



**Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Mecânica**

JOSÉ ROBERTO FERREIRA DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA ATRAVÉS DO
DESIGN DE EXPERIMENTO: UM ESTUDO REALIZADO EM UMA EMPRESA
METALÚRGICA**

RECIFE-PE

2024

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

JOSÉ ROBERTO FERREIRA DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA ATRAVÉS DO
DESIGN DE EXPERIMENTO: UM ESTUDO REALIZADO EM UMA EMPRESA
METALÚRGICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de engenharia mecânica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a conclusão do curso de engenharia mecânica.

Orientador(a): Carlos Augusto Nascimento Oliveira.

RECIFE-PE

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, José Roberto Ferreira da.

Otimização do tratamento térmico de têmpera através do design de experimento: Um estudo realizado em uma empresa metalúrgica / José Roberto Ferreira da Silva. - Recife, 2024.

39 : il., tab.

Orientador(a): Carlos Augusto Nascimento Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Design de experimentos. 2. Tratamento térmico. 3. Têmpera . 4. Dureza. I. Oliveira, Carlos Augusto Nascimento . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOSÉ ROBERTO FERREIRA DA SILVA

**OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA ATRAVÉS DO
DESIGN DE EXPERIMENTO: UM ESTUDO REALIZADO EM UMA EMPRESA
METALÚRGICA**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 19/12/2024.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Carlos Augusto (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Adson Beserra (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Msc. Manoel Candido (Examinador Externo)

RESUMO

O design de experimentos visa descrever e explicar a influência de determinada variação de um ou mais aspectos estudados no resultado obtido, sendo utilizado no meio científico para testagem de parâmetros de experimentos. O referido trabalho propõe-se a modelar matematicamente a variação de dureza superficial e a cinco milímetros da superfície dos aços: AISI 1045, AISI A2 e AISI D2 através do tratamento térmico de têmpera, utilizando o método de design de experimentos para verificar a influência do carbono equivalente associado a variações de: Tempo de encharque, temperatura de encharque e taxa de resfriamento. Para isso, foram estabelecidos experimentos pelo software de design de experimentos, que foram executados de acordo com o planejado, depois da preparação metalográfica, os corpos foram testados e analisados separadamente. Foi concluído que apesar do resultado indicarem que o carbono equivalente calculado se mostrou o principal fator para a dureza obtida nas ligas, as equações obtidas não demonstraram assertividade suficiente para utilização prática dos resultados. Também foi possível estabelecer relações entre a alteração das propriedades dos experimentos e a variação das durezas obtidas, através da análise dos resultados obtidos.

Palavras-chave: design de experimentos, tratamento térmico, têmpera, dureza.

ABSTRACT

Design of experiments aims to describe and explain the influence of a certain variation in one or more aspects studied on the result obtained, being used in scientific circles to test experimental parameters. This work proposes to mathematically model the variation in surface hardness and at five millimeters from the surface of the steels: AISI 1045, AISI A2 and AISI D2 through tempering heat treatment, using the experiment design method to verify the influence of equivalent carbon associated with variations in: Soaking time, soaking temperature and cooling rate. For this, experiments were established by experiment design software, which were executed according to plan. After metallographic preparation, the bodies were tested and analyzed separately. It was concluded that although the results indicated that the calculated carbon equivalent proved to be the main factor for the hardness obtained in the alloys, the equations obtained did not demonstrate sufficient assertiveness for practical use of the results. It was also possible to establish relationships between the change in the properties of the experiments and the variation in hardness obtained, through the analysis of the results obtained.

Keywords: design of experiment, heat treatment, tempering, hardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de fases do ferro-carbono.	14
Figura 2 - Diagrama de Ishikawa para a dureza obtida nos experimentos de têmpera.	17
Figura 3 - Exemplo de corpo de prova usado nos experimentos.	18
Figura 4 - Forno utilizado para os tratamentos térmicos.	20
Figura 5 - Policorte utilizado para corte transversal das peças.	21
Figura 6 - Equipamento utilizado para embutir corpos de prova cortados.	22
Figura 7 - Politriz utilizada para acabamento superficial dos corpos de provas.	22
Figura 8 - Equipamento de dureza Hv eletrônica utilizada nos ensaios de dureza.	23
Figura 9 - Medição de dureza superficial do corpo de prova de ordem 16.	24
Figura 10 - Dispersão das durezas superficiais dos corpos testados.	24
Figura 11. Dispersão das durezas a 5mm da superfície dos corpos testados.	25
Figura 12 - Dispersão das durezas encontradas para cada experimento de dureza superficial após exclusão de valores atípicos.	27
Figura 13 - Disposição dos dados encontrados para dureza superficial.	27
Figura 14 - Dispersão das durezas encontradas para cada experimento de dureza a 5mm após exclusão de valores atípicos.	29
Figura 15 - Disposição dos dados encontrados para dureza a 5mm após remoção das variáveis descartadas.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição dos aços utilizados nos experimentos.	18
Tabela 2 - Experimentos a serem realizados de acordo com o DoE utilizado.	19
Tabela 3 - Resultados dos experimentos de tratamento térmico exigidos pelo design de experimentos.	26

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 PROBLEMATIZAÇÃO	8
3 JUSTIFICATIVA	9
4 OBJETIVOS	10
4.1 Objetivos gerais	10
4.2 Objetivos específicos	10
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
5.1 Design de Experimentos	11
5.2 Tratamento térmico de têmpera	12
5.2.1 Austenitização	13
5.3 Diagrama de fases Fe-C	13
5.4 Carbono equivalente	14
5.5 Ensaio mecânico de dureza e microdureza.....	15
5.6 Tratamento de dados.....	16
6 METODOLOGIA.....	17
6.1 Seleção dos materiais	17
6.2 Design de experimentos	19
6.3 Tratamentos térmicos	20
6.4 Preparação metalográfica	21
6.5 Ensaio de microdureza.....	23
6.6 Tratamento dos dados	25
7 RESULTADOS	25
7.1 Durezas superficiais	27
7.2 Durezas a 5mm da superfície	29
8 CONCLUSÃO.....	31

1 INTRODUÇÃO

O tratamento térmico dos metais é um ramo de estudo importante e para alguns pode ser considerada uma ciência específica com vários desafios e metas. Esta ciência que envolve a transformação de características de um material através de mudanças na temperatura já está presente na vida do ser humano há mais de 3000 anos, seus primeiros registros são datados de 1000 a.C. onde foi verificado que o seu aquecimento e resfriamento concedia propriedades interessantes, desde então os conhecimentos sobre esta técnica têm sido aprimorados (METALURGIA, 2022). Diversas técnicas foram desenvolvidas, cada uma delas com seu procedimento específico, os tratamentos térmicos mais comuns em ligas ferrosas são: Recozimento, normalização, esferoidização, têmpera e revenido.

