

## **INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO NA DISTORÇÃO GEOMÉTRICA DO AÇO SAE 1045 APÓS TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA**

Vitor Bettiato Zattera, [vitor.bz@live.com](mailto:vitor.bz@live.com)<sup>1</sup>

Daniela Lupinacci Villanova, [daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha - RS<sup>1</sup>

**Resumo:** Componentes mecânicos como eixos e pinos muitas vezes requerem uma dureza superior à garantida pelo aço utilizado para resistir a esforços e elevadas cargas de trabalho. Uma maneira de garantir essa condição é o emprego de tratamentos térmicos como o de têmpera, sendo a principal opção por garantir ao componente fabricado um significativo aumento em sua dureza, resistência ao desgaste e outras propriedades mecânicas. Porém, quando não bem calculadas, as diversas variáveis presentes no decorrer do tratamento térmico podem ocasionar situações indesejadas para o fabricante, como distorções geométricas ao longo da peça, muitas vezes inviabilizando a sua utilização no projeto ou máquina para o qual foi projetado. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo analisar o efeito da variação do diâmetro de uma barra cilíndrica de aço SAE 1045 sobre possíveis distorções decorrentes do processo de têmpera. Este aço foi escolhido devido às suas propriedades mecânicas equilibradas, como boa resistência mecânica, soldabilidade, usinabilidade, se mostrando versátil e amplamente utilizado para construção mecânica. Para esta análise foram selecionados dois diâmetros, a saber 9,53 mm e 12,7 mm, ambos submetidos à têmpera em água. As distorções foram medidas com auxílio de equipamentos como relógio comparador e paquímetro. As amostras também passaram por análise metalográfica para avaliação microestrutural e por ensaios de dureza. Todas essas verificações foram realizadas antes e depois do tratamento térmico, para efeito de comparação. Os resultados mostraram que os corpos de prova apresentaram distorções, sendo mais significativas no meio da barra. Além disso, o grau de distorção foi maior para a barra de menor diâmetro. As análises de microestrutura e dureza se mostraram similares entre os dois diâmetros. Supõe-se que essa variação de distorção se deve à presença de maior quantidade de martensita na microestrutura das amostras com menor diâmetro, uma vez que o resfriamento nessas amostras aconteceria de forma mais rápida e homogênea.

**Palavras-chave:** têmpera, SAE 1045, distorção, diâmetro.

### **1. INTRODUÇÃO**

O aprimoramento das propriedades mecânicas dos materiais é um processo essencial que visa a otimização do desempenho de componentes utilizados em diversas áreas da indústria. Nesse contexto, o tratamento térmico dos metais, em particular a têmpera, que será o objeto de estudo deste trabalho, desempenha um papel preponderante, garantindo que materiais antes susceptíveis a deformações e outras falhas por falta de resistência, passem a ser mais duráveis por consequência do aumento de sua dureza.

O início da utilização do processo de têmpera na história humana remonta à Idade do Ferro, por volta de 1200 a.C., quando ferreiros celtas e germânicos realizaram a descoberta de que, ao submeter o aço ao calor intenso e depois resfriá-lo rapidamente em água ou óleo, as propriedades mecânicas desse aço poderiam ser melhoradas significativamente. No século XIX, com a chegada da revolução industrial, aconteceram avanços significativos na técnica à medida que a compreensão científica dos processos de transformação de fase durante o rápido resfriamento do aço permitiu que a prática fosse realizada com cada vez mais controle dos resultados. A técnica, antes utilizada para confecção de espadas, armaduras e ferramentas, hoje se encontra em diversos setores fabris como, por exemplo, em virabrequins e engrenagens na área automotiva, brocas, lâminas e fresas na área metalúrgica e diversos outros componentes essenciais para a fabricação mecânica na atualidade. (Nokivov, 1994)

O tratamento térmico dos aços compreende uma série de etapas que envolvem o aquecimento, a manutenção em determinada temperatura e subsequente resfriamento. Essas práticas são realizadas com o intuito de modificar as propriedades e a microestrutura dos aços, após as fases iniciais do processo de fabricação. É a variação desses parâmetros que exerce influência significativa sobre o desempenho do aço em sua aplicação final. (Chiaverini, 2012)

Para a seleção de um aço para tratamentos térmicos, em especial os processos de têmpera e revenimento, a característica mais importante que deve ser procurada no material a ser utilizado é a sua temperabilidade, que defini a variação da dureza da superfície ao núcleo da peça e está diretamente ligada à capacidade do aço de formar martensita ao final do processo. (Colpaert, 2008). Por isso o aço SAE 1045 é amplamente utilizado na indústria metalmeccânica por conta das suas boas propriedades mecânicas, como boa usinabilidade, temperabilidade e excelente combinação desempenho-custo, tornando-se uma escolha econômica para diversas aplicações.

Embora esse processo viabilize um aumento de resistência mecânica, pode acarretar alguns problemas ao material. Vicente Chiaverini (1971), diz em seu livro que “Em geral, a melhora de uma ou mais propriedades de um aço, mediante um determinado tratamento térmico, é conseguida com prejuízo de outra.”, e no caso desse estudo, o foco de análise principal foi a relação que ocorre entre o expressivo aumento da dureza do aço após o resfriamento do corpo de prova em água, e uma possível distorção da peça advinda deste resfriamento que ocorre no processo. Neste efeito, também vem sendo investigado como diferentes diâmetros podem interferir nos resultados obtidos.

Assim, o aço SAE 1045 foi o material escolhido para realização deste estudo cujo objetivo é demonstrar e investigar o problema de distorção das peças temperadas em água que, quando não controlado, pode inviabilizar a sua utilização. Para essa investigação foram estudados dois diâmetros diferentes deste aço e a influência, neste efeito, desta variação de tamanho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Aço Carbono

O estudo dos aços carbono é fundamental no campo da engenharia mecânica, dada a sua ampla presença e utilidade em diversos ramos da indústria. Compostos principalmente por ferro e carbono, essas ligas apresentam variações nas propriedades mecânicas conforme o teor de carbono e outros elementos de liga. A diversidade nos teores de carbono, que podem variar de baixos a altos níveis, confere a estes materiais uma ampla gama de características, tais como ductilidade, tenacidade, resistência mecânica e dureza. A classificação em categorias de baixo, médio, alto e extra-alto teor de carbono possibilita a seleção específica para atender às demandas particulares de diversas aplicações, desde componentes estruturais até ferramentas de corte de alta resistência. A compreensão aprofundada das propriedades dos aços carbono é essencial não apenas para a seleção criteriosa de materiais, mas também para otimizar processos como tratamentos térmicos, que desempenham um papel crucial na manipulação das propriedades mecânicas dessas ligas. (Chiaverini, 2012)

De acordo com Krauss (2015), os aços carbono são categorizados por teor de carbono, variando de ínfimo até aproximadamente 2% em peso, e representam uma área crucial na engenharia de materiais. A evolução na metalurgia moderna permitiu a produção de aços com teores ultra baixos de carbono, desafiando a distinção tradicional entre aços e ferros. Ligas ferrosas com mais de 2% em peso de carbono são denominadas ferros fundidos, caracterizados por elevado teor de ferro, baixos pontos de fusão e boa fundibilidade. No contexto dos aços carbono, eles se dividem em dois grupos principais: aços carbono e aços liga. Aços carbono, destinados a aplicações em barras e forjamento, possuem faixas definidas de carbono, juntamente com limites máximos para Mn, Si, Cu, enxofre e fósforo. Já os aços liga possuem limites para esses elementos, podendo conter adições específicas de elementos como alumínio, cromo, cobalto, entre outros.

