

ESTUDO COMPARATIVO DA TÊMPERA E AUSTÊMPERA NO AÇO USANDO FERRAMENTAS DA QUALIDADE

COMPARATIVE STUDY OF TEMPERING AND AUSTEMPERING IN STEEL USING QUALITY TOOLS

ESTUDIO COMPARATIVO DEL TEMPLE Y AUSTEMPLE EN EL ACERO UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE LA CALIDAD

Franciele de Oliveira¹
Edvaldo Luiz Rando Junior²

Resumo

Este artigo apresenta um estudo de caso sobre o aço SAE 4340, amplamente utilizado em aplicações que exigem alta resistência mecânica e tenacidade. O foco da pesquisa é a análise comparativa entre dois tratamentos térmicos amplamente aplicados: têmpera e austêmpera. A partir de ensaios de dureza, resistência mecânica e observações microestruturais, busca-se identificar as vantagens e limitações de cada processo, fornecendo dados objetivos sobre o desempenho final do material tratado. Paralelamente, o estudo propõe a aplicação prática de Ferramentas da Qualidade – diagrama de Ishikawa, folha de verificação, fluxograma e 5W2H como metodologia de apoio à análise e interpretação dos dados experimentais. O objetivo principal é demonstrar como as ferramentas da qualidade podem ser aplicadas também no contexto acadêmico. Como objetivos específicos temos a aplicação prática das ferramentas citadas e a análise de seus resultados. A integração dessas ferramentas permitiu uma abordagem mais sistemática, auxiliando na identificação de variáveis críticas, no controle do processo e na confiabilidade dos resultados. Os resultados obtidos reforçam a importância da gestão da qualidade como aliada em processos metalúrgicos, ampliando o entendimento técnico e estratégico sobre tratamentos térmicos.

Palavras-chave: têmpera; austêmpera; ferramentas da qualidade; tratamento térmico; aço SAE 4340.

Abstract

This article presents a case study on SAE 4340 steel, widely used in applications requiring high mechanical strength and toughness. The research focuses on a comparative analysis between two commonly applied heat treatments: quenching and austempering. Based on hardness tests, mechanical strength evaluations, and microstructural observations, the study aims to identify the advantages and limitations of each process, providing objective data on the material's final performance. In parallel, the study proposes the practical application of the Seven Quality Tools — Ishikawa diagram, check sheet, histogram, Pareto chart, scatter diagram, flowchart, and control chart — as a methodological framework to support the analysis and interpretation of experimental data. The integration of these tools allowed a more systematic approach, aiding in the identification of critical variables, process control, and the reliability of results. The findings reinforce the importance of quality management as an ally in metallurgical processes, expanding both the technical and strategic understanding of heat treatments.

Keywords: tempering; austempering; quality tools; heat treatment; SAE 4340 steel.

Resumen

Este artículo presenta un estudio de caso sobre el acero SAE 4340, ampliamente utilizado en aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica y tenacidad. El enfoque de la investigación es el análisis comparativo entre dos tratamientos térmicos ampliamente aplicados: temple y austemple. A partir de ensayos de dureza, resistencia mecánica y observaciones microestructurales, se busca identificar las ventajas y limitaciones de cada proceso, proporcionando datos objetivos sobre el desempeño final del material tratado. Paralelamente, el estudio propone la aplicación práctica de Herramientas de la Calidad – diagrama de Ishikawa, hoja de verificación, flujograma y 5W2H – como metodología de apoyo al análisis e interpretación de los datos experimentales. El objetivo principal

¹ Aluna do Curso de Gestão da Qualidade – UNINTER

² Professor II do Centro Universitário Internacional UNINTER

es demostrar cómo las herramientas de la calidad pueden aplicarse también en el contexto académico. Como objetivos específicos se tienen la aplicación práctica de las herramientas mencionadas y el análisis de sus resultados. La integración de estas herramientas permitió un enfoque más sistemático, ayudando en la identificación de variables críticas, en el control del proceso y en la confiabilidad de los resultados. Los resultados obtenidos refuerzan la importancia de la gestión de la calidad como aliada en los procesos metalúrgicos, ampliando la comprensión técnica y estratégica sobre los tratamientos térmicos.

Palabras clave: temple; austemple; herramientas de calidad; tratamiento térmico; acero SAE 4340.

1 Introdução

Este artigo apresenta os dados obtidos a partir de um trabalho acadêmico realizado na disciplina de Práticas Metalúrgicas 1 do curso de Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Caxias do Sul. O trabalho, com ênfase em extensão, consistiu em aplicar dois tratamentos térmicos em doze (12) corpos de prova padrão de aço SAE 4340, sendo seis (6) submetidos ao tratamento térmico de têmpera e seis (6) ao de austêmpera em parceria com uma empresa privada. Após os tratamentos, os corpos de prova foram avaliados por meio de ensaios mecânicos de dureza e impacto, além de análise metalográfica com o objetivo de comparar as propriedades resultantes de cada tratamento. A partir dessa análise, foi discutido qual o tratamento se mostra mais vantajoso tanto para a empresa quanto para os clientes, considerando a aplicação final das peças e os custos envolvidos.