O tratamento térmico consiste numa série de operações aplicadas em diversos metais, onde os parâmetros temperatura, tempo, atmosfera e taxa de resfriamento são controlados com objetivo de transformar uma ou mais características do material, sendo essas envolvidas com as propriedades de dureza superficial, resistência mecânica, ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, propriedades de corte, resistência à corrosão e resistência ao calor. Apesar da vasta lista de propriedades que podem ser alteradas por tratamentos térmicos, normalmente a melhoria de um destes fatores implica no empobrecimento de outro fator (CAMARGO, 2012). É importante ressaltar que somente o tratamento térmico não altera a composição química destes materiais, apenas suas propriedades mecânicas, metalúrgicas e elétricas (CHIAVERINI, 1977).

O design de experimentos é o uso de ferramentas estatísticas que ajudam a prever o comportamento de um fenômeno a partir de ensaios pré-definidos. O uso dessa técnica deve ajudar a obter, por exemplo, condições ótimas de dureza para o material submetido a tratamentos térmicos. Para isso é necessário definir a técnica de design mais adequada para realizar o planejamento dos experimentos, em seguida é necessário conduzir os ensaios indicados, com os parâmetros selecionados, para posteriormente através do uso de softwares obtermos equações que devem prever as condições ótimas para cada parâmetro analisado.

Esse projeto se torna pertinente, pois o procedimento de tratamento térmico é muito usado pela indústria metal mecânica. Empresas do ramo têm a necessidade de reduzir os custos e incertezas envolvidas nas etapas de finalização das peças fabricadas. Neste

trabalho foi estudado o tratamento térmico de têmpera onde foram feitas análises de dureza superficial e a 5mm (cinco milímetros) da superfície, analisadas as suas durezas e correlacionadas com os meios de resfriamento e carbonos equivalentes dos aços propostos através do uso da metodologia de design de experimentos, onde foram obtidos dados de dureza de cada peça estudada e estas foram analisadas criticamente a fim de encontrar uma correlação plausível entre as propriedades de cada experimento. Foram obtidos dados de microdureza onde foi utilizado o método de eliminação de dados discrepantes por eliminação de valores atípicos e utilizado as médias destes resultados para desenvolver o design de experimento.

Alguns fatores influenciam no resultado de um tratamento térmico, em linhas gerais, pode-se destacar três principais pontos de grande importância em qualquer tratamento térmico, sendo estes: Aquecimento, resfriamento e tempo de permanência na temperatura de aquecimento (encharque). Os métodos de resfriamento mais utilizados são: solução aquosa, água, óleo e ar (CHIAVERINI, 2008). Entretanto, mesmo com variáveis interdependentes e correlacionadas é possível planejar e realizar experimentos que abranjam muitas variáveis simultaneamente permitindo a otimização da reação e do processo. Esta técnica é conhecida como design de experimentos, sendo assim, é possível avaliar as propriedades obtidas com as variações de condições descritas por (CHIAVERINI, 2008) um número reduzido de experimentos (TOLEDO, 2022). Dentro deste viés, a inserção do parâmetro de carbono equivalente foi questionada como de fundamental importância para o resultado de dureza a ser obtido.

Dentro deste contexto esse projeto toma forma, a partir de uma parceria entre a Universidade Federal e uma empresa do ramo metal mecânica da região que trabalha com as etapas de usinagem e tratamento térmico, para trazer soluções inovadoras para o mercado consumidor.

2 PROBLEMATIZAÇÃO

As propriedades do aço e suas aplicações já fazem parte de um conhecimento bastante difundido entre aqueles que trabalham com o material (MACHADO, 2005). No entanto, o procedimento e os ajustes finos para obtenção de características de forma padronizada ainda são desafios para as empresas que trabalham com fabricação de peças em aço. Esse tipo de segmento tem pouco incentivo comercial e intelectual para seu desenvolvimento.

Muitas indústrias metalúrgicas que realizam tratamento térmico têm interesse em melhorar o seu procedimento para obter propriedades mecânicas mais precisas. Essas empresas muitas vezes fazem parcerias com instituições de ensino, pesquisa e inovação para a realização de atividades *in loco*. O desenvolvimento gerado com essa parceria acaba enriquecendo a qualidade das atividades metalúrgicas e pode trazer redução de custo, pois levariam a processos mais ajustados e direcionados, gerando diminuição de falhas por trincas, quebras, empenamento das peças, além da obtenção de propriedades mais bem definidas. Desenvolver procedimentos metalúrgicos como os estudos neste tema levam ao desenvolvimento da empresa e até mesmo das empresas de uma região. No caso da região nordeste isso seria um fator inovador, pois as empresas metalúrgicas passariam a produzir com mais qualidade, com a possibilidade de abrir novos mercados, ampliando sua produção e trazendo geração de empregos.

A possibilidade de utilizar métodos de design de experimentos em demandas complexas e de modelamento ainda inexistente em amplo conhecimento é um grande avanço para que novos métodos sejam desenvolvidos visando o crescimento da indústria metalúrgica de pequeno e grande porte.

A necessidade de retrabalho ou mesmo descarte de alguma peça fabricada por essas empresas representa um novo gasto que pode ser reduzido ou completamente extinto com o auxílio de instruções claras sobre o processo e os passos a serem seguidos para que os resultados desejados sejam alcançados com precisão e acurácia.

3 JUSTIFICATIVA

A simplificação da ciência que envolve os tratamentos térmicos e a representação dos principais parâmetros para a execução de um procedimento bem estruturado de forma simples e intuitiva para pessoas que compõem a base de trabalho de indústrias metalúrgicas, pode não só alavancar o crescimento de várias empresas locais, como também desmistificar a área para novos candidatos, fazendo com que a indústria metal mecânica tenha mais candidatos a serem conhecedores práticos de uma atividade básica, mas essencial para o desenvolvimento do país. Além de tudo, o crescimento deste trabalho tornará as atividades mais simples, de forma que qualquer funcionário que seguir a metodologia desenvolvida para os aços estudados possa reproduzir os resultados obtidos nesse trabalho.

