2,5%: (a) núcleo da amostra forjada a frio; (b) núcleo da amostra temperada.

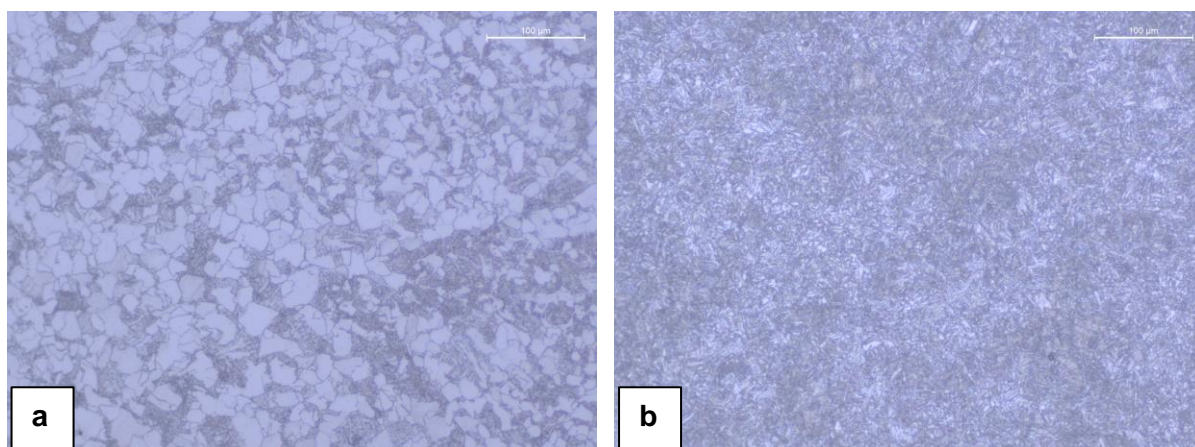
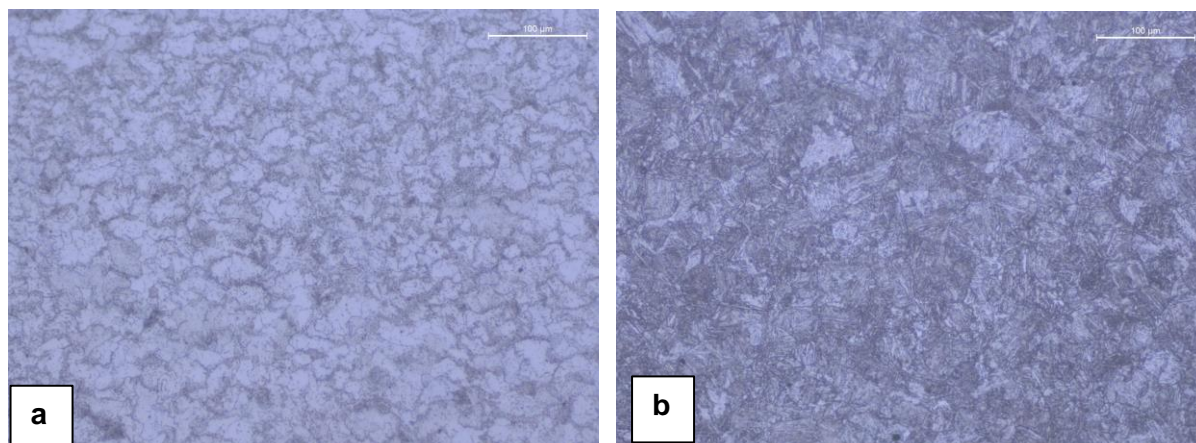


Figura 7: Aço DIN 16MnCr5 - Microestrutura com ataque químico de Nital 2,5%: (a) núcleo da amostra forjada a frio; (b) núcleo da amostra temperada.



Como observado na Figura 8 e na Figura 9, as amostras submetidas ao tratamento de cementação, ou seja, temperadas e revenidas após adição superficial de carbono, exibem uma microestrutura composta por martensita revenida no seu núcleo e superfície. Porém, nota-se uma martensita mais refinada na região próxima à superfície dos aços devido ao aumento da concentração de carbono na região.

Figura 8: Aço SAE 8620 - Microestrutura com ataque de Nital 2,5%.: (a) núcleo da amostra cementada; (b) superfície da amostra cementada.