Entre os processos de tratamento térmico aplicáveis, daremos enfoque à têmpera, que consiste no aquecimento do material a uma temperatura elevada seguido de resfriamento rápido em meio líquido para a obtenção da martensita, e à austêmpera, que substitui o resfriamento brusco por uma etapa isotérmica em temperatura intermediária, buscando uma microestrutura bainítica mais uniforme e menos suscetível à deformação e trincas. A escolha entre esses processos influencia diretamente nas propriedades mecânicas e no desempenho final do material em serviço.

A aplicação das Ferramentas da Qualidade, geralmente utilizadas na gestão industrial para o controle de processos e melhoria contínua, mostra-se uma abordagem inovadora no contexto experimental. A integração dessas ferramentas na análise de tratamentos térmicos permite sistematizar a coleta de dados, identificar variáveis críticas, reduzir a variabilidade e aumentando assim a confiabilidade dos resultados da pesquisa. O presente trabalho propõe um estudo de caso que, aliando a investigação metalúrgica e ferramentas consolidadas de controle de qualidade, promove uma análise comparativa completa entre os processos de têmpera e austêmpera.

A metodologia deste trabalho consiste em uma revisão bibliográfica acerca do aço SAE 4340, do processo de têmpera e austêmpera, das ferramentas da qualidade e suas aplicações durante o processo prático e experimental.

2 Fundamentação teórica

2.1 Aço SAE 4340 e tratamentos térmicos

O aço SAE 4340 é um aço que possui composição química contendo níquel, cromo e molibdênio, classificado como de baixa liga. Essa combinação de elementos confere a este aço excelente temperabilidade, boa usinagem e elevada resistência mecânica após tratamento térmico. Essas características o tornam o material ideal na produção de eixos, engrenagens e demais componentes de máquinas que exijam alta resistência mecânica. Na tabela 1 pode-se observar as propriedades mecânicas típicas após tratamento térmico do Aço SAE 4340.

Tabela 1: propriedades aço SAE 4340 após tratamento térmico

Propriedade	Valor após TT
Dureza (HRC)	até 55 HRC
Resistência à tração	até 1550 MPa
Limite de escoamento	até 1300 MPa
Alongamento	10–16%
Tenacidade (Charpy)	20–40 J (dependendo do revenido)

Fonte: elaborada pela autora (2025).

Conforme Callister (2002, p. 229), “os procedimentos convencionais de tratamento térmico para produção de aços martensíticos envolvem normalmente o resfriamento rápido e contínuo de uma amostra austenitizada em algum tipo de meio de resfriamento, tal como a água, o óleo ou o ar”. As propriedades de um aço que foi submetido a um processo de têmpera e depois de revenimento, podem ser obtidas somente se durante o tratamento térmico por têmpera, a amostra tiver sido convertida para conter um elevado teor de martensita. No caso da austêmpera, a amostra é aquecida também até a austenitização (aproximadamente 870°C) e, ao invés de ser resfriada bruscamente, ela é mantida em meio líquido até uma temperatura superior à da formação martensítica, visando a formação da bainita, que é uma microestrutura mais tenaz e com menor dureza e, conseqüentemente, menos frágil. Ao contrário da têmpera, a austêmpera não exige a etapa de revenimento, sendo assim um processo mais barato e que envolve menos etapas que a têmpera.

É de conhecimento que durante o tratamento de têmpera e austêmpera é impossível resfriar a amostra a uma taxa uniforme ao longo de toda sua extensão; regiões de superfície sempre resfriam primeiro, o que justifica a variação nas microestruturas e propriedades em função da posição da seção transversal da amostra.

O sucesso de um tratamento térmico de aços para produzir predominantemente martensita e bainita dependerá de três fatores principais: composição da liga, do tipo e natureza do meio de resfriamento e do tamanho e da forma da amostra. Para o presente estudo foram aplicados os tratamentos de têmpera e austêmpera em banho de sais, cuja composição era de: 50% Cloreto de Sódio, 40% Cloreto de Bário e 10% Cianeto de Sódio em água.

Tendo em vista que o meio de aquecimento influencia consideravelmente no tempo do tratamento térmico de têmpera, o banho de sais fundidos se mostra uma opção bastante eficiente uma vez que os sais do banho otimizam a troca de calor entre o banho e as peças, permitindo se obter uma microestrutura mais homogênea nas amostras tratadas em menor tempo.

2.2 Ferramentas da qualidade

As Ferramentas da Qualidade foram popularizadas no Japão a partir dos estudos de Kaoru Ishikawa e são amplamente utilizadas na gestão da qualidade para análise, controle e solução de problemas em processos produtivos.