Para este estudo, destaca-se o aço SAE 1045, que por apresentar de 0,43 a 0,50% de carbono, é classificado como um aço de médio teor de carbono e, também, como aço especial para construção mecânica. Sua composição química é descrita na tabela 1 de acordo com o fornecedor. Este aço apresenta boa resposta a tratamentos térmicos, podendo ser submetido a normalização, recozimento, têmpera e revenimento de acordo com sua aplicação e propriedades mecânicas desejadas.

**Tabela 1. Composição química do aço SAE 1045 (% em massa). (Diferro Aços Especiais)**

<b>% C</b>	<b>% Mn</b>	<b>% Si</b>	<b>% P</b>	<b>% S</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Cr</b>
0,457	0,634	0,229	0,022	0,012	0,019	0,064
<b>% Ni</b>	<b>% Sn</b>	<b>% Mo</b>	<b>% Al</b>	<b>% Pb</b>	<b>% W</b>	<b>% Ti</b>
0,014	0,000	0,005	0,024	0,000		
<b>% Co</b>	<b>% V</b>	<b>% Nb</b>	<b>% B</b>	<b>% N</b>		
	0,003	0,000	0,000			

## **2.2. Microestruturas do Aço**

Os aços apresentam uma diversidade de microestruturas, cada uma com propriedades únicas, influenciadas por diferentes processos de fabricação e tratamentos térmicos. Uma compreensão abrangente dessas microestruturas é fundamental para controlar as propriedades mecânicas dos aços para que se atinjam as necessidades específicas de cada aplicação.

### **2.2.1. Ferrita**

A ferrita, uma fase microestrutural presente nos aços, é caracterizada pela organização cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) do com baixíssimo teor de carbono em solução sólida. Conforme Colpaert (2008), sua presença desempenha um papel vital nas propriedades mecânicas desses materiais, conferindo-lhes características específicas de conformabilidade e ductilidade. Sua principal característica é sua ductilidade, proporcionando ao aço a capacidade de deformação plástica necessária em diversas aplicações. Essa microestrutura é relativamente macia e magneticamente suave, permitindo que seja facilmente magnetizada e desmagnetizada. Apesar de sua menor resistência mecânica em comparação com algumas outras microestruturas, como a martensita, a presença controlada de ferrita pode otimizar as propriedades gerais do aço. Sua influência positiva na tenacidade, mesmo em temperaturas mais baixas, torna-a crucial em aplicações de serviço em ambientes frios. O controle preciso da quantidade de ferrita na microestrutura do aço é alcançado por meio do ajuste de parâmetros durante o tratamento térmico, como a temperatura e a taxa de resfriamento. Essa flexibilidade no controle da ferrita permite a adaptação das propriedades do aço para atender a requisitos específicos de uma ampla gama de aplicações industriais e comerciais.

### **2.2.2. Perlita**

De acordo com Krauss (2015), a perlita, uma microestrutura formada durante o resfriamento lento do aço, é formada por uma rede de lamelas alternadas de ferrita e cementita. Sua presença é fundamental para conferir ao material uma combinação equilibrada de tenacidade e resistência, tornando-a muito importante para conferir as propriedades mecânicas aos aços. O controle preciso da taxa de resfriamento durante o processo de formação da perlita é crucial para ajustar a quantidade e a distribuição dessas lamelas na estrutura do aço.

### **2.2.3. Martensita**

A martensita, uma fase metaestável formada durante o resfriamento rápido do aço, destaca-se por sua estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) e extrema dureza. Van Vlack (1964) refere-se a essa microestrutura como parte essencial para conferir ao aço propriedades mecânicas notáveis, embora sua fragilidade inerente exija atenção durante o processo de tratamento térmico. O principal destaque da martensita diz respeito a sua dureza excepcional, resultado da transformação rápida e não difusional que ocorre durante a têmpera. A estrutura TCC compacta contribui para a resistência ao desgaste e características de corte, tornando-a uma escolha valiosa em aplicações como ferramentas de corte. Contudo, a martensita é conhecida por sua fragilidade, sendo susceptível a trincas e falhas. Estratégias de revenido são empregadas para reduzir essa fragilidade, promovendo um equilíbrio entre a dureza da martensita e a tenacidade necessária para evitar falhas catastróficas. Segundo Krauss (2005), para diminuir esse efeito, o processo de revenido deve ser aplicado, envolvendo o reaquecimento controlado da peça a uma temperatura inferior à da austenitização. Esse passo tem o objetivo de aliviar tensões internas e melhorar a tenacidade do aço.

### **2.2.4. Cementita**

Segundo Colpaert (2008) a cementita, uma fase rica em carbono, é um componente essencial da perlita e desempenha um papel crucial na definição das propriedades mecânicas dos aços. Sua presença contribui significativamente para a dureza e a resistência do material, tornando-a um elemento fundamental na engenharia de microestruturas. A principal característica da cementita é sua dureza inerente, resultante da sua composição rica em carbono. Isoladamente, ela é uma fase quebradiça, mas quando combinada em uma matriz com outras fases, como a ferrita na perlita, contribui para as propriedades mecânicas desejadas. O controle cuidadoso da quantidade de cementita durante os processos de tratamento térmico é essencial para ajustar as propriedades do aço, de acordo com os requisitos específicos

de cada aplicação. Sua presença é especialmente crucial em aplicações que demandam alta resistência e dureza, como em ferramentas de corte e componentes sujeitos a desgaste severo.

### 2.2.5. Austenita

A austenita, uma fase estável de alta temperatura nos aços, desempenha um papel crucial nos tratamentos térmicos, especialmente no processo de têmpera. Colpaert (2008) também explica que durante o aquecimento da peça de aço a uma temperatura acima da linha crítica, a austenita é formada, representando uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). Essa fase é marcada pela capacidade de dissolver carbono em concentrações substanciais, contribuindo para a plasticidade e ductilidade do material. O resfriamento controlado a partir da austenita definirá se o aço apresentará estrutura perlítica ou martensítica. Assim, a manipulação controlada da austenita durante os tratamentos térmicos é essencial para otimizar as propriedades mecânicas dos aços, desempenhando um papel central na engenharia de materiais.