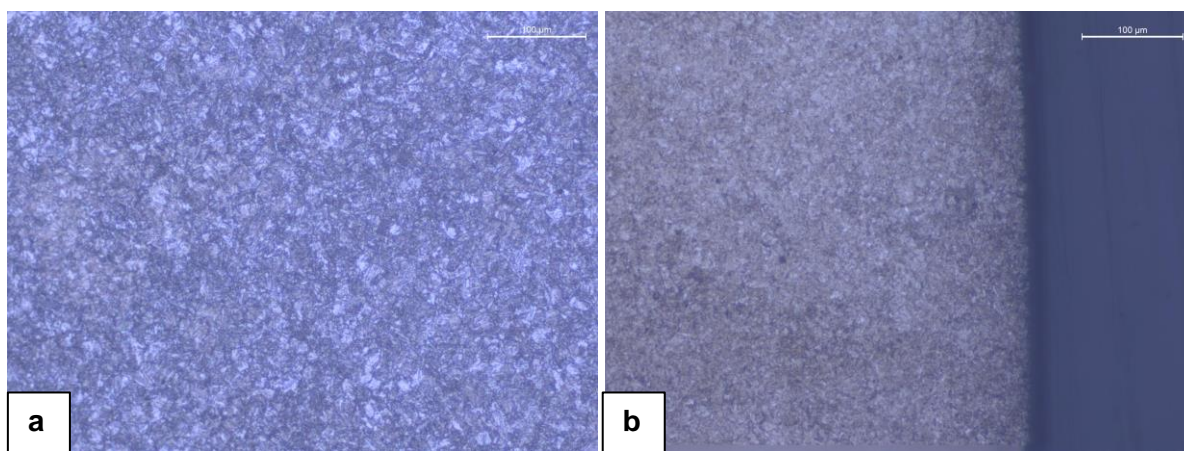
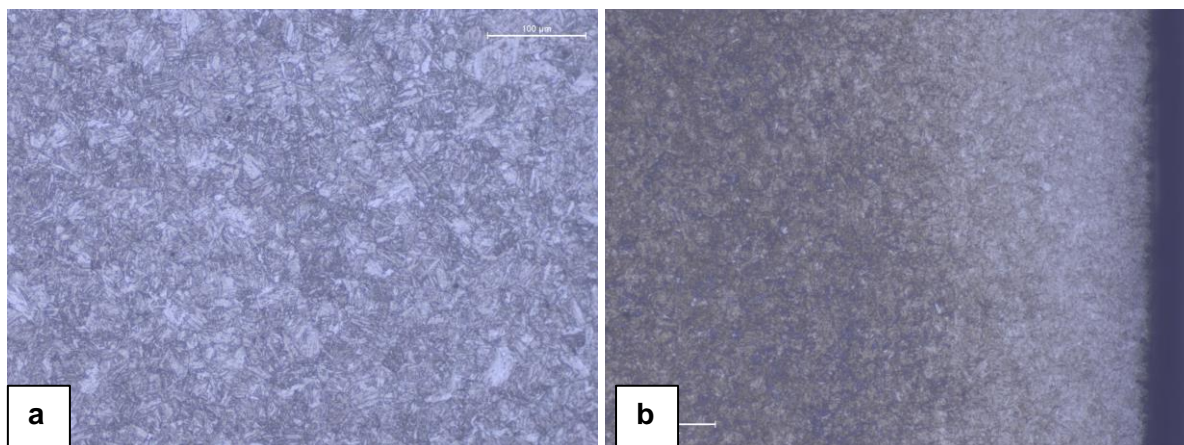


Figura 9: Aço DIN 16MnCr5 - Microestrutura com ataque de Nital 2,5%: (a) núcleo da amostra cementada; (b) superfície da amostra cementada.



Por fim, ao analisar as microestruturas de todas as condições de estudo (forjada, temperada e cementada) para os dois aços, constata-se que as fases presentes são similares em cada condição. No entanto, percebeu-se uma pequena variação no tamanho de grão das amostras, como mostrado nas Figuras 10 e 11.

Figura 10: Aço SAE 8620 - Tamanho de grão - Ataque com PICRAL: (a) núcleo da amostra temperada; (b) núcleo da amostra cementada; (c) superfície da amostra temperada.