Cada ferramenta possui aplicação específica no contexto de controle da qualidade: o Diagrama de Ishikawa permite identificar, categorizar e analisar causas potenciais de um problema; a Folha de Verificação é usada para coleta de dados de maneira padronizada e confiável; o Histograma analisa a distribuição dos dados medidos; o Diagrama de Pareto prioriza causas por frequência ou impacto; o Diagrama de Dispersão avalia correlações entre variáveis; o Fluxograma representa graficamente as etapas de um processo; a Carta de Controle monitora variações ao longo do tempo, permitindo a detecção de desvios fora dos limites estatísticos. Embora, originalmente, desenvolvidas para processos industriais e administrativos, essas ferramentas têm sido cada vez mais aplicadas em contextos técnicos e científicos, contribuindo para uma análise mais estruturada e eficiente de dados experimentais.

Além das ferramentas citadas, ainda contamos com ferramentas auxiliares como o 5W2H para a elaboração de planos de ação e controle de execução das etapas de um processo. Na sequência, serão abordadas as ferramentas escolhidas para a aplicação neste estudo.

2.2.1 Diagrama de Ishikawa

Também conhecido como Diagrama de Causa-Efeito ou espinha de peixe, esta ferramenta foi criada por Ishikawa e pretende mostrar a relação entre uma característica da qualidade e seus diversos fatores determinantes (Seleme; Stadler, 2013, p. 91).

A construção do diagrama pode ser ajustada às necessidades de cada empresa ou organização e tem como base a análise representada pelos 6 Ms, conforme figura 1. Os 6 Ms são os aspectos que caracterizam as causas ou as ações que produzem os efeitos.

Figura 1: Exemplo de Diagrama de Ishikawa



Fonte: <https://www.siteware.com.br/blog/metodologias/diagrama-de-ishikawa/> (2025).

2.2.2 Folha de verificação

A folha de verificação é uma ferramenta de obtenção e coleta de dados. Conforme Seleme e Stadler (2013), “as folhas de verificação são documentos para registrar as anotações, o que é feito de forma ordenada e já direcionada para o problema ou situação que queremos resolver”. Ou seja, é uma ferramenta que podemos utilizar em diversas situações e áreas como por exemplo: para a distribuição do processo de produção, para item defeituoso e para registro de reclamações de clientes.

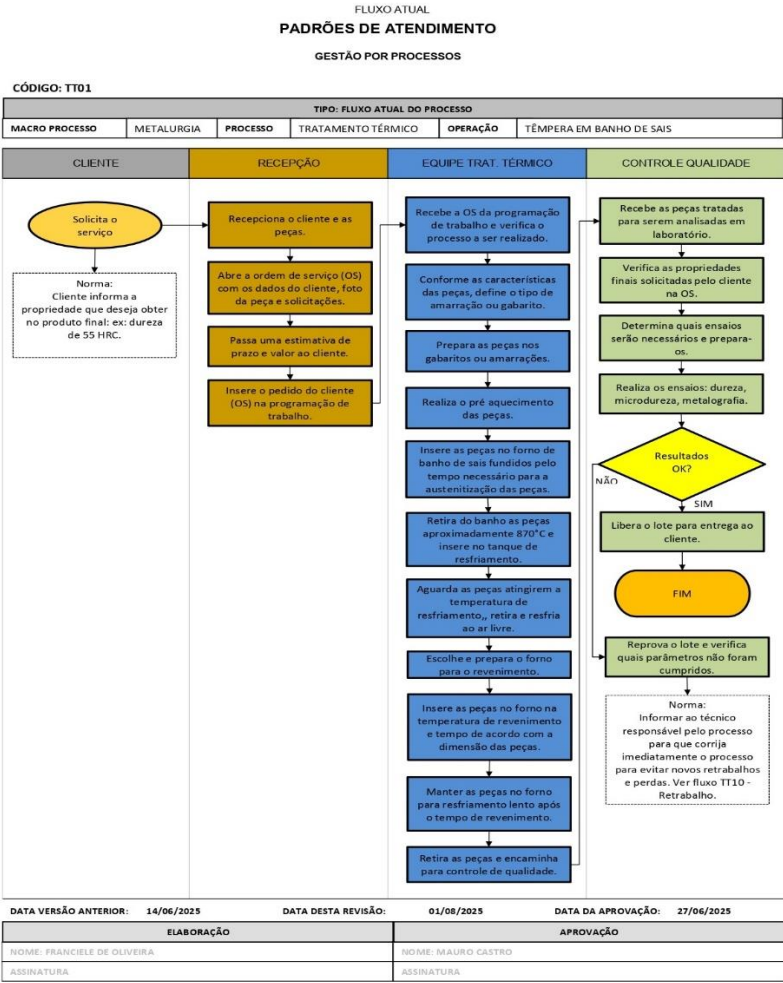
As informações das folhas de verificação podem servir de base para outras ferramentas como o histograma e confecção da curva representativa do processo. Sua utilização é bastante simples pois o operador somente precisa registrar as ocorrências conforme vão se apresentando.

A folha de verificação se mostra uma poderosa ferramenta para a análise de processos e a melhoria da qualidade pois permite identificar defeitos e variações possibilitando a execução de ações efetivas e focadas no problema.

2.2.3 Fluxograma

É uma ferramenta desenvolvida para “desenhar o fluxo” de processos, por meio de formas e pequenos detalhes. Trata-se de uma representação visual do processo e permite identificar nele possíveis pontos nos quais podem ocorrer problemas. (Seleme; Stadler, 2013, p. 45).