### 2.3. Tratamento Térmico de Têmpera

O processo de tratamento térmico de têmpera é uma etapa crítica na produção de aços, visando aprimorar suas propriedades mecânicas, especialmente resistência e dureza. Como cita Chiaverini (2012), essa técnica envolve uma sequência controlada de aquecimento e resfriamento rápido, resultando na formação da microestrutura martensítica, conhecida por sua excepcional dureza. Durante a etapa de aquecimento, a peça de aço é elevada a uma temperatura acima da linha crítica, facilitando a difusão dos átomos de carbono na matriz do aço.

O sucesso do tratamento térmico de têmpera depende do controle preciso de variáveis como temperatura, tempo e taxa de resfriamento. Essa capacidade de ajuste possibilita a customização das propriedades do aço conforme as demandas específicas de diferentes aplicações industriais. O tratamento térmico de têmpera é extensivamente utilizado em setores como a fabricação de ferramentas, componentes mecânicos de alta resistência e engrenagens, destacando sua importância na produção de materiais de desempenho avançado.

Nem todo aço tem a mesma capacidade de endurecer através da formação da martensita; esta capacidade, denominada temperabilidade, está relacionada, segundo Colpaert, 2008, ao tamanho de grão austenítico, à homogeneidade da austenita, além da presença de elementos de liga. A temperabilidade, portanto, define a variação de dureza a partir da superfície do aço até seu núcleo. Aços com alta temperabilidade podem formar martensita em maiores profundidades com taxas de resfriamento mais baixas, enquanto aços de baixa temperabilidade exigem taxas de resfriamento mais rápidas para atingir a mesma profundidade de endurecimento Novikov (1994). Essa propriedade é crucial para determinar até que profundidade o aço pode, efetivamente, endurecer, impactando diretamente as propriedades mecânicas finais do material. Segundo Costa e Silva e Mei (2010) existem diversos métodos para avaliar a temperabilidade dos aços, sendo os mais utilizados a taxa de resfriamento crítico, o ensaio de Grossmann e o ensaio Jominy.

Esses métodos fornecem informações cruciais sobre a resposta dos aços aos tratamentos térmicos, permitindo ajustes nos parâmetros de processamento para atingir as propriedades desejadas. A escolha do método é determinada pelas características específicas do aço e pelas exigências da aplicação.

### 2.4. Distorção do Aço

A distorção dimensional dos aços que passam por tratamentos térmicos está diretamente relacionada às mudanças na estrutura do material durante essa etapa. A formação de martensita, por exemplo, desempenha um papel central nesse comportamento. Como cita Nunes (2012), a mudança abrupta na disposição dos átomos na estrutura do aço durante a martensitização resulta em tensões residuais consideráveis, provocando uma deformação visível nas dimensões macroscópicas das peças. Além disso, a diferença nas taxas de resfriamento ao longo das diversas regiões das amostras contribui para variações locais na microestrutura, intensificando a distorção dimensional.

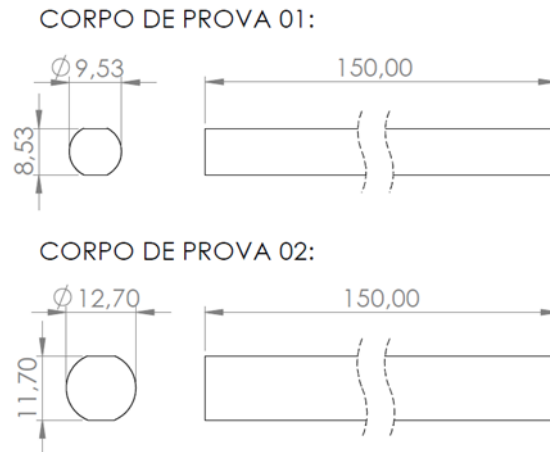
Conforme demonstrado por Hassel e Ross (1991), deformações na forma durante a etapa de austenitização geralmente decorrem do alívio de tensões residuais introduzidas em fases anteriores do processo de fabricação ou de um aquecimento não uniforme durante a têmpera. Quando apenas a superfície da peça passa pelo processo de austenitização e endurecimento, o metal no núcleo da peça, permanecendo a uma temperatura inferior, age para minimizar a distorção. Nunes (2012) comenta em seu estudo que a distorção de um componente mecânico sujeito à têmpera pode ser influenciada pela temperatura de austenitização. O emprego de um aquecimento elevado resulta em temperaturas de austenitização mais altas, o que gera níveis maiores de tensões residuais. Essas tensões residuais elevadas estão associadas ao aumento da contração não uniforme durante o resfriamento. Isso leva a outro ponto importante, que diz respeito a utilização de meios de resfriamento de alta severidade, como a água ou a salmoura, o que também gera uma tendência a provocar níveis elevados de tensões residuais, podendo resultar em distorções significativas.

Outro fator que influencia a tendência de distorção de um aço é a sua composição química, levando em consideração que quanto maior for seu teor de carbono ou manganês maior será sua probabilidade de distorção durante o resfriamento. Ainda em seu estudo, Nunes (2012) concluiu que por estarem correlacionadas, o aumento do volume do aço no decorrer das mudanças de fases ocorre devido ao aumento das tensões residuais que surgem na microestrutura no

aço. A transformação total da perlita e ferrita em martensita gera um considerável aumento de volume, consequentemente, deformando o aço.