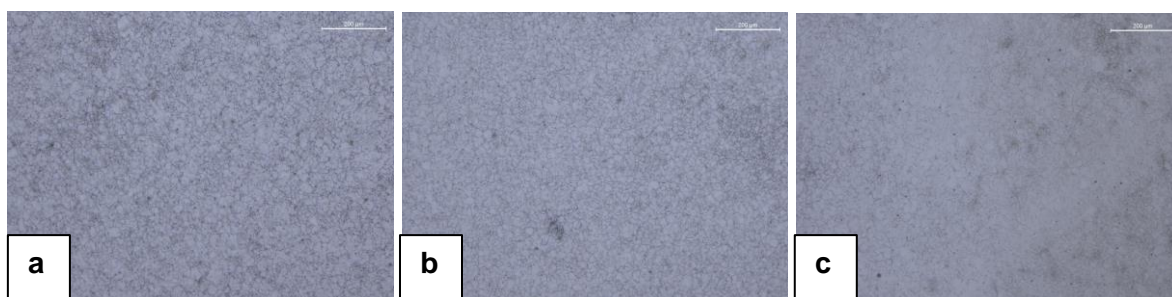
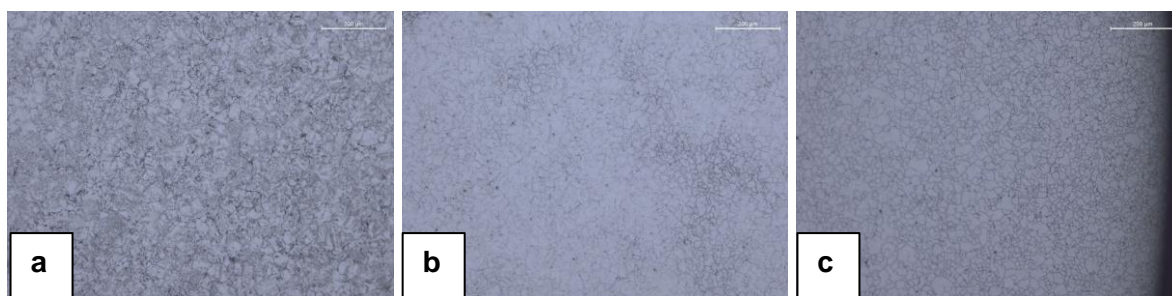


Figura 11: Aço DIN 16MnCr5 - Tamanho de grão - Ataque com PICRAL: (a) núcleo da amostra temperada; (b) núcleo da amostra cementada; (c) superfície da amostra temperada



Ao realizar uma análise visual dos tamanhos de grão utilizando a norma ASTM E112 como padrão, pode-se por fim constatar que em ambas as amostras o núcleo possui um tamanho de grão maior ($G = 5$ e 6) que na superfície onde o mesmo encontra-se muito menor ($G = 7$ e 8) e mais refinado.

3.3 Durezas

Considerando que a dureza desempenha uma função crucial na aplicação e na vida útil do componente, uma vez que está diretamente relacionada à resistência mecânica do material, torna-se especialmente importante em aplicações nas quais o material é exposto a forças externas ou desgaste, como é o caso do virabrequim. Nesse sentido, a avaliação dessa característica revela-se de extrema importância, uma vez que contribui para a seleção adequada do material, garantindo, assim, a qualidade e o desempenho do componente final.

Nas amostras usinadas, após o teste de tração, decidiu-se utilizar o ensaio Brinell para a determinação de dureza, visto que o mesmo é amplamente utilizado para a realização de testes de dureza em aços forjados pela sua facilidade de realização, baixo custo e alta precisão (CHIAVERINI, 1990). Foram feitos 3 pontos de dureza por corpos de prova totalizando 15 pontos. A Tabela 3 mostra a média dos resultados para os dois aços estudados.

Tabela 3: Resultados de dureza Brinell – Aços forjados a frio.

Material	Dureza [HBW 2.5/187,5]
SAE 8620	205,4 ± 3,1
DIN 16MnCr5	198,0 ± 2,5

Para a avaliação da condição temperada, decidiu-se utilizar o ensaio de dureza Vickers, pois o mesmo é o mais adequado para materiais duros, possui uma alta reprodutibilidade e produz uma marca muito pequena no material (CHIAVERINI, 1990), sendo também adequado para aplicação em corpos-de-prova embutidos, condição em que os corpos de prova estavam no presente estudo. Foram feitos 3 pontos de dureza por corpos de prova totalizando 15 pontos. A média dos resultados pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados de dureza Vickers – Condição temperada sem adição superficial de carbono.