A partir dos resultados encontrados é esperado observar uma proporcionalidade entre a dureza obtida e os parâmetros propostos, e assim, seja possível identificar as mudanças de propriedades que o corpo obteve, documentá-las e apresentar de forma matemática os parâmetros necessários para a reprodução. Sendo assim, os resultados obtidos podem contribuir com o desenvolvimento do ramo metalúrgico, possibilitando a implementação de processos mais controlados, melhorando a qualidade dos produtos finais, bem como diminuindo o tempo de execução e custos da atividade.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivos gerais

Fazer o estudo da maximização de dureza em diferentes aços por meio do uso de técnicas de tratamento térmico de têmpera e design de experimentos.

4.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral estabelecido, foram previstos atingir os seguintes objetivos específicos:

- Fazer o estudo dos procedimentos de tratamento térmico.
- Fazer o estudo de design de experimentos.
- Planejar o design do experimento.
- Selecionar os materiais.
- Produzir os corpos de prova destinados aos experimentos.
- Realizar os procedimentos de tratamento térmico;
- Realizar ensaios metalográficos para verificar a mudança de propriedade mecânica do material;
- Obter equações que permitam prever a dureza do corpo tratado.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Design de Experimentos

O cenário mundial está em constante mudança, e dentro desta premissa percebemos a evolução na forma de produzir, pôr em prática e gerenciar a inovação. Empresas de diferentes setores da economia são induzidas a buscar alternativas em gestão de informações para gerar a inovação. A inovação tem sido meta de diferentes organizações que buscam remover barreiras que podem dificultar ou impedir ações consideradas inovadoras. A questão da inovação está sempre ligada a mudanças, novas combinações de fatores e o rompimento do equilíbrio letárgico do comum (SCHUMPETER, 1998).

Grizendi (2011), Bessant e Tidd (2009) e Tigre (2006) trazem o conceito de inovação como sendo algo novo ou melhorado, com aplicabilidade para um nível variado de pessoas, podendo trazer retorno econômico, financeiro ou social. Sabemos também que a inovação pode melhorar algo que já existe e assim atender as necessidades mais imediatas da sociedade. Dentro deste contexto, é fácil imaginar que a inovação pode vir através da reavaliação de dados. A reavaliação pode levar a melhorias em processos produtivos, organização de experimentos e mais eficiência no controle de qualidade.

Um campo de estudos que faz a análise de dados é a ciência de dados. A ciência de dados é um estudo disciplinado que envolve análise de dados, estatística, modelagem, softwares especializados e visualização prática em empresas, negócios e laboratórios. Essa área mescla técnicas para adquirir, armazenar, analisar, gerenciar e publicar dados (BAUDISCH, 2016; ANDRADE, 2018). Dentre as muitas áreas onde é possível aplicar a ciência de dados são citadas na literatura a astronomia, e-commerce, energia, entretenimento, logística, saúde, TI e produção. Na área de produção, a ciência de dados permite otimização de recursos, maior eficiência produtiva e controle de qualidade. O próprio conceito de Indústria 4.0 envolve análise de dados quando se destina a transformar os dados gerados por uma célula de manufatura avançada em informações direcionadas a facilitar a fabricação inteligente (LEE, 2015; ALVARES E MADANI, 2019).

Buscando focar no segmento de produção e já com o entendimento de que os dados estão prontamente disponíveis, podemos, no entanto, não ter dados expressivos para uma nova abordagem de mercado ou maximização de determinado processo produtivo. Assim, surgem as técnicas de design de experimentos, que permitem reduzir a quantidade de

testes e tempo na obtenção de dados mais alinhados com os novos objetivos pretendidos, acelerando atividades multidisciplinares que podem combinar descobertas, design de experimentos, gestão de produtos etc. (ANJOS, 2005).

O planejamento de experimentos é uma das técnicas que vem sendo usada em grande escala que permite a determinação das variáveis que exercem maior influência no desempenho de processos e muitas vezes, tem como resultados: redução na variação do processo com melhor concordância os valores obtidos e pretendidos, redução do tempo de processo, redução do custo operacional, melhoria de rendimento, dentre outras aplicações. (CALADO E MONTGOMERY, 2003; KARIMI *et al.*, 2010; AMORSOLO *et al.*, 1996; FIDÉLIS *et al.*, 2021).

O planejamento ou design de experimentos pode ser usado para compreender, por exemplo, o efeito da temperatura e pressão na resistência de uma ligação com cola; efeitos de parâmetros de corte como velocidade de corte e profundidade de corte na rugosidade superficial; influência de elementos como envelhecimento e ataque químico na obtenção de silicato de titânio, aplicação em processos de soldagem de reatores nucleares, entre várias outras (KARIMI *et al.*, 2010; AMORSOLO *et al.*, 1996; FIDÉLIS *et al.*, 2021; SILVA E BORGES SILVA, 2008).

O planejamento abordado neste trabalho buscou relacionar o carbono equivalente com a dureza final obtida no processo de têmpera, uma vez que este parâmetro é bastante utilizado para a determinação da soldabilidade das ligas de aço. O tempo de encharque, temperatura de encharque e a taxa de resfriamento do processo, que é inerente ao meio de resfriamento utilizado, são parâmetros já determinados como fundamentais para o processo de têmpera.

5.2 Tratamento térmico de têmpera

As propriedades obtidas ao fim do procedimento do tratamento térmico variam em função das condições termodinâmicas aplicadas, composição química da peça e a taxa de resfriamento que mais se adequa ao resultado mecânico desejado. (LIŠČIĆ, 2010).

Através de um planejamento bem elaborado e executado pode conceder diversas propriedades diferentes a peça tratada termicamente, tais como alívio de tensões internas, aumento ou diminuição da dureza superficial, melhora da usinabilidade, aumento da

resistência mecânica, melhora nas propriedades de corte, aumento na resistência ao desgaste e à corrosão, mudanças nas propriedades elétricas e magnéticas. No entanto, para todas essas mudanças o percentual de carbono e dos elementos de liga, bem como sua concentração no material é de fundamental importância para a determinação das condições da operação (CHIAVERINI, 1971).