Figura 2: Fluxograma do processo de tratamento térmico



Fonte: elaborado pela autora (2025).

O fluxograma apresenta símbolos padronizados que facilitam a representação dos processos. Na figura 2 pode-se observar o fluxograma aplicado aos processos de tratamento térmico deste trabalho. Conforme o padrão, as atividades são dispostas de cima para baixo e, nesse caso em específico, dispostas nas colunas de acordo com a função responsável pela execução da atividade.

Os principais objetivos do fluxograma são: padronizar a representação dos processos e procedimentos, fornecer maior rapidez na descrição de métodos, facilitar a leitura e o entendimento, facilitar a localização da informação e identificar os aspectos mais importantes

do processo. A representação visual do processo permite ao gestor uma melhoria no grau de análise, facilitando a localização de possíveis falhas na execução das atividades e a melhoria contínua do processo.

2.2.4 5W2H

Conforme Marshall Jr *et al.*, (2010, p.114) “a ferramenta 5W2H é utilizada principalmente no mapeamento e padronização de processos, na elaboração de planos de ação e no estabelecimento de procedimentos associados a indicadores”.

É de cunho gerencial e busca o fácil entendimento por meio da definição de responsabilidade, métodos, prazos, objetivos e recursos associados.

A ferramenta 5W2H (figura 3) traduz a utilização de perguntas que se iniciam com as letras W e H (na língua inglesa) com o objetivo de gerar respostas que esclareçam o problema a ser resolvido ou que organizem as ideias e/ou etapas na resolução de problemas (Seleme; Stadler, 2013, p. 42.).

Figura 3: Exemplo de 5W2H e suas definições

5W					2H		STATUS
WHAT (O QUE)	WHY (POR QUE)	WHERE (ONDE)	WHO (QUEM)	WHEN (QUANDO)	HOW (COMO)	HOW MUCH (QUANTO CUSTA)	
O QUE SERÁ FEITO? QUAL É O SEU OBJETIVO? COMO DESCREVER O MELHOR QUE PODE OBTER NESTA SITUAÇÃO?	POR QUE SERÁ FEITO? QUAL É A RAZÃO QUE MOTIVA ESSA AÇÃO? O QUE VAI CONSEGUIR DE RETORNO? FAZ PARTE DE SUA MISSÃO? VALE A PENA?	ONDE SERÁ FEITO?	POR QUEM SERÁ FEITO? QUEM ESTÁ ENVOLVIDO OU É RESPONSÁVEL EM CADA AÇÃO? QUEM DEVE SER AVISADO?	QUANDO SERÁ FEITO? QUAIS SÃO AS PRIMEIRAS AÇÕES NECESSÁRIAS? ESSAS AÇÕES SÃO PROATIVAS OU DEPENDEM DE OUTRAS FORA DO SEU CONTROLE?	COMO SERÁ FEITO? COMO INICIAR, MENSURAR E ATIVAR AS AÇÕES NECESSÁRIAS? QUAIS SÃO AS SOLUÇÕES DE CONTINGÊNCIA, NO CASO DE ENCONTRAR OBSTÁCULOS? O QUE SINALIZARÁ QUE É O MOMENTO DE AGIR ASSIM?	QUANTO CUSTARÁ FAZER? QUANTO CUSTARÁ EM TEMPO, ESFORÇO, DINHEIRO, CONHECIMENTO, PREPARAÇÃO PSICOLÓGICA E NEGOCIAÇÃO OU MOTIVAÇÃO PESSOAL E DE GRUPO?	

Fonte: <https://www.sebrae-sc.com.br/blog/5w2h-o-que-e-para-que-serve-e-por-que-usar-na-sua-empresa> (2025)

Originariamente, havia somente 5Ws e 1H. O segundo H foi acrescentado posteriormente para fundamentar financeiramente as decisões tomadas, transformando então a ferramenta em 5Ws e 2Hs.

3 Tratamentos térmicos e ferramentas da qualidade

Inicialmente para a organização do trabalho projeto junto a empresa, realizou-se a abertura de um plano de ação no formato 5W1H (pois os custos envolvidos nas ações seriam irrelevantes para os fins deste trabalho). Nesse plano de ação foram inseridas todas as tarefas e ações que seriam necessárias para a realização da entrega exigida, assim como determinados os

prazos para tais ações. Parte do plano pode ser conferida no apêndice 1. A aplicação desta ferramenta foi de grande valia para demonstrar graficamente a passagem dos dias e semanas e a necessidade de se realizar cada tarefa em seu prazo. Como se tratava de tarefas correlatas e interdependentes, o atraso em uma delas corresponderia ao atraso em quase todas as demais, sendo assim, a pontualidade um item indispensável.

Além das questões temporais, o 5W1H nos permitiu visualizar as tarefas já realizadas, que foram sinalizadas em verde, as em andamento, que foram sinalizadas em amarelo e laranja, e as em aberto, que foram sinalizadas em vermelho. Esta diferenciação por cores nos status das tarefas nos facilitou visualizar rapidamente as tarefas em aberto que sempre se tratou como prioridades dentro do trabalho, visando não extrapolar os prazos. Ferramentas visuais são extremamente úteis para compreensão e para o acompanhamento das tarefas. No apêndice 1 pode-se conferir o 5W1H originado na reunião inicial.