Material	Dureza [HV 3]
SAE 8620	319,4 ± 9,6
DIN 16MnCr5	313,8 ± 4,9

Analisando os resultados da condição forjada e da condição temperada, verifica-se que ambos os aços apresentaram um valor de dureza muito similar. Os aços na condição forjada apresentaram valores de dureza menores que na condição temperada devido à microestrutura

composta por ferrita e perlita, constituintes mais macios, com menor resistência do que a martensita da condição temperada (KRAUSS, 1980).

3.4 Profundidade de camada cementada

Considerando que é fundamental avaliar a eficácia do processo de cementação nas amostras, procedeu-se a realização de um ataque químico com Nital 2,5% nos corpos-de-prova embutidos, tanto na liga SAE 8620 quanto na liga DIN 16MnCr5, com o objetivo de efetuar uma inspeção visual e identificar as áreas com maior e menor espessura de camada cementada (como exemplificado na Figura 12), a fim de realizar posteriormente a análise do perfil de durezas nessas duas regiões. Foi utilizado o valor de 550 HV como limite mínimo para a profundidade das camadas. A Tabela 5 mostra o valor final de cada camada cementada, enquanto a Figura 13 apresenta o comportamento dos perfis de dureza das camadas cementadas.

Figura 12: Amostras embutidas - Ataque com Nital 2,5%: (a) região com camada cementada com maior espessura; (b) região com camada cementada com menor espessura.

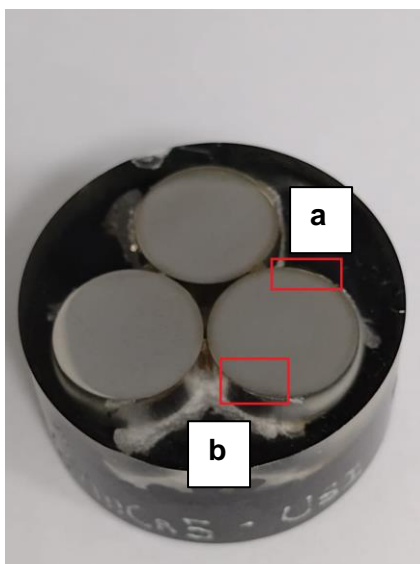
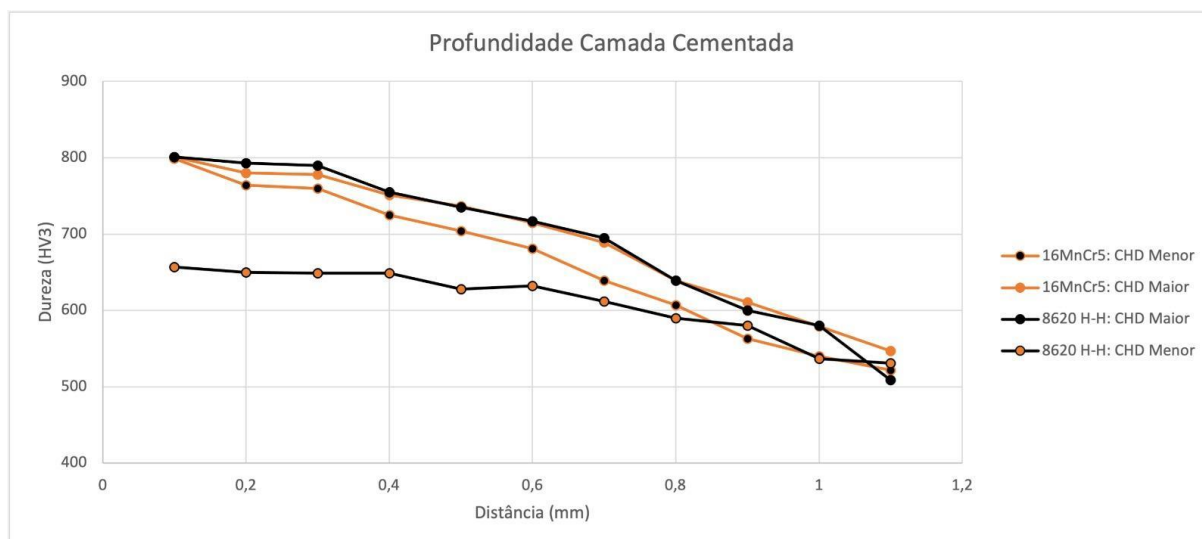


Tabela 5: Valor médio da profundidade da camada cementada com maior e menor espessura.