Para a têmpera, os meios de resfriamento podem variar desde uma convecção por ar forçado até a salmoura com alta agitação, sendo a convecção o método de refrigeração mais brando e a salmoura o método mais agressivo (COLPAERT, 1974; REED-HILL, 1982).

5.2.1 Austenitização

O processo de austenitização é uma etapa inerente e preliminar para o tratamento térmico de têmpera, a transformação da microestrutura do aço de perlita e ferrita para a austenita permite uma maior dissolução de carbono e outros elementos de liga, proporcionando uma uniformização da composição. Um processo de austenitização adequado permite que os próximos passos do tratamento térmico resultem na microestrutura esperada (REED-HILL, 1982).

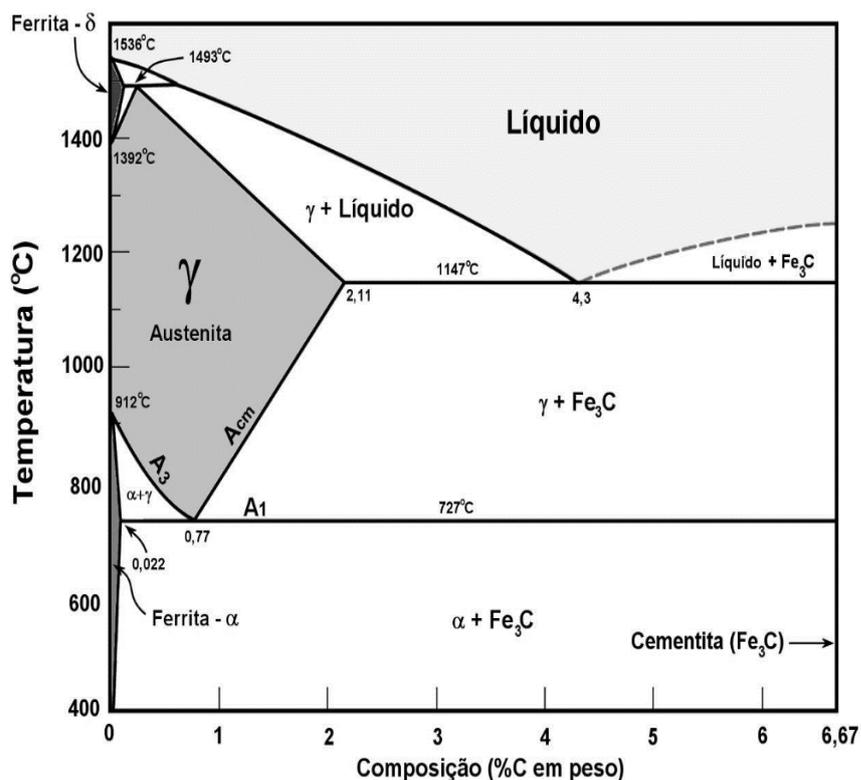
A formação da microestrutura austenítica ocorre durante o aquecimento da liga de ferro e carbono a partir de temperaturas de 727°C (setecentos e vinte e sete graus celsius), para o caso de aços eutetoides. A partir do momento em que a temperatura de austenitização seja superada, é importante garantir que haja a homogeneização da microestrutura em toda a peça. Os tipos mais utilizados de austenitização para o tratamento térmico de aços são: Austenitização isotérmica, a austenitização gradual e a austenitização por tempo e temperatura (CALLISTER, 2002).

5.3 Diagrama de fases Fe-C

O diagrama de fases do ferro-carbono nos mostra de maneira visual que fases de uma liga de Fe-C se obtém a partir de uma dada composição e temperatura, essa figura é essencial para o entendimento e determinação dos principais parâmetros para a manipulação das ligas mais comuns de aço, e não é diferente para os tratamentos térmicos. Em linhas gerais, o tratamento térmico de têmpera consiste na elevação da temperatura da liga Fe-C até a fase em que a Austenita é predominante, e em seguida resfria-se, tornando

a microestrutura em temperatura ambiente igual à presente na fase gama. Na figura 1 abaixo podemos observar um diagrama de fases para a liga de ferro e carbono.

Figura 1 - Diagrama de fases do ferro-carbono.



Fonte. Callister, 2002.

Mesmo que o diagrama represente apenas as ligações simples de ferro e carbono, ainda pode-se usar esta mesma fonte como norteadora para ligas com composição distinta, através de uma aproximação metalúrgica, conhecida como carbono equivalente.

5.4 Carbono equivalente

Elementos de liga presentes nas composições químicas das ligas de aço usadas neste trabalho são levados em consideração para cálculo do carbono equivalente para cada um dos materiais. Por isso, foi utilizada uma técnica de modelagem aplicada na indústria para determinar o chamado carbono equivalente para cada uma dessas ligas.

Esta propriedade é modelada através de diversas equações semelhantes, a empregada no estudo presente é a descrita na equação (1) mostrada abaixo, onde as

variáveis representam os componentes químicos presentes na composição da liga em porcentagem (MAIA, 2020).

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (1)$$

Através da equação (1) mostrada acima, foi determinado o valor do carbono equivalente para cada aço que será estudado.

5.5 Ensaio mecânico de dureza e microdureza

A dureza pode ser descrita como a capacidade de resistir a deformação, arranhões ou penetração de outro corpo, quanto maior for esta capacidade, maior será a dureza da região (AÇOS NOBRE, 2024).

Os ensaios de dureza são de interesse não só nas pesquisas científicas como também nas áreas de atuação técnica. Existem diversos tipos de dureza, sendo essa entendida como resistência à penetração, resistência ao corte, resistência à abrasão, resistência à deformação e ao choque (KEHL, 1963).

Segundo Souza *et al* (2009), a dureza de um material pode ser definida como a resistência que o corpo proporciona a ser penetrado por uma ponta, e pode ser um ponto a ser levado em consideração quando avaliamos a resistência ao desgaste, abrasão e a resistência mecânica do material. Enquanto isso, Callister (2002), define resistência e dureza como uma propriedade mecânica que está relacionada com a facilidade ou dificuldade de acontecer uma deformação plástica concentrada, isto é o quão difícil é marcar o material com pequenas impressões ou riscos. Neste sentido, a dureza será utilizada como um parâmetro de qualidade geral do resultado do tratamento térmico, validando se a têmpera projetada aumentou de fato a dureza superficial do material, este procedimento será realizado em todas as peças tratadas.