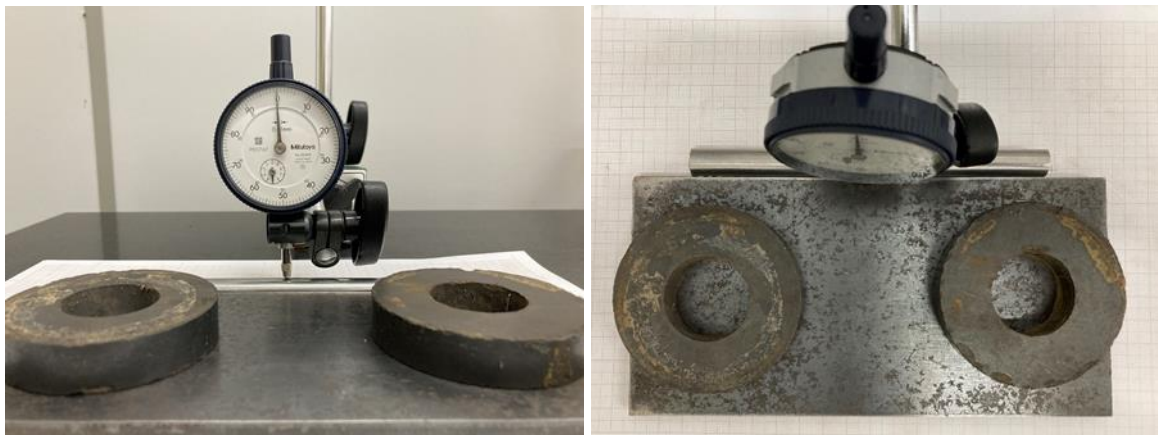
### 3. METODOLOGIA

Para este trabalho foram utilizadas barras redondas do aço SAE 1045 produzidas pelo processo de trefilação e fornecidas pela Diferro Aços Especiais LTDA, nos diâmetros de 9,53 mm e 12,7 mm. Para os corpos de prova dos dois diâmetros disponíveis, o material foi cortado em amostras de 150 mm de comprimento e fresado, sendo usinadas duas faces paralelas no sentido longitudinal (Figura 1). Neste processo foram retirados 0,5 mm de material de cada lado visando uma medição de eventuais distorções das amostras com maior acuracidade.



**Figura 1.** Vistas das amostras utilizadas no tratamento térmico.

Após o processo de usinagem, todas as amostras passaram por uma medição de distorção pré-existente, em decorrência da própria fabricação da barra como também do processo de fresamento a que foram submetidas. As medições aconteceram tendo três parâmetros principais avaliados: diâmetro, comprimento e a distorção longitudinal da amostra. Diâmetro e comprimento foram medidos com o uso de um paquímetro analógico, já a distorção longitudinal foi coletada com a utilização de um relógio comparador sobre um bloco de granito retificado (mesa desempeno). Para uma melhor fixação da amostra visando evitar deslocamentos no decorrer das medições foi elaborada uma base magnetizada com ímãs e uma chapa de aço, conforme figura 2.



**Figura 2.** Base de fixação com amostra e relógio comparador.

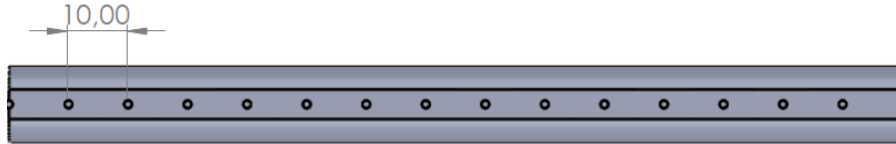
Cada amostra de 150 mm foi dividida em 15 pontos de medição, distantes 10 mm, visando um maior entendimento e melhor análise de como a distorção afetou todos os pontos da peça em questão, como pode ser visualizado na figura 3. Esta medição inicial foi denominada linha de base. As medidas de diâmetro foram coletadas em cinco pontos diferentes, sendo um a cada 30 mm.

Após todas as medidas dimensionais necessárias terem sido coletadas, uma amostra de cada diâmetro foi separada para análise metalográfica e testes de dureza com o material original (sem tratamento). As demais amostras foram temperadas em um forno sem atmosfera controlada na temperatura de 850 °C. O tempo de patamar foi tomado com base

em seu diâmetro, seguindo a especificação de Chiaverini, 1986. As amostras com diâmetro de 9,53 mm permaneceram no forno por 15 minutos, já as amostras com 12,7 mm permaneceram no forno por 20 minutos, a fim de garantir a austenitização completa e uma distribuição homogênea da temperatura em toda a extensão da peça.

Passado o tempo de aquecimento, as amostras foram retiradas com o auxílio de um tenaz e imediatamente submergidas em água. Para cada diâmetro, três amostras foram resfriadas em água mineral sem aditivos, totalizando 6 amostras ao final do processo.

Após a retirada da água, realizou-se um rápido lixamento das amostras para retirada dos óxidos resultantes do aquecimento, os quais poderiam prejudicar a medição das distorções ocorridas. Com isso, todas as amostras foram reposicionadas na base de medição magnetizada, onde foram novamente medidas, preservando as mesmas posições da avaliação pré têmpera. As variações foram comparadas com a linha de base de cada corpo de prova.



**Figura 3.** Pontos de medição com relógio comparador.

Para análise metalográfica, pequenas amostras foram retiradas de cada um dos corpos de prova para a preparação metalográfica. Esta constou do embutimento em baquelite com a utilização de uma prensa embutidora, seguidas de lixamento manual de forma sequencial seguindo granulometrias diferentes em cada lixa (120, 220, 320, 400, 600, 1200, 1500, 2000); posteriormente, foram polidas com a utilização de uma politriz automática e alumina de granulometria 3  $\mu\text{m}$ . O processo foi concluído com ataque químico com Nital a 3% a fim de acentuar o contraste entre as fases e melhorar a visualização microscópica. As imagens em microscópio foram coletadas na borda e do centro das amostras com o intuito de identificar as diferenças na microestrutura do aço em relação ao diâmetro e à proximidade da superfície da peça. Para tanto, foi empregado um microscópio óptico da marca Leica, modelo DM 2500 M.

Também foram coletadas medidas de dureza das amostras utilizando um durômetro Rockwell marca TIME modelo TH 301, em escala HRC, sendo aferidas tanto no sentido longitudinal das barras temperadas quanto nas amostras embutidas após análise metalográfica. Em cada um dos casos a dureza foi medida sempre em três pontos distintos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.2. Análise Dimensional

#### 4.2.1. Deformação Longitudinal

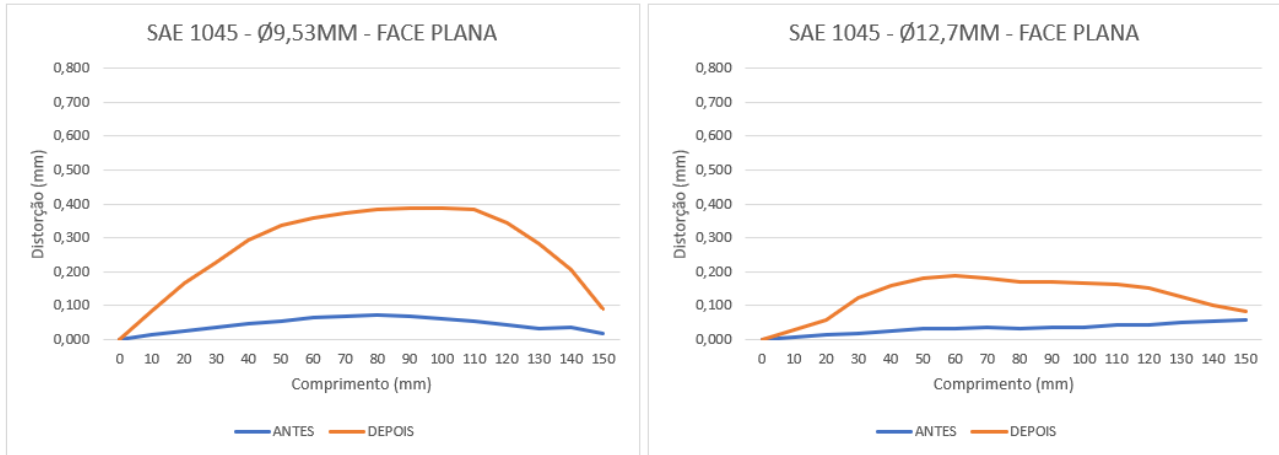
A primeira verificação da distorção ocasionada nas amostras foi realizada visualmente com auxílio da base retificada de granito, como mostra a figura 4. Nela, fica nítida a deformação da peça em comparação com a superfície plana da base (imagem com reflexo na base).