Material	CHD Maior	CHD Menor
SAE 8620	1 mm	0,81 mm
DIN 16MnCr5	1 mm	0,86 mm

Figura 13: Comportamento do perfil de dureza das camadas cementadas.



Por fim, ao se analisar os perfis de dureza na Figura 13, constata-se constatar que a camada cementada do material DIN 16MnCr5 apresentou valores em geral superiores que a do material SAE 8620 e que a diferença entre os valores de dureza próximo à superfície foi próxima de 20%. Além disso, houve um aumento de dureza de 40% na superfície do material cementado se comparado com a condição somente temperada e revenida sem a adição superficial de carbono. Perfis semelhantes de dureza foram observados por Yeğen e Usta (2010), e eles mencionam que as discrepâncias nos valores de dureza podem ser explicadas pelas variações na composição química dos aços. Essas variações impactam não somente a difusão do carbono durante o processo de cementação, mas também a temperabilidade do aço, além de contribuírem para o aumento da dureza por meio da solução sólida.

3.5 Ensaio de tração

As Tabelas 6, 7 e 8 apresentam os valores obtidos nos testes de tração para os dois aços estudados, em cada condição de teste. Os gráficos resultantes dos ensaios estão no Apêndice.

Tabela 6: Resultados de tração – Aços forjados a frio.

Material	Resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Estricção [%]
SAE 8620	452,7 ± 2,2	293,4 ± 9,3	50,7 ± 3,9	71,6 ± 1,8
DIN 16MnCr5	439,0 ± 1,4	361,0 ± 5,7	55,2 ± 0,5	77,4 ± 0,4

Tabela 7: Resultados de tração – Aços temperados sem adição superficial de carbono.

Material	Resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Estricção [%]
SAE 8620	829,8 ± 9,4	622,3 ± 14,5	20,07 ± 1	55,95 ± 1,1
DIN 16MnCr5	870,0 ± 3,1	733,7 ± 4,6	15,62 ± 0,6	64,48 ± 1,6

Tabela 8: Resultado de tração – Condição cementada (temperado com adição de carbono).

Material	Resistência à tração [MPa]	Força Máxima [kN]
SAE 8620	1042,0 ± 61,9	127,9 ± 7,6
DIN 16MnCr5	1160,0 ± 83,8	137,0 ± 10,3

Por fim, notou-se que o material DIN 16MnCr5 apresentou resultados superiores em todos os aspectos mecânicos na condição forjada, com exceção da resistência à tração, onde a liga SAE 8620 obteve um valor 3% maior.

Na condição temperada, o aço DIN 16MnCr5 apresentou apenas o valor de alongamento inferior ao do aço SAE 8620.

Na condição cementada (temperada com adição de superficial de carbono), os dois aços apresentaram somente deformação elástica, característica de materiais frágeis. Nesta condição, o material DIN 16MnCr5 demonstrou uma resistência à tração aproximadamente 16% maior do que o material SAE 8620. O comportamento frágil nessa condição pode ser atribuído ao elevado valor de dureza e elevada resistência da camada cementada; quando comparado com a condição temperada e revenida, a superfície dos aços na condição cementada, temperada e revenida possuía pelo menos o dobro de valores de dureza. Os resultados do ensaio indicam que possivelmente a camada cementada foi o fator de maior importância no comportamento à tração dos aços. Straffelini e Versari (2009) também observaram a ocorrência de fratura frágil após a cementação e apontaram diversos possíveis fatores para explicá-la. Dentre eles, destacam-se o alto teor de carbono que pode resultar em microtrincas na martensita e provocar comportamento frágil; elementos de liga que podem favorecer a fratura intergranular; a absorção de hidrogênio da atmosfera de cementação; e a formação de oxidação intergranular caso haja presença de oxigênio na atmosfera de cementação. Para identificar a causa da fratura frágil nas amostras cementadas, seria necessária uma análise mais minuciosa das superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados neste estudo.

A Figura 14 mostra o comportamento do corpo-de-prova cementado, temperado e revenido tracionado, no qual a fratura é predominantemente frágil (praticamente não apresenta alongamento e estrição).