Em ensaios de dureza padrões de penetração, normalmente usam-se cargas de 60 kg (sessenta quilogramas) a 3000 kg (três mil quilogramas), a depender do tipo de ensaio e material, nestes ensaios o objetivo é determinar a dureza média dos grãos presentes no material, por isso utilizam-se elevadas cargas e penetradores de maiores dimensões. No entanto, ao se diminuir gradativamente a carga utilizada, a profundidade de penetração vai ser cada vez menor, e irá se atingir menos grãos do material, e, se a carga for pequena o suficiente, pode-se determinar a dureza de um único grão. A diferença básica entre um

ensaio de dureza e microdureza é que o último utiliza pequenas cargas no material estudado, sendo estas da ordem de 1kg (um quilograma) ou menos, mesmo que não haja uma definição precisa ou limites para definir exatamente as zonas de cargas relacionadas a cada um dos ensaios (VEADO, 1965). Neste sentido, vê-se a importância de realizar também o ensaio de microdureza, de forma que percebamos se o experimento propiciou uma dureza homogênea em diversos pontos da superfície da peça.

O tipo de ensaio de dureza aplicado para os experimentos deste trabalho foi o teste de dureza Vickers, bastante utilizado para testes de microdureza, há uma exigência de que a superfície do material esteja lisa e polida (AÇOS NOBRE, 2024).

5.6 Tratamento de dados

Valores atípicos são definidos como resultados muito distantes dos resultados para testes semelhantes, considerando assim, esses resultados como contaminados e excluindo-os da análise (NAVIDI, 2012).

Em alguns experimentos, amostras podem apresentar valores que são muito maiores ou menores do que os demais. Esses resultados foram considerados valores atípicos, deixando claro que se tratavam de erros de leitura devido a sua grande incongruência em relação a outros resultados de dureza para a mesma amostra foram removidos da base de dados.

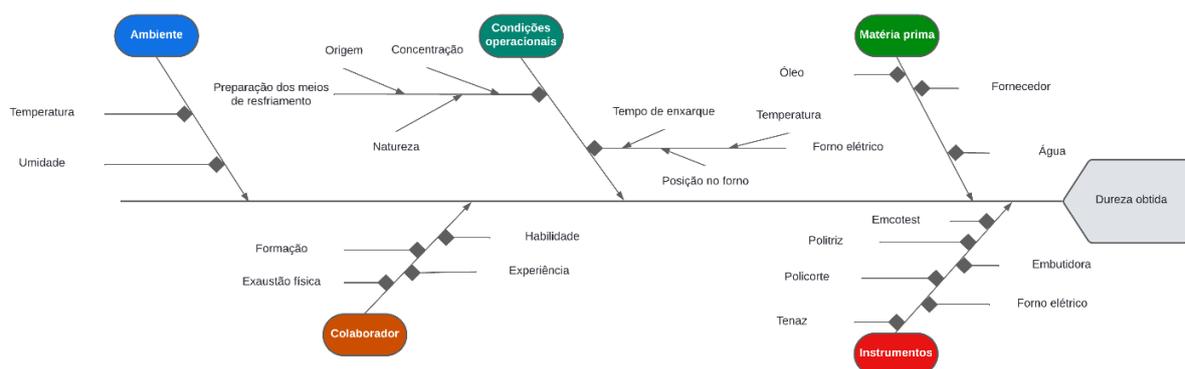
6 METODOLOGIA

Para o processo de tratamento térmico dos corpos, 4 (quatro) fatores serão controlados no decorrer dos experimentos, isto é, seus valores são estabelecidos em determinados níveis intencionalmente de acordo com o indicado pelo planejamento do design de experimentos, sendo estes:

- Tempo de encharque;
- Temperatura de encharque;
- Carbono equivalente (Tipo de aço utilizado);
- Taxa de resfriamento do corpo (Tipo de meio de resfriamento utilizado);

Além disso, outros fatores inerentes ao processo experimental como um todo podem alterar as respostas obtidas, como mostrado na figura 2 abaixo.

Figura 2 - Diagrama de Ishikawa para a dureza obtida nos experimentos de têmpera.



Fonte. Autor.

6.1 Seleção dos materiais

Os aços foram selecionados segundo as demandas da empresa parceira. Foram levados em consideração os fatores: Disponibilidade, temperabilidade, uso como material de ferramentaria e o carbono equivalente calculado. Para a realização dos experimentos, foram utilizados cubos com uma polegada de aresta para cada material selecionado. Na figura 3 abaixo, podemos verificar um dos corpos de prova.

Figura 3 - Exemplo de corpo de prova usado nos experimentos.



Fonte. Autor.

Devido a demanda do fornecedor ser baseada em três distintos materiais, sendo estes: D2, A2 e 1045. Podemos observar a composição de cada um através da tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Composição dos aços utilizados nos experimentos.

Liga Elemento	AISI 1045	AISI A2	AISI D2
C [%]	0,43 - 0,50	0,95 - 1,05	1,40 - 1,60
Mn [%]	0,95 - 1,05	0,1 - 0,6	0,1 - 0,6
Pmáx [%]	0,030	0,030	0,030
Smáx [%]	0,050	0,030	0,030
Si [%]	-	0,1 - 0,50	0,1 - 0,60
Cr [%]	-	4,75 - 5,50	11,0 - 13,0
V [%]	-	0,15 - 0,5	0,5 - 1,10
Mo [%]	-	0,90 - 1,40	0,70 - 1,20

Fonte: GERDAU, 2003.

De posse das composições, os valores de carbono equivalente de cada aço estudado foram calculados, partimos para definição das taxas de resfriamentos a serem utilizadas nos processos e que deveriam ser testadas para comprovar tais taxas. Utilizamos um recipiente de aproximadamente 10 L (dez litros) com o óleo Lubrax Hydra de norma DIN 51524 (NBR 14725-2) para utilizar e notamos que a taxa de resfriamento média encontrada entre as temperaturas de 800°C e 500°C para este meio era de 60°C/s (sessenta graus celsius por segundo). Repetimos o processo para um recipiente com o mesmo volume de água e a taxa de resfriamento encontrada foi de 120°C/s (cento e vinte graus celsius por segundo), o que nos levou a busca de um meio de resfriamento que nos proporcionasse um resfriamento de 90°C/s e este foi encontrado numa emulsão de água e óleo na proporção de 400 mL (quatrocentos mililitros) de água para 1 mL (um mililitro) de óleo.