**Figura 4.** Amostra após têmpera sobre base de granito retificada.

A partir dos valores das medições coletadas referentes à deformação da face plana e em relação ao sentido longitudinal das amostras com diâmetro igual a 9,53 mm e 12,7 mm resfriadas em água, foi possível realizar a comparação com a

linha de base coletada das amostras ainda não expostas à têmpera e entender o efeito que diâmetros diferentes do aço exerceram sobre as mesmas condições de tratamento térmico, como mostrado na figura 5. Na região central as amostras com diâmetro igual a 12,7 mm apresentaram em média uma distorção máxima 48,15% menor do que a média das amostras com diâmetro igual a 9,53 mm, sendo a distorção máxima para o diâmetro de 12,7 mm igual a 0,157 mm e para o diâmetro de 9,53 mm igual a 0,326 mm. Já na extremidade do corpo de prova de diâmetro igual a 12,7 mm observou-se uma distorção final média de 0,025 mm, apresentando uma distorção 66,2% menor que a ocorrida nas amostras com diâmetro de 9,53 mm, na qual a distorção final média atingiu o valor de 0,074 mm.

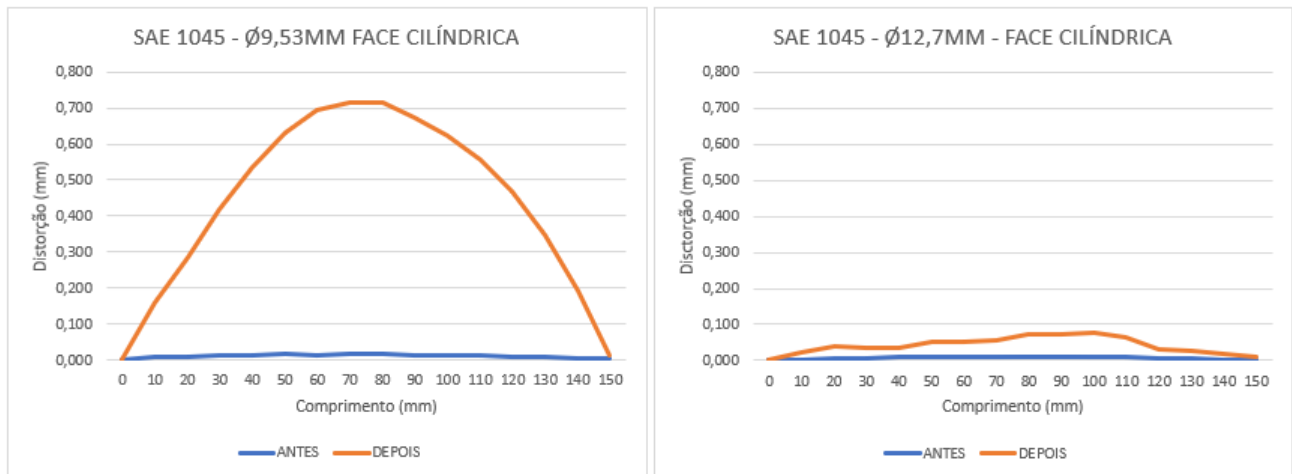


a) Diâmetro de 9,53 mm.

b) Diâmetro de 12,7 mm.

**Figura 5 – Média das deformações pré e pós-têmpera em água medidas na face plana.**

Na avaliação da distorção na face cilíndrica, a deformação também seguiu o padrão da face plana, porém com uma diferença muito mais acentuada a ponto de a distorção máxima média das amostras com diâmetro igual a 12,7 mm na região central atingir uma dimensão de 0,7 mm, sendo 90,42% menor que a média das amostras com diâmetro de 9,53 mm que obtiveram medidas iguais a 0,067mm no centro, como pode ser visualizado na figura 6. Nas extremidades o diâmetro de 9,53mm apresentou distorção igual a 0,012 mm sendo 58,33% maior que as medidas coletadas dos corpos de prova com diâmetro de 12,7mm, que obtiveram distorção de 0,007 mm.



a) Diâmetro de 9,53 mm.

b) Diâmetro de 12,7 mm.

**Figura 6 – Média das deformações pré e pós-têmpera em água medidas na face cilíndrica.**

Levando em consideração as medições das faces planas e cilíndrica e as avaliações visuais, pode-se constatar a maior distorção dos corpos de prova na região central, possivelmente podendo ser explicado pela própria geometria da peça que

por ser delgada possibilita maiores distorções na região central por não ter uma troca de calor com o ambiente tão acentuada quanto as extremidades das amostras.

#### 4.2.2. Comprimento

O comprimento inicial e final da peça também foi levado em consideração neste estudo para que houvesse um entendimento mais amplo de todas as variáveis presentes no decorrer do tratamento térmico de têmpera. Como é possível analisar nos gráficos presentes na figura 7 e na figura 8, em relação ao comprimento, o comportamento das amostras, na média, foi de um pequeno crescimento em relação à amostra anterior à têmpera. Conforme M. Neslušán (2011) essa deformação é causada principalmente pela transformação da estrutura que conta com diferentes dimensões da matriz de martensita; neste sentido, o grau de tetragonalidade dessa matriz acaba deformando a estrutura final após a têmpera ser realizada, modificando assim tanto o comprimento final da peça como a dimensão longitudinal vista anteriormente.



a) Diâmetro de 9,53mm.

b) Diâmetro de 12,7mm.

Figura 7 – Aumento de comprimento em milímetros após têmpera em água.