Figura 14:Corpo-de-prova cementado, temperado e revenido tracionando



4. CONCLUSÕES

Os aços DIN 16MnCr5 e SAE 8620 apresentaram microestruturas semelhantes tanto na condição forjada (ferrita e perlita) quanto nas condições temperada sem adição de carbono e com adição de carbono (martensita revenida).

Os valores de dureza apresentados pelos aços dois na condição forjada foram similares, assim como na condição temperada sem adição de carbono. No entanto, na condição cementada, a análise de durezas ao longo da profundidade da camada cementada mostrou valores de dureza menores em até aproximadamente 20% para o aço 8620 quando comparado com o aço DIN 16MnCr5. Para ambos aços, após a cementação, o aumento do teor de carbono na superfície dos aços provocou um aumento de cerca de 40% no valor de dureza quando comparado à condição temperada sem adição de carbono.

Ao realizar uma análise de custo dos materiais com os atuais fornecedores da empresa, notou-se que existe uma diferença econômica entre os materiais sendo que o aço DIN 16MnCr5 apresenta um custo aproximadamente 11% menor do que o SAE 8620. É importante ressaltar que as informações obtidas neste processo constituem um segredo industrial. Logo, não puderam ser abordadas mostradas neste estudo.

Finalmente, considerando os resultados das análises feitas no presente trabalho, e a análise de custo dos materiais, conclui-se que o aço DIN 16MnCr5 é uma alternativa viável ao aço SAE 8620. Contudo, indica-se que sejam feitos testes dinâmicos e funcionais com o intuito de avaliar a vida em fadiga, tanto do material quanto do componente produzido, além da avaliação de viabilidade de produção com esta substituição.

REFERÊNCIAS

- ASM Handbook, Volume 1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, 1990.
- ASTM A29/A29M - 20 - Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought.
- ASTM E8 - 22, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- ASTM E10 - 18, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.
- ASTM E112 - 13, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.
- ASTM E92 - 17, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials.
- BRUNETTI, F. Motores de combustão Interna..Editora Edgard Blücher. São Paulo, Volume 1. 2ª Edição, 2018.
- CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo, 7º Edição, 1996.
- COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Editora Blucher; Edição 4º. São Paulo, 2008.
- KRAUSS, G. Steels Processing, Structure, and Performance. ASM International, 2005.
- MARQUES, T. Estudo do efeito de duas taxas de resfriamento no tamanho de grão austenítico do aço DIN 20MnCr5 forjado a quente, cementado e temperado, PPEGEM, Ufrgs, 2021.
- MINUCCI, F. Fadiga Multiaxial Aplicada à Avaliação da Vida de Virabrequins. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2010.
- MONTAZERSADGH, H.; FATEMI, Ali. Dynamic Load and Stress Analysis of a Crankshaft. University of Toledo. 2007.
- SILVA, Soraia Karolinne Castro; SILVA, Marcelo José Gomes da; PINHEIRO NETO, Antonio Aldenor. Análise da influência da martensita nas propriedades mecânicas do aço CA-50 tratado termicamente via Thermex®. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO E CONFORMAÇÃO DE METAIS, 55º., 02 a 04 out. 2018, São Paulo, SP, Brasil. Anais[...], São Paulo, p. 353-365, 2018.
- STRAFFELINI, G; VERSARI, L. Brittle intergranular fracture of a thread: the role of a carburizing treatment. Engineering Failure analysis 16 (2009) 1448-1453.
- YEGEN. I; USTA, M.. The effect of salt bath cementation on mechanical behavior of hot-rolled and cold-drawn SAE 8620 and 16MnCr5 steels. Vacuum 85 (2010) 390-396.