6.2 Design de experimentos

Após a determinação de todos os materiais necessários e de posse destes, o software JMP foi alimentado com os parâmetros encontrados. Sendo assim, obtemos uma tabela com os experimentos a serem realizados e seus respectivos parâmetros de acordo com a tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Experimentos a serem realizados de acordo com o DoE utilizado.

Nº exp.	Temperatura [°C]	Tempo de encharque [min]	Aço	Taxa de resfriamento [°C/s]
1	800	60	D2	120
2	800	120	1045	120
3	800	60	D2	60
4	800	120	D2	90
5	870	90	A2	90
6	940	60	A2	120
7	940	60	1045	90
8	940	60	D2	60
9	800	120	A2	60
10	940	120	D2	60

11	940	120	1045	60
12	800	90	1045	60
13	800	60	1045	120
14	870	60	1045	60
15	940	120	1045	120
16	940	90	D2	120
17	870	120	D2	120

Fonte. Autor.

Com estas informações, deu-se início ao tratamento térmico de cada um dos corpos de prova.

6.3 Tratamentos térmicos

Com os corpos de provas fabricados pelo solicitante do trabalho a partir dos materiais selecionados e com as dimensões especificadas. Deu-se início aos tratamentos térmicos utilizando como guia a tabela 2 apresentada anteriormente. Peças foram tratadas em bateladas de até 3 (três) corpos de prova que deveriam ter a mesma temperatura de encharque, mas com tempos de encharque diferentes, reduzindo o tempo em laboratório. Na figura 4 abaixo é possível visualizar o forno localizado no laboratório de tratamentos térmicos, localizado no INTM (Instituto Nacional de Tecnologia em União e Revestimento de Materiais) nas dependências da Universidade Federal de Pernambuco.

Figura 4 - Forno utilizado para os tratamentos térmicos.



Fonte. Autor.

Depois do tempo de encharque ser atingido, as peças foram resfriadas em cada meio designado pelo procedimento de design de experimentos, os corpos de prova foram embalados e etiquetados para realização dos próximos passos.

6.4 Preparação metalográfica

Com os corpos de provas tratados termicamente, deu-se início à preparação dos cubos para realização dos testes de dureza superficial e a cinco milímetros da superfície, isto é, cada um dos cubos foi cortado transversalmente a cinco milímetros de uma das suas faces, cada parte foi embutida em baquelite, lixada e polida utilizando a politriz. Todos os equipamentos utilizados estão localizados no laboratório de preparação de amostras metalográficas localizado no INTM UFPE.

Na figura 5 abaixo podemos visualizar o equipamento onde todos os corpos de prova foram cortados a fim de obter acesso a uma região que, durante o tratamento térmico, estava a 5mm (cinco milímetros) da face do cubo. Para isso, o material foi posicionado nos fixadores presentes no equipamento, com auxílio de um paquímetro cada cubo foi posicionado de forma que uma das seções resultantes desse processo expusesse uma face que estava à cinco milímetros da superfície durante o resfriamento do corpo de prova.

Figura 5 - Policorte utilizado para corte transversal das peças.



Fonte. Autor.

Durante os experimentos e preparação das amostras, algumas apresentaram fraturas. Corpo de prova de ordem 5 (cinco) partiu-se durante o processo de corte na e os de ordem 12 (doze) e 13 (treze) apresentaram trincas visíveis durante o resfriamento do corpo de prova. Com os corpos de provas cortados, suas partes foram embutidas

separadamente, expondo a parte a ser testada com o equipamento mostrado na figura 6 a seguir também com o objetivo de facilitar o manuseio dos aços para processos posteriores.

Figura 6 - Equipamento utilizado para embutir corpos de prova cortados.



Fonte. Autor.

Finalizado o processo de embutimento metalográfico, as peças estavam temperadas e prontas para serem lixadas para posterior experimento de dureza superficial. Este processo preparativo foi realizado com o equipamento ilustrado na figura 7 a seguir, uma politriz rotativa de lixa d'água fazendo uso de lixas de granulometria crescente, sendo estas 220 (duzentos e vinte), 400 (quatrocentos), 600 (seiscentos), 800 (oitocentos) e 1200 (mil e duzentos), em seguida cada peça foi polida a fim de obter uma superfície adequada para a realização do experimento de microdureza superficial.

Figura 7 - Politriz utilizada para acabamento superficial dos corpos de provas.



Fonte. Autor.

6.5 Ensaio de microdureza

Tendo em vista que a única propriedade de interesse para o fornecedor que solicitou o trabalho era a dureza superficial e a dureza a 5mm da superfície para que estas propriedades fossem controladas e aplicadas em sua indústria, sendo estes realizados da mesma forma, mas com seções diferentes do mesmo corpo de prova. Foi utilizado o equipamento de teste automático dos corpos de prova onde 5 pontos da superfície foram testados a fim de encontrar a média de dureza da face. Na figura 8 abaixo podemos verificar o equipamento utilizado para a realização dos ensaios de dureza.

Figura 8 - Equipamento de dureza Hv eletrônica utilizada nos ensaios de dureza.



Fonte. Autor.

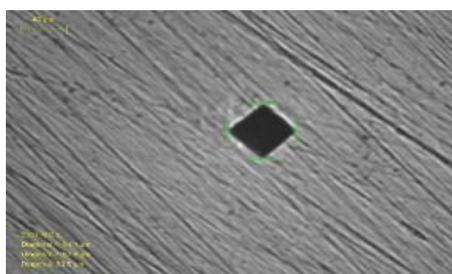
Com os corpos de prova preparados, todos foram submetidos ao experimento de dureza superficial, onde foram testados 5 (cinco) pontos de cada corpo de prova de forma a obter a dureza média de cada corpo de prova. Com uma carga aplicada de 50 N (Cinquenta Newtons), com um tempo de testagem de 5 (cinco) segundos.