O processo de têmpera e austêmpera foi realizado no dia 2 de junho de 2025, nas instalações da empresa Termo Aço, empresa do ramo metalúrgico em Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. Na ocasião, os grupos de estudantes do curso de Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS) — Campus Caxias do Sul, acompanhados pelo responsável técnico e proprietário da empresa — puderam acompanhar integralmente a execução dos processos de têmpera e austêmpera, conduzidos por um funcionário da empresa.

Os corpos de prova (CPs), que também chamaremos de amostras, previamente usinados pelos técnicos do laboratório do IFRS, Campus Caxias do Sul, foram levados até a Termo Aço para a execução dos tratamentos. Cada grupo levou três corpos de prova padronizados para ensaio de tração (norma ASTM E8/E8M) e outros três para o ensaio Charpy (ASTM E23) conforme nos mostra a imagem 1.

Imagem 1: Corpos de prova amarrados para tratamento térmico



Fonte: a autora (2025).

Como o banho de sais fundidos ocorre a aproximadamente 890 °C, foi realizado um pré-aquecimento nas amostras, com o objetivo de reduzir o choque térmico e evitar acidentes ou danos estruturais. Após o pré-aquecimento, as amostras foram mergulhadas por 15 minutos, tempo determinado pela espessura do corpo de prova, no forno de sais fundidos (imagem 2)

que estava a 897 °C em uma composição de: 50% Cloreto de Sódio, 40% Cloreto de Bário e 10% Cianeto de Sódio.

Decorrido o tempo mencionado de forno de sais fundidos, as amostras foram transferidas para o tanque de resfriamento que é mantido a 160 °C com agitação mecânica. Como a têmpera é um processo adifusional, o tempo de permanência no tanque não influencia diretamente, portanto, assim que a temperatura desejada é atingida, a peça pode ser retirada. Nesse caso, as amostras foram mantidas por 3 minutos no tanque e posteriormente finalizaram o resfriamento ao ar.

Para concluir o tratamento térmico de têmpera, as peças passaram por um processo de revenimento (processo aplicado para alívio de tensões residuais no material) em forno de indução, realizado a uma temperatura de 330 °C, durante 2 horas na temperatura indicada e 3 horas se contabilizado o tempo de aquecimento e resfriamento até a temperatura ambiente.

No processo de austêmpera, as amostras foram retiradas do forno de banho de sais após 15 minutos e colocadas em um forno de resfriamento com temperatura de 230 °C por 15 minutos. Este processo depende da difusão, então o tempo em cada temperatura específica influencia diretamente na qualidade do produto.

Com as amostras tratadas partiu-se para a etapa de análises: iniciou-se com o Ensaio de Dureza Rockwell C (HRC) que é um método de teste de dureza que utiliza um penetrador de diamante em forma de cone e uma carga total de 150 kg para avaliar a resistência de materiais duros como aço temperado. O resultado é um número adimensional que representa a profundidade da indentação, sendo que valores mais altos indicam maior dureza.

O ensaio de dureza neste estudo foi realizado no laboratório da empresa Termo Aço. O equipamento utilizado foi um durômetro de bancada Pantec RB analógico com penetrador de diamante 120°, carga de 150 kg e pré-carga de 10kg.

Na sequência, seriam realizados ensaios de tração dos corpos de prova tratados, porém, devido à alta resistência mecânica obtida após tratamento, não foi possível a realização do ensaio no campus devido a limitação da máquina universal de ensaios disponível. Sendo assim, a resistência à tração foi deduzida por meio de cálculo matemático utilizando-se a dureza como referência por meio da seguinte fórmula: $\sigma \approx 3,45 \times \text{HRC}$. Por esse motivo esta tarefa está com status incompleto em nosso plano de ação.

O ensaio de tração pode ser usado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais. Ele consiste na deformação de uma amostra, geralmente até a sua fratura, mediante uma carga de tração gradativamente crescente que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo mais comprido do corpo de prova. É um ensaio do tipo destrutivo pois a amostra deforma-se e

rompe de forma permanente. A máquina registra os dados, que são tratados e geram uma curva característica denominada tensão-deformação.

Para a caracterização do material termicamente tratado, optou-se por realizar uma análise da microestrutura do metal. Por tratar-se de uma análise de ordem microscópica, fez-se necessária a aplicação de técnica metalográfica.

“Normalmente, preparos de superfície cuidadosos e meticulosos são necessários para revelar os detalhes importantes da microestrutura. A superfície da amostra deve ser primeiro lixada e polida até atingir um acabamento liso e espelhado. Isso é conseguido utilizando-se papeis e pós abrasivos sucessivamente mais finos. A microestrutura é revelada mediante aplicação de um tratamento de superfície que usa um reagente químico apropriado em um procedimento chamado ataque químico” (Callister, 2002, p. 56).