APÊNDICE

Gráficos tensão deformação

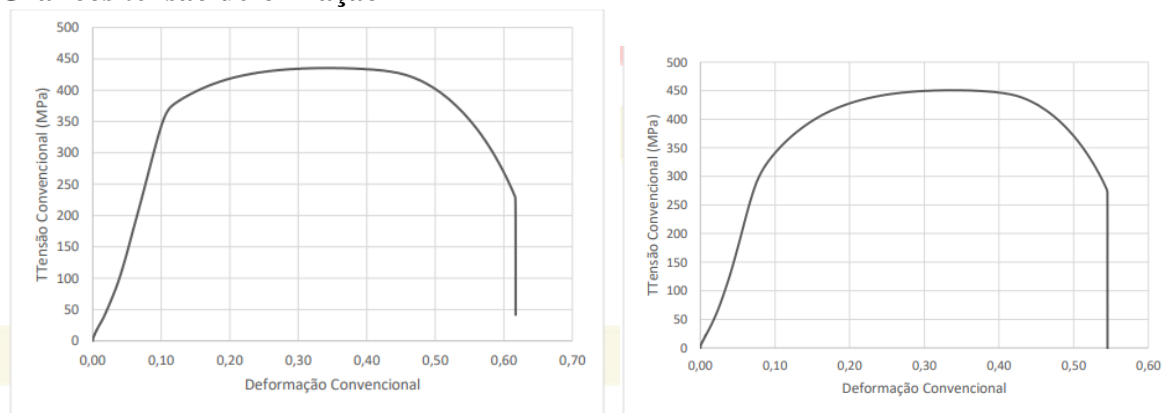


Figura 15: Gráfico de tensão x deformação para a condição forjada - A esquerda material DIN 16MnCr5 e a direita material SAE 8620.

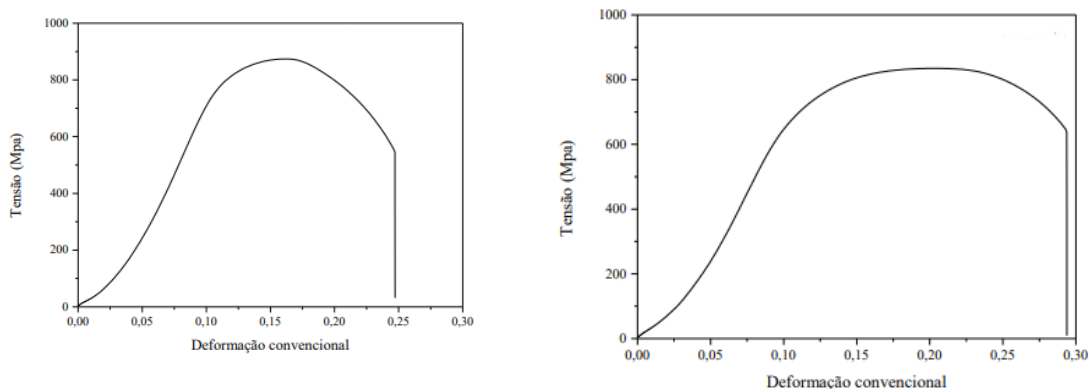


Figura 16: Gráfico de tensão x deformação para a condição Temperada - A esquerda material DIN 16MnCr5 e a direita material SAE 8620.

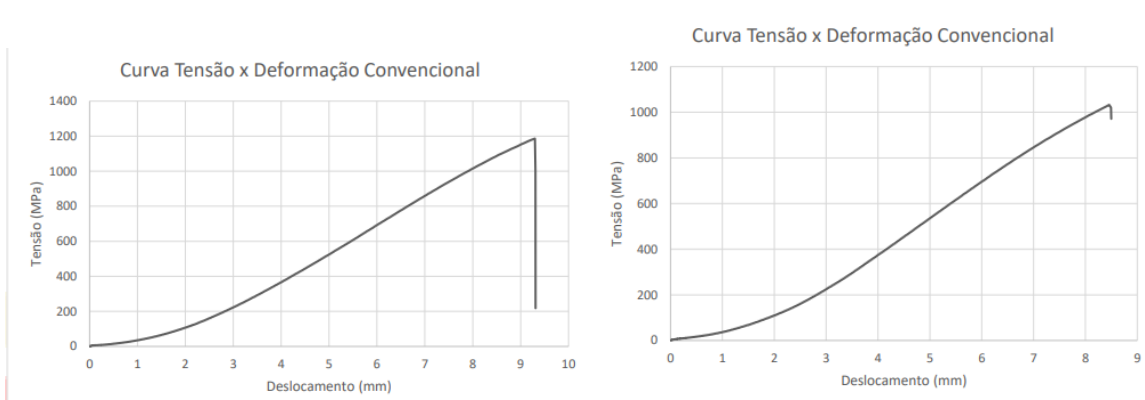


Figura 17: Gráfico de tensão x deformação para a condição Cementada - A esquerda material DIN 16MnCr5 e a direita material SAE 8620.