A peça preparada tem a superfície a ser testada posicionada em um suporte, onde permanece fixada durante todo o processo de testagem, após isso, dá-se início ao processo de testagem. O equipamento aproxima-se da peça e apresenta a imagem da região que será testada para que seja feita a verificação da superfície a ser testada, caso esteja apta, dá-se início ao teste, caso contrário, pode ser escolhida uma outra região do corpo de prova que apresente melhores condições. Com o início dos testes, o equipamento faz o processo de testagem e registro das durezas obtidas de forma automática. Após o fim das testagens, o equipamento permite a verificação dos experimentos, possibilitando que o operador verifique e corrija as leituras realizadas pelo software. Com a confirmação das leituras, as

durezas encontradas são exportadas em uma planilha eletrônica para que os dados sejam tratados.

Na figura 9 abaixo está apresentado um exemplo de um dos cinco testes realizados em cada superfície testada de cada corpo de prova. É possível notar a marca deixada pela ferramenta que realiza o teste em formato de losango enquanto as demarcações em verde destacam a leitura realizada pelo equipamento, retornando o valor capturado de imediato.

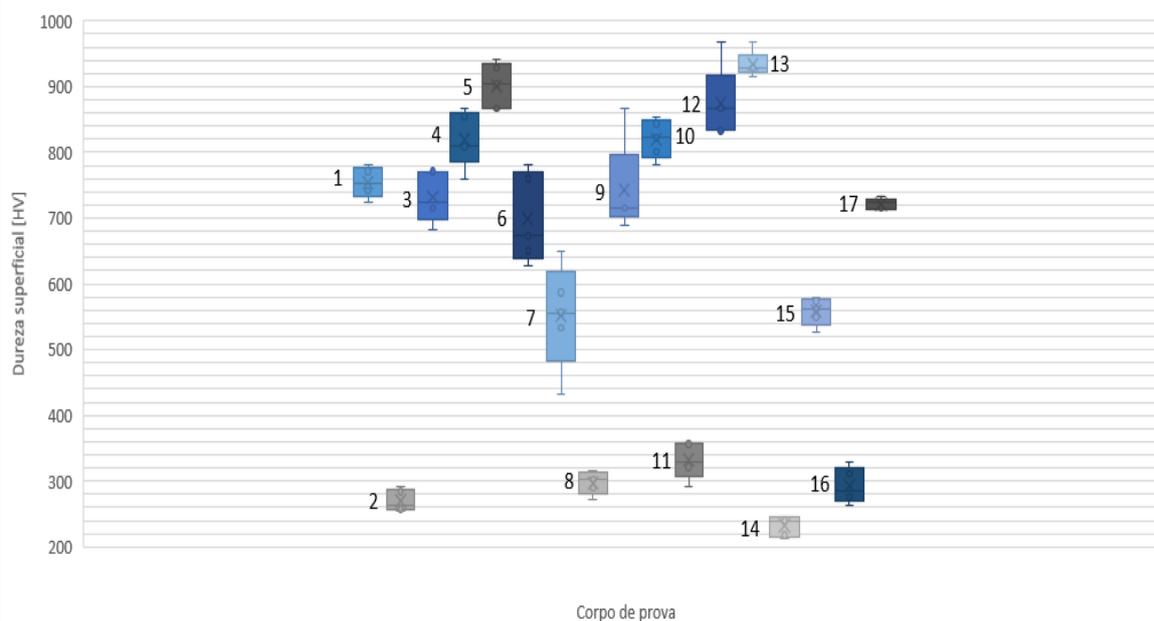
Figura 9 - Medição de dureza superficial do corpo de prova de ordem 16.



Fonte. Autor.

Na figura 10 a seguir temos os valores encontrados para dureza superficial dos corpos de prova assim como foram exportados dos experimentos de microdureza.

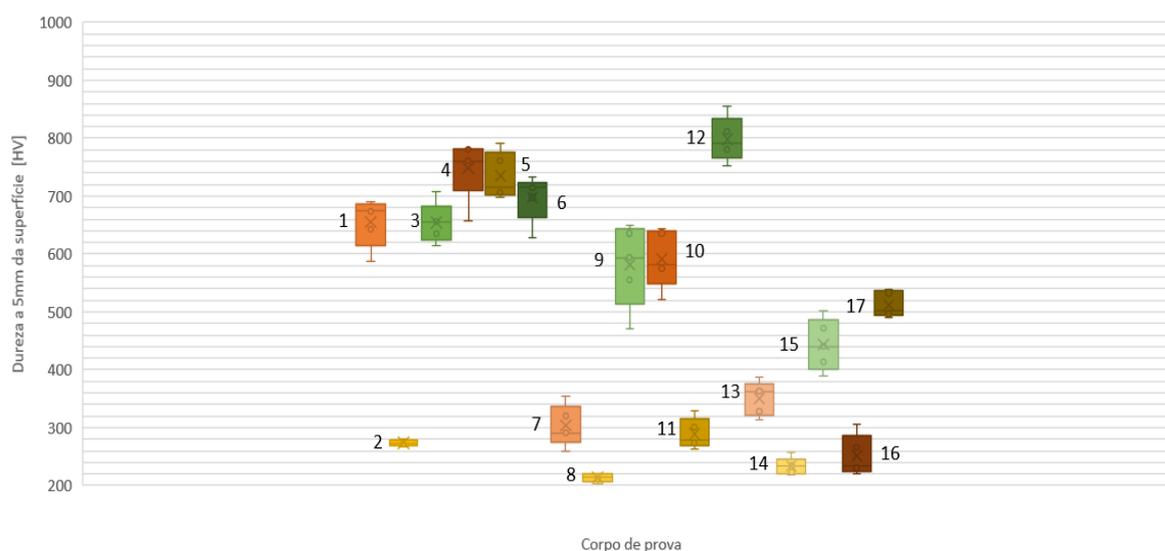
Figura 10 - Dispersão das durezas superficiais dos corpos testados.



Fonte. Autor.

De forma semelhante, na figura 11 a seguir temos os valores encontrados para dureza a 5mm da superfície dos corpos de prova assim como foram exportados dos experimentos de microdureza.

Figura 11. Dispersão das durezas a 5mm da superfície dos corpos testados.



Fonte. Autor.

6.6 Tratamento dos dados

Com os resultados brutos em mãos, deu-se início ao tratamento dos resultados experimentais, inicialmente com a exclusão de valores atípicos, em seguida com o refino dos resultados do design de experimentos.