A orientação dos grãos, que varia na amostra, irá refletir de maneira diferente à luz do microscópio ótico revelando assim os grãos presentes na amostra que reagiram ao ataque químico, uma vez que os átomos nos contornos de grão são mais reativos que os demais.

Para a realização da metalografia da amostra, utilizou-se o laboratório de Metalografia e Microscopia do IFRS - Campus Caxias do Sul. Essa etapa do trabalho teve início com o corte de um dos corpos de prova de tração tratado, que foi obtida uma amostra com formato semelhante ao de uma moeda. Em seguida, a amostra foi embutida em resina, lixada com lixas de diferentes granulometrias e polida com alumina até a obtenção de uma superfície espelhada. Após o polimento, foi realizado o ataque químico com solução de nital 4%, reagente adequado para a revelação da microestrutura do aço e obtenção de imagens.

Para os ensaios Charpy padronizados pela norma ASTM 23 utilizou-se o laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Também chamada de tenacidade ao entalhe, a técnica consiste em uma barra com seção quadrada que é usinado um entalhe em V e aplicado uma carga de impacto instantâneo de um martelo de um pêndulo balanceado. Este é liberado de uma altura fixa e a amostra fica na base. Com a liberação, a aresta em forma de faca montada sobre o pêndulo atinge e fratura o corpo de prova exatamente no entalhe que atua como um concentrador de tensões. A altura atingida pelo pêndulo irá determinar a energia absorvida pelo impacto da seguinte forma: altura inicial e altura final.

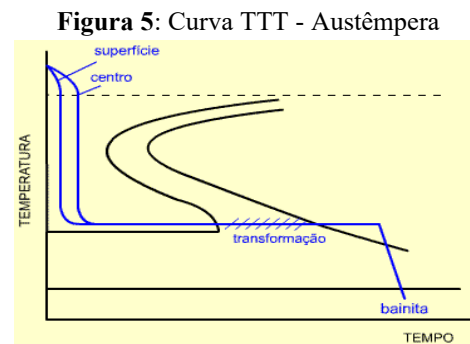
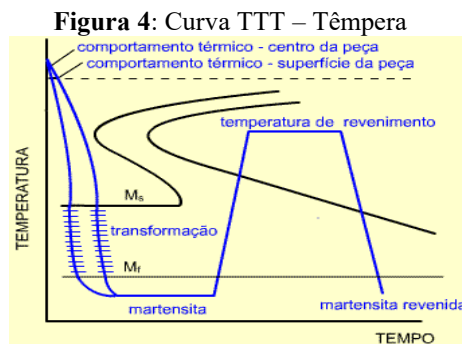
Os resultados desse ensaio, também destrutivo, são de natureza mais qualitativa e de uso mais restrito quando os objetivos são de projeto. Uma das principais funções deste ensaio é determinar se um material experimenta ou não uma transição dútil-frágil com a diminuição da temperatura. Por esse motivo, também é levada em conta a temperatura em que se está realizando o ensaio. O ensaio foi realizado com temperatura de 21°C.

Os resultados dos ensaios e análises foram coletados e inseridos em uma folha de verificação construída para a centralização dos dados e melhor compreensão deles. A folha de verificação utilizada pelo grupo pode ser verificada no apêndice 2.

Por meio da visita e acompanhamento da realização dos tratamentos térmicos, pode-se aplicar a ferramenta de fluxograma, conforme apêndice 3 exemplifica.

4 Resultados e discussão

É de conhecimento na metalurgia que elementos de liga alteram a curva TTT, transformação tempo-temperatura (figuras 4 e 5), de modo que facilite ou dificulte os tratamentos térmicos.








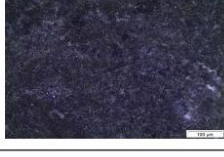
Fonte: [https://tecfar.com.br/sais-para-resfriamento/\(2025\)](https://tecfar.com.br/sais-para-resfriamento/(2025))

Conforme já citado, o aço SAE 4340 é considerado ideal para projetos que exijam tratamentos térmicos pois como se pode observar nas figuras 3 e 4, sua curva é deslocada para a direita devido a adição de elementos de liga, ou seja, existe uma faixa tempo disponível para a realização de tratamentos térmicos.

Para a demonstração dos resultados utilizaremos a folha de verificação preenchida com os dados obtidos conforme figura 6.

Cada tratamento conferiu às peças um nível diferente de dureza e tenacidade, sendo uma importante combinação a ser analisada para a aplicação da peça ou conjunto mecânico. Os resultados do ensaio de dureza podem ser conferidos na 2ª coluna da figura 6. A têmpera obtém uma dureza maior, porém com mais fragilidade. Já a austêmpera confere ao material uma dureza significativa, mas com maior tenacidade, o que torna a peça menos suscetível ao rompimento frágil.