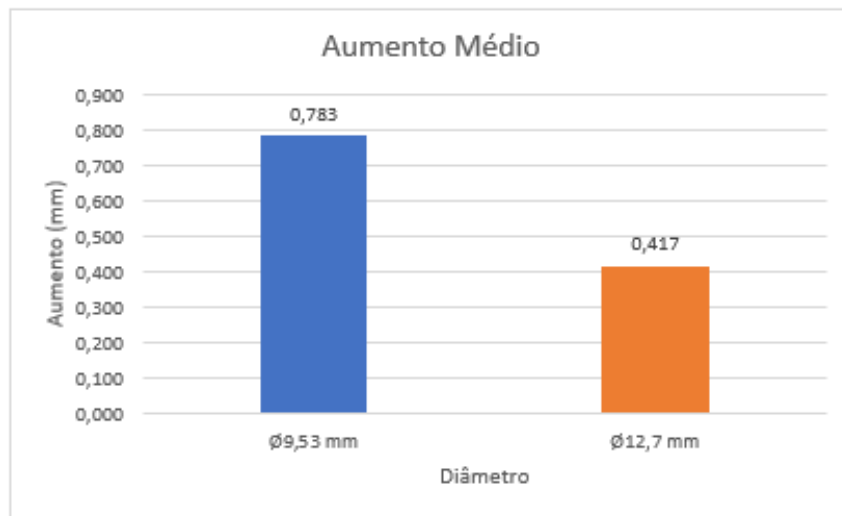
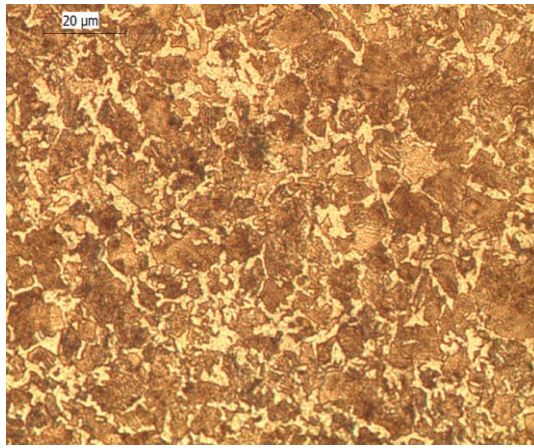


Figura 8 – Aumento médio do comprimento após têmpera em água.

Deve-se levar em consideração também que por ser um aumento muito pequeno no comprimento final da peça, pode existir a possibilidade de se dar por conta de óxidos que permaneceram envoltos nas peças após o resfriamento ou ainda estar dentro da incerteza de medição, levando em consideração possíveis erros de execução no método de medição realizado.

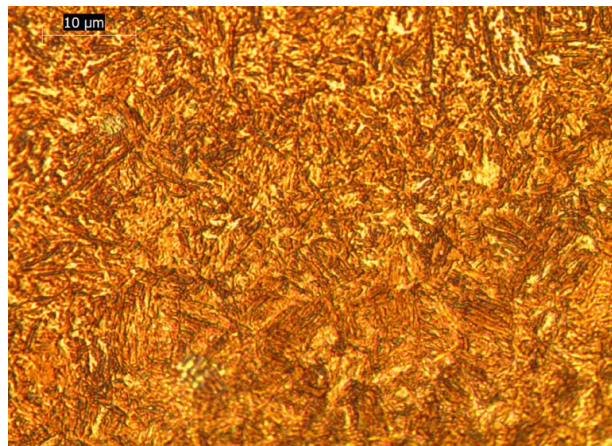
#### 4.3. Microestruturas

Na Figura 9 está apresentada a microestrutura do aço SAE 1045 sem o tratamento de têmpera com uma ampliação de 500x. Nessa figura é possível identificar a presença de ferrita e lamelas de perlita, sendo estruturas comuns no aço sem tratamento térmico.

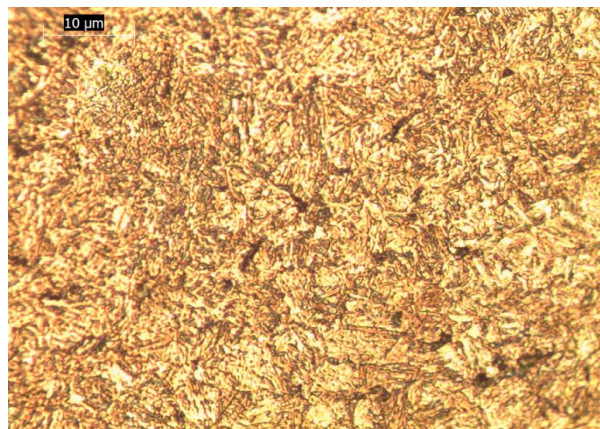


**Figura 9 – SAE 1045 sem tratamento**

Já nas figuras 10 e 11, é possível verificar a grande mudança em relação à amostra sem tratamento. Na figura 10 é apresentada uma imagem com aumento de 1000x da borda de uma das amostras com 9,53 mm de diâmetro, o que possibilita a identificação de agulhas de martensita provenientes da têmpera. Na figura 11, é possível observar a região central da amostra, também com aumento de 1000x, na qual também existe ocorrência de martensita na estrutura, demonstrando que, por conta do diâmetro ser consideravelmente pequeno, mesmo em zonas mais distantes da borda o resfriamento em água possibilitou a transformação de fase também nesses pontos.

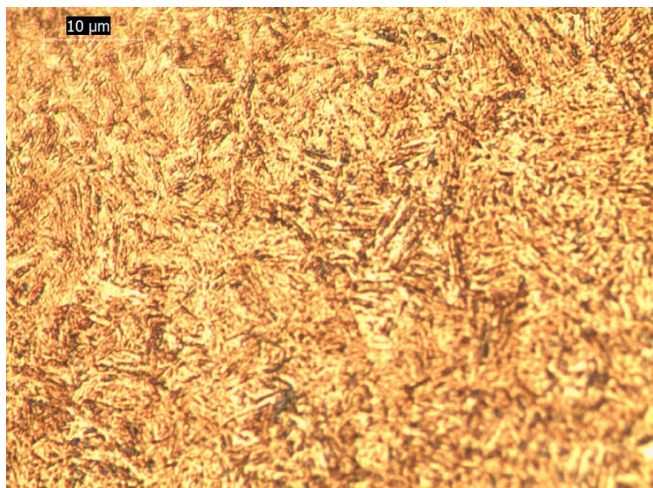


**Figura 10 – Borda da amostra com Ø9,53 mm pós têmpera.**

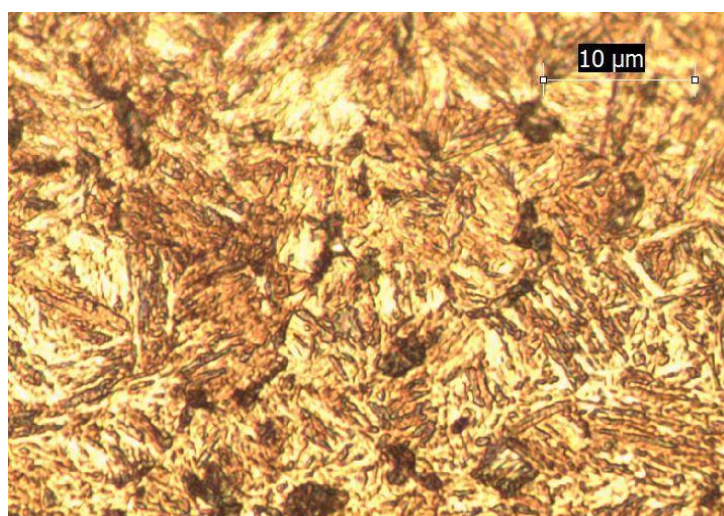


**Figura 11 – Centro da amostra com Ø9,53 mm pós têmpera.**

Em relação às amostras pós têmpera com diâmetro igual a 12,7 mm, pode-se identificar na figura 12 (borda) um resultado muito semelhante ao da amostra com diâmetro menor, pois como se trata da região mais externa o resfriamento aconteceu de forma praticamente igual nos dois casos, gerando assim uma quantidade de martensita muito similar.