7 RESULTADOS

Depois de ensaiados, cada um dos 17 (dezesete) tiveram seus resultados tratados por método de exclusão de valores atípicos para eliminação dos pontos que estavam destoantes da média das medições. A tabela 3 abaixo apresenta os resultados de dureza superficial e a 5mm da superfície para cada um dos tratamentos térmicos realizados.

Tabela 3 - Resultados dos experimentos de tratamento térmico exigidos pelo design de experimentos.

Nº exp.	Temperatura [°C]	Tempo de encharque [min]	Aço	Taxa de resfriamento [°C/s]	Dureza superficial I [Hv]	Dureza 5mm [Hv]
1	800	60	D2	120	747	682
2	800	120	1045	120	273	258
3	800	60	D2	60	755	650
4	800	120	D2	90	861	771
5	870	90	A2	90	901	738
6	940	60	A2	120	738	709
7	940	60	1045	90	558	322
8	940	60	D2	60	298	214
9	800	120	A2	60	718	627
10	940	120	D2	60	830	609
11	940	120	1045	60	341	289
12	800	90	1045	60	850	784
13	800	60	1045	120	925	352
14	870	60	1045	60	234	232
15	940	120	1045	120	559	442
16	940	90	D2	120	293	251
17	870	120	D2	120	722	512

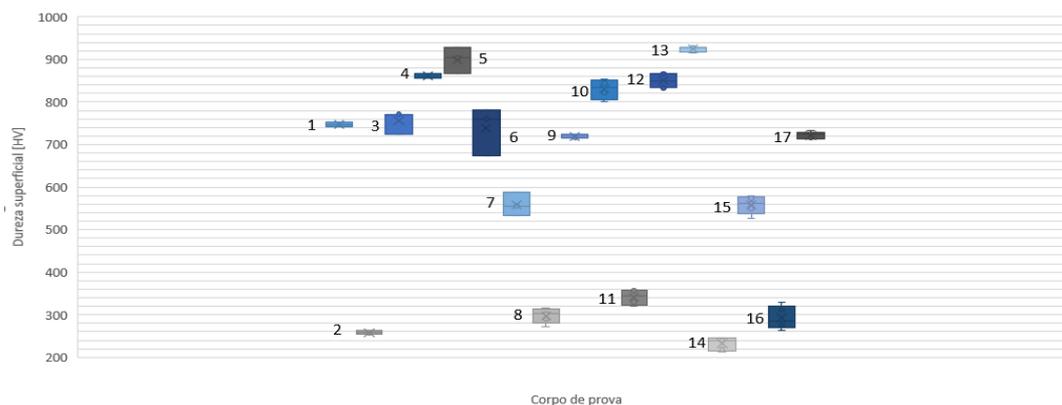
Fonte. Autor.

É notório que todos os corpos de provas tiveram durezas superficiais superiores às durezas a 5mm da superfície, o que é esperado para esse tipo de tratamento térmico, uma vez que o resfriamento das regiões internas ocorre numa velocidade menor.

7.1 Durezas superficiais

Depois do tratamento de dados, os resultados dos experimentos para as durezas superficiais dos corpos estão apresentados na figura 12 abaixo.

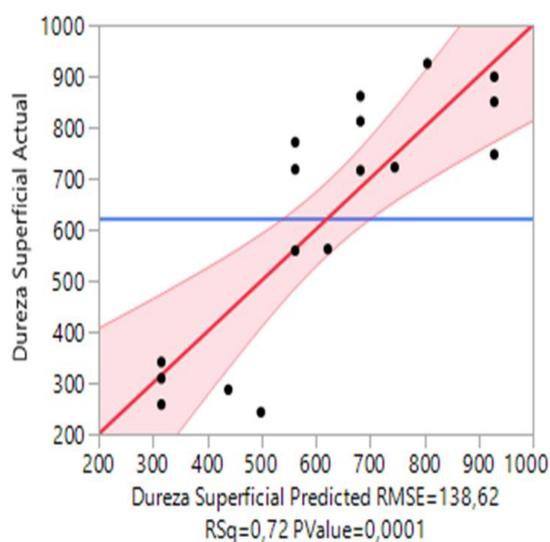
Figura 12 - Dispersão das durezas encontradas para cada experimento de dureza superficial após exclusão de valores atípicos.



Fonte. Autor.

Na figura 13 abaixo, temos as disposições dos valores encontrados para dureza superficial em comparação com a zona para valores esperada (em destaque) para a modelagem.

Figura 13 - Disposição dos dados encontrados para dureza superficial.



Fonte. Autor.

Através dos resultados verifica-se que a maior dureza superficial foi encontrada no experimento de ordem 13 (treze), utilizando o aço AISI 1045, com uma taxa de resfriamento de 120°C/s, permanecendo por 60 min em encharque a uma temperatura de 800°C.

Enquanto a menor dureza superficial foi obtida no experimento de ordem 14 (quatorze), utilizando o aço AISI 1045, com uma taxa de resfriamento de 60°C/s, permanecendo por 60 min em encharque a uma temperatura de 870°C. O corpo de prova de ordem 2 (dois) também obteve durezas bastante abaixo dos demais experimentos, podendo indicar um reganho de temperatura não esperado.

As relações entre a dureza superficial e os parâmetros utilizados apresentam uma relação observável nos experimentos:

- Meio de resfriamento: Quanto maior a taxa de resfriamento, maior a dureza obtida.
- Tempo de encharque: Quanto maior o tempo de encharque, menor a dureza (exceto para os resfriamentos em óleo, onde esta relação apresentou o comportamento contrário).
- Carbono equivalente: Quanto maior o carbono equivalente, maior a dureza obtida. Foi observada que a dureza máxima foi encontrada num valor médio de carbono equivalente, o que pode ser um indicativo que esta relação tenha algum tipo de saturação e decaia com o aumento do C_{eq} após atingir esse patamar.
- Temperatura de encharque: A depender da temperatura de transformação de cada aço, a temperatura deve ser ligeiramente maior para que a transformação aconteça assim que a peça entrar em contato com o meio de resfriamento.

Com todos os dados ajustados, a equação para dureza superficial obtida foi modelada pelo software de design de experimentos conforme apresentada a equação 2 abaixo.