Figura 6: Folha de verificação com dados obtidos nos ensaios

<div>  <div> INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA Rio Grande do Sul </div> </div> <div> Folha de verificação GRUPO 4 - Tratamentos Térmicos Têmpera/Austêmpera em Banho de Sal </div> <div>  </div>					
Nº CP	ENSAIO DE DUREZA Dureza em Rockwell C (HRC)	ENSAIO DE TRAÇÃO Tensão em Mega Pascal (Mpa)	ENSAIO CHARPY Tenacidade em Joules (J)	METALOGRAFIA TÊMPERA Imagens do Microscópio	OBSERVAÇÕES
1 TRAÇÃO TÊMPERA	49	1658		 	
2 TRAÇÃO TÊMPERA	49	1658			
3 TRAÇÃO TÊMPERA	50	1658			
1 CHARPY TÊMPERA	50		14,71		
2 CHARPY TÊMPERA	50		14,96		
3 CHARPY TÊMPERA	51		14,71		
				METALOGRAFIA AUSTÊMPERA Imagens do Microscópio	
1 TRAÇÃO AUSTÊMPERA	45	1522		 	
2 TRAÇÃO AUSTÊMPERA	45	1522			
3 TRAÇÃO AUSTÊMPERA	45	1522			
1 CHARPY AUSTÊMPERA	44		22,56		
2 CHARPY AUSTÊMPERA	44		24,52		
3 CHARPY AUSTÊMPERA	45		23,5		

Fonte: elaborada pela autora (2025).

O ensaio de Charpy demonstrou que a tenacidade ou resistência ao impacto também diferem entre um tratamento e outro, tendo a austêmpera maior resistência neste quesito. Os resultados em joules (J) podem ser conferidos na 4ª coluna da figura 6.

Por meio do ensaio metalográfico (5ª coluna da figura 6) pode-se constatar que em ambos os tratamentos, foram encontradas as fases martensita e bainita superior conforme era o esperado para têmpera e austêmpera respectivamente.

O ensaio de tração, mesmo que não realizado, evidenciaria que os corpos de prova tratados com têmpera apresentam uma resistência à tração maior comparado aos tratados com austêmpera, mas também uma maior fragilidade no rompimento. Isso se deve ao fato de que a martensita confere essa fragilidade maior ao material. Por estimativa, por meio da dureza chegamos aos seguintes valores de resistência à tração:

$$\begin{aligned}
 &\textbf{Austêmpera:} \\
 &\sigma \approx 3,45 \times \text{HRC} \\
 &\sigma \approx 3,45 \times 45 = 155,25 \text{ kgf/mm}^2 \times 100 \text{ mm}^2 \\
 &= 15.525 \text{ kgf} \approx \textbf{1.522 MPa}
 \end{aligned}$$

Têmpera:

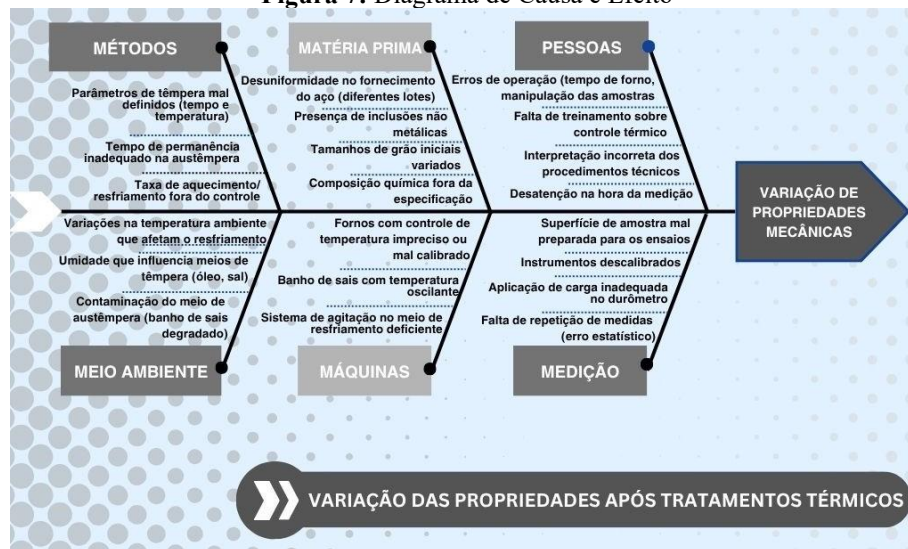
$$\sigma \approx 3,45 \times \text{HRC}$$

$$\begin{aligned}\sigma &\approx 3,45 \times 49 = 169,05 \text{ kgf/mm}^2 \times 100 \text{ mm}^2 \\ &= 16.905 \text{ kgf} \approx \mathbf{1.658 \text{ Mpa}}\end{aligned}$$

5 Considerações finais

Observou-se que alguns resultados divergem do que foi encontrado na literatura técnica. Sobre essas divergências, foram analisadas quais poderiam ser as causas utilizando-se o diagrama de Ishikawa apresentado na figura 7.