**Figura 12 – Borda da amostra com Ø12,7 mm pós têmpera.**



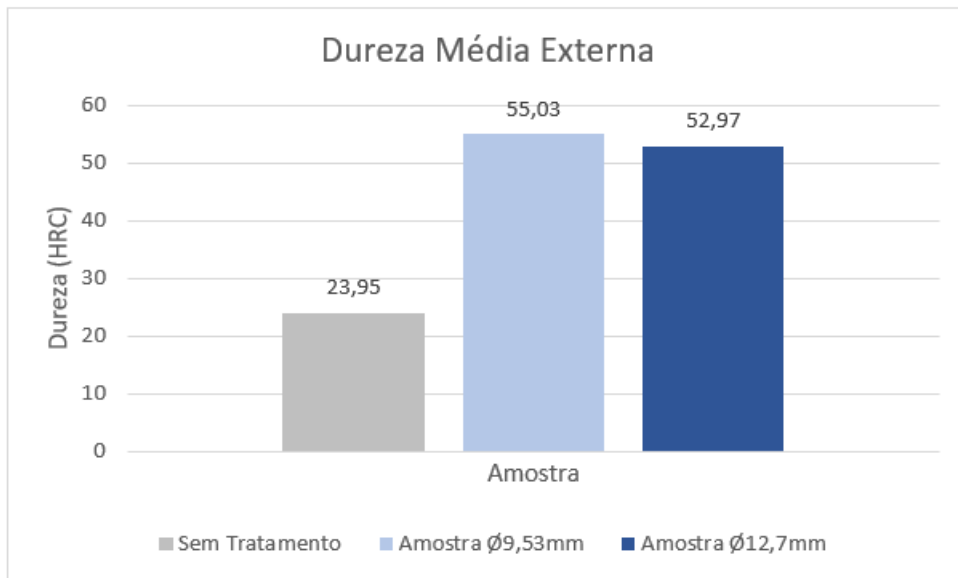
**Figura 13 – Centro da amostra com Ø12,7mm pós têmpera.**

Já a figura 13 segue o padrão da amostra de diâmetro 9,53 mm, porém com ainda menos martensita transformada, tendo em vista que por possuir um diâmetro maior, a região central dessa amostra é mais distante da borda e, conseqüentemente, tendo seu resfriamento ainda mais retardado.

Segundo Vieira (2021), após o processo de têmpera, pode haver uma presença de "austenita retida" ou "austenita residual" à temperatura ambiente. Essa presença pode deteriorar as propriedades mecânicas dos aços temperados e, posteriormente, sua transformação pode desencadear o fenômeno de instabilidade, o que seria uma explicação para as regiões mais claras presentes na microestrutura mesmo após a transformação de fase.

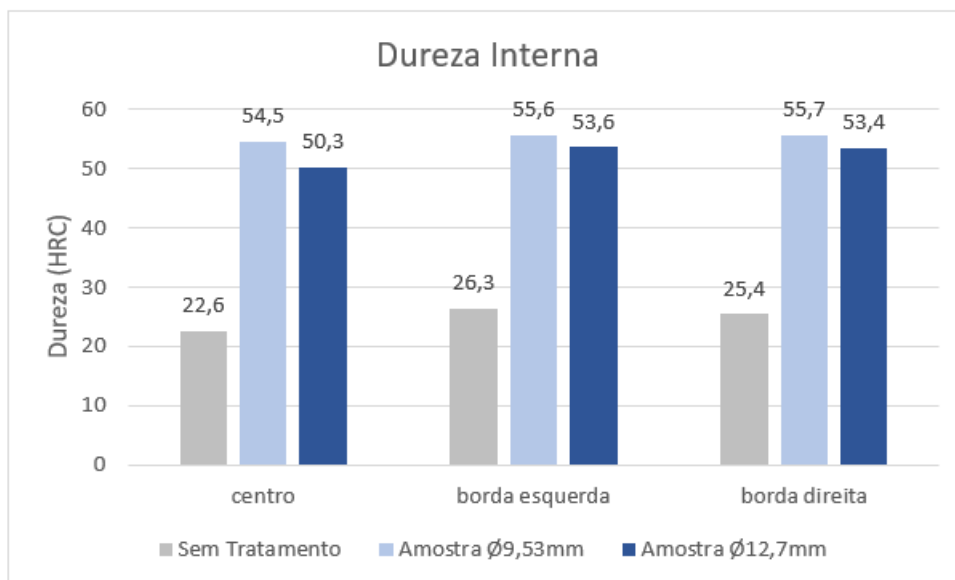
#### **4.4. Dureza**

Em relação aos testes de dureza realizados no durômetro de bancada Rockwell C (escala HRC), tanto na superfície externa quanto no centro, os resultados obtidos seguiram a tendência descrita na literatura de ocorrer um aumento significativo na dureza após o tratamento de têmpera. Nas amostras com diâmetro de 9,53 mm, a dureza média da superfície externa registrada pós têmpera foi de 55,03 HRC sendo 2,29 vezes maior que a dureza média do aço sem tratamento que é de 23,95 HRC. Já nas amostras com diâmetro de 12,7mm a dureza média registrada na superfície foi de 52,97 HRC ficando 3,73% menor do que a coletada nas amostras com diâmetro menor. As medições feitas na superfície externa da peça, no sentido longitudinal, com diâmetro de 9,53 mm, mostraram que o aço obteve um aumento considerável de dureza, conforme figura 14. No caso das amostras com diâmetro igual a 12,7 mm, o aumento da dureza foi ligeiramente menor, ficando em torno de 100,92% de aumento em relação à dureza do aço SAE 1045 sem tratamento térmico.



**Figura 14 – Dureza HRC na face longitudinal plana das amostras.**

Se tratando das medições realizadas nas amostras embutidas, a análise da dureza manteve o mesmo padrão com a medição da dureza das coletas na parte exterior, conforme figura 15, com as durezas nas amostras de diâmetro de 9,53 mm ficando um pouco superiores as das amostras com diâmetro igual a 12,7 mm. Neste caso, pode-se identificar uma dureza menor na região central das amostras; isso se deve ao fato de que por estar mais distante da superfície a região central acabou resfriando de forma mais lenta, ocasionando em uma menor formação de martensita nesses pontos, consequentemente, diminuindo a dureza do centro em relação às bordas das peças. Outro fator que pode ter influenciado na dureza do aço é a distorção da martensita presente na região; de acordo com Krauss (2005), este fato faz referência ao grau de tetragonalidade da martensita presente na região, que pode ser compreendido como o grau de alongamento ao longo de um dos eixos cristalinos em comparação com os outros. Quanto maior o grau de tetragonalidade, maior a distorção da estrutura cúbica original e maior a dureza.



**Figura 15 – Dureza HRC na região central interna das amostras.**

Na parte interna do aço, as amostras de diâmetro 9,53 mm obtiveram um aumento de dureza médio correspondente a 123,13% em relação ao aço SAE 1045 sem tratamento, com um valor médio igual a 55,26 HRC. Já nas amostras com diâmetro de 12,7 mm, o aumento médio da dureza foi de 111,67% em relação à amostra inicial, atingindo um valor de dureza médio igual a 52,4 HRC. Esses dados demonstraram que a dureza do aço temperado nas amostras com diâmetro menor se manteve 5,17% maior do que a coletada nas amostras com diâmetro de 12,7mm.

## 5. CONCLUSÃO

Através da análise detalhada dos resultados obtidos neste estudo pode-se concluir que em todos os corpos de prova ocorreu a alteração da microestrutura de ferrítico-perlítica para martensítica após o rápido resfriamento em água do aço SAE 1045, independente do diâmetro do corpo de prova, e ocorrendo em quantidade semelhante tanto no diâmetro de 9,53 mm quanto no igual a 12,7 mm. Mesmo assim houve uma maior distorção longitudinal dos corpos de prova com menor diâmetro, à medida que nestes, a transformação de fase para martensita foi total, e como visto a transformação para martensita ocasiona uma deformação volumétrica do aço ocasionando a distorção final da amostra. Nos corpos de prova com maior diâmetro, a possibilidade de presença de austenita retida pode explicar a significativa menor deformação e sutil menor dureza medida.

As medidas de dureza coletadas, por se manterem muito próximas para os dois diâmetros, acabaram sendo inconclusivas para a análise da distorção das amostras, assim como a análise microestrutural, que se manteve semelhante nos dois diâmetros, dependendo de outras análises mais aprofundadas para serem conclusivas.

Os corpos de prova apresentaram aumento em seu comprimento final em relação às amostras sem tratamento térmico devido à própria transformação de fase microestrutural para martensita e também apresentaram um significativo aumento de dureza tanto nas amostras embutidas quanto nas medições coletadas na face externa plana no seu sentido longitudinal. Apesar do aumento de dureza em relação ao aço sem tratamento, não foi possível identificar grandes variações da dureza ao decorrer das amostras embutidas, sendo que esta se manteve dentro do desvio padrão das medições coletadas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Quero agradecer aos meus pais, Sergio e Alzira, pelos ensinamentos, carinho e pelo apoio incondicional de sempre e principalmente durante o curso de engenharia mecânica, ao meu irmão Henrique por ser um grande amigo me apoiando em todos os momentos desta etapa e a minha professora Daniela pelos conselhos, ensinamentos e paciência durante este trabalho.

## 7. REFERÊNCIAS

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

COLPEART, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4. Ed. São Paulo, SP, Ed. Edgard McGraw-Hill, 2008.

COSTA E SILVA, A. L.; MEI, P. R.. Aços e Ligas Especiais. 2 ed. Sumaré, 2010.

KRAUSS, G. S. (1994) Heat treatment and processing principles. Ohio: ASM International.

NESLUŠAN, M. ET AL. Deformations After Heat Treatment And Their Influence On Cutting Process. Technical Gazette. 2011.

NOVIKOV, I. Teoria Dos Tratamentos Térmicos dos Metais. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1994.

NUNES, R. M. Estudo De Distorção De Barras Cilíndricas de Aço ABNTt 1045 em uma Rota De Fabricação Envolvendo Trefilação Combinada e Têmpera por Indução. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

VAN VLACK, L. H. Princípios de ciência e tecnologia dos materiais. 2 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1988.

VIEIRA, E. R.; BIEHL, L. V.; MEDEIROS, J. L. B.; COSTA, V. M.; MACEDO, R. J. “Evaluation of the characteristics of an AISI 1045 steel quenched in different concentration of polymer solutions of polyvinylpyrrolidone”, Scientific Reports, v. 11, pp. 1313-1321, 2021.

## INFLUENCE OF DIAMETER ON GEOMETRIC DISTORTION OF SAE 1045 STEEL AFTER QUENCHING HEAT TREATMENT

Vitor Bettiato Zattera, [vitor.bz@live.com](mailto:vitor.bz@live.com)<sup>1</sup>

Daniela Lupinacci Villanova, [daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha - RS<sup>1</sup>

### **Resumo:**

*Mechanical components such as shafts and pins often require hardness levels higher than those guaranteed by the steel used to withstand efforts and heavy workloads. One way to ensure this condition is through the use of heat treatments such as quenching, which is the primary option as it provides the manufactured component with a significant increase in hardness, wear resistance, and other mechanical properties. However, when not well calculated, the various variables present during the heat treatment process can lead to undesired situations for the manufacturer, such as geometric distortions along the part, often rendering it unsuitable for use in the intended project or machine. Therefore, this study aimed to analyze the effect that the variation in the diameter of a cylindrical bar made of SAE 1045 steel can have on possible distortions resulting from the quenching process. This steel was chosen due to its balanced mechanical properties, including good mechanical strength, weldability, machinability, proving to be versatile and widely used in mechanical construction. For this analysis, two diameters were selected, namely 9.53 mm and 12.7 mm, both subjected to water quenching. Distortions were measured using equipment such as a dial gauge and caliper. The samples also underwent metallographic analysis for microstructural evaluation and hardness tests. All these checks were performed before and after the heat treatment for comparison purposes. The results showed that the test specimens exhibited distortions, with more significant distortions occurring in the middle of the bar. Additionally, the degree of distortion was higher for the smaller diameter bar. Microstructure and hardness analyses were similar between the two diameters. It is assumed that this variation in distortion is due to the presence of a greater amount of martensite in the microstructure of the samples with a smaller diameter, as the cooling in these samples would occur more rapidly and uniformly.*

**Keywords:** quenching, SAE 1045, distortion, diameter.