Figura 7: Diagrama de Causa e Efeito



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Ainda sobre estas divergências, pode-se considerar como causas: Empirismo da correlação HRC–MPa: a equação utilizada é baseada em dados estatísticos e oferece apenas uma estimativa da resistência à tração, podendo variar de acordo com a composição exata do aço, microestrutura resultante e condições de medição da dureza; Eficiência do tratamento térmico aplicado: o processo de têmpera em banho de sais promove uma maior uniformidade térmica e, conseqüentemente, pode gerar uma martensita mais refinada e resistente, o que eleva os valores obtidos experimentalmente; Variações metalúrgicas locais: fatores como distribuição de fases, segregações, e o grau de revenimento efetivo podem influenciar diretamente nos resultados de dureza e resistência mecânica; Imprecisões experimentais: leituras de dureza podem apresentar pequenas variações devido ao preparo da amostra, desgaste do penetrador ou interpretação do operador.

Assim, conclui-se que a diferença observada é coerente e esperada dentro do contexto de ensaios práticos em materiais tratados termicamente, especialmente quando se utiliza dureza como base para estimativa da resistência mecânica.

A análise do conjunto de resultados dos ensaios e as propriedades apresentadas pelos corpos de prova após os tratamentos térmicos demonstram que a austêmpera é uma alternativa tecnicamente viável e, em muitos casos, mais vantajosa que a têmpera, principalmente quando se busca um equilíbrio entre resistência e tenacidade. Essa evidência pode fortalecer o posicionamento da empresa diante de seus clientes e expandir a aplicação desse tratamento térmico em setores onde o comportamento ao impacto é determinante.

A aplicação de ferramentas da qualidade no contexto experimental se mostrou uma forte aliada na organização dos dados, na visualização do andamento das atividades e na análise dos resultados obtidos. Além disso, com o mapeamento do conjunto de atividades de cada tratamento térmico e, por meio da visita, pode-se observar que há vários pontos de melhoria dentro do processo e que abre a possibilidade para trabalhos futuros.

Referências

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

SELEME, R.; STADLER, H. **Controle da qualidade: as ferramentas essenciais**. Curitiba: Intersaberes, 2012.

Apêndice 1

<div>  INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA Rio Grande do Sul </div> <div> 5W1H - Plano de Ação (13/03/2025) GRUPO 4 - Tratamentos Térmicos Têmpera/Austêmpera em Banho de Sal </div> <div>  </div>							
Nº ação	Descrição da Ação (O QUE?)	Responsável (QUEM?)	Data Prevista Realização (QUANDO?)	Onde será executada a ação? (ONDE?)	Por que executar esta ação? (POR QUE?)	Como será executada? (COMO?)	Implementação da Ação
1	DEFINIÇÃO DO ASSUNTO E FORMAÇÃO DOS GRUPOS	PROFESSORES	15/03/2025	NO IIRS - CAMPUS CAXIAS DO SUL	PROFESSORES DEFINIRAM OS GRUPOS COM BASE NOS QUESTIONÁRIOS RESPONDIDOS POR CADA ALUNO	INICIALMENTE PELO ORIENTADOR ESCOLHI DO E POSTERIORMENTE POR SORTEIO PARA DESEMPATES	Ação implementada
2	PESQUISA E Mapeamento DE EMPRESAS PARCEIRAS	TODOS (ENTREGA INDIVIDUAL)	21/03/2025	ATIVIDADE REMOTA	PARA CONHECIMENTO DAS EMPRESAS DA REGIÃO E POSSÍVEIS PARCEIRAS PARA REALIZAÇÃO DO TRABALHO DA DISCIPLINA	ATRAVÉS DE PESQUISA EM SITES, IN LOCO OU LINKEDIN DAS EMPRESAS DA REGIÃO DA ÁREA METALÚRGICA COM ÊNFASE EM TRATAMENTOS TÉRMICOS	Ação implementada
3	ESCOLHA DA EMPRESA E REUNIÃO COM ORIENTADOR, PROF. FABIANO	TODOS	18/03/2025	NA SALA DO PROFESSOR ORIENTADOR	PARA DEFINIR A EMPRESA EM QUE IRÃO ATUAR EM PARCERIA E PARA DEFINIR OS PRÓXIMOS PASSOS	ATRAVÉS DO CONTATO DO PROFESSOR COM O REPRESENTANTE DA EMPRESA	Ação implementada
4	ENTREGA DO Mapeamento DA EMPRESA PARCEIRA	TODOS	27/03/2025	MOODLE	PARA FORMALIZAR E CONTEXTUALIZAR AS ATIVIDADES PRÓXIMAS	ATRAVÉS DO PREENCHIMENTO DO RELATÓRIO PADRÃO SOLICITADO	Ação implementada
5	PITCH 1 - APRESENTAÇÃO PRESENCIAL	RAFAEL (TODOS OS DEMAIS PRESENTES)	28/03/2025	NO IIRS - CAMPUS CAXIAS DO SUL	PARA CONTEXTUALIZAR AOS DEMAIS GRUPOS E COLEGAS QUAIS AS ATIVIDADES JÁ REALIZADAS E APRESENTAR AS ATIVIDADES FUTURAS	APRESENTAÇÃO PRESENCIAL COM AUXÍLIO DE DATASHOW E SLIDES	Ação implementada

Data de submissão: 19/08/2025

Data de aceite: 15/09/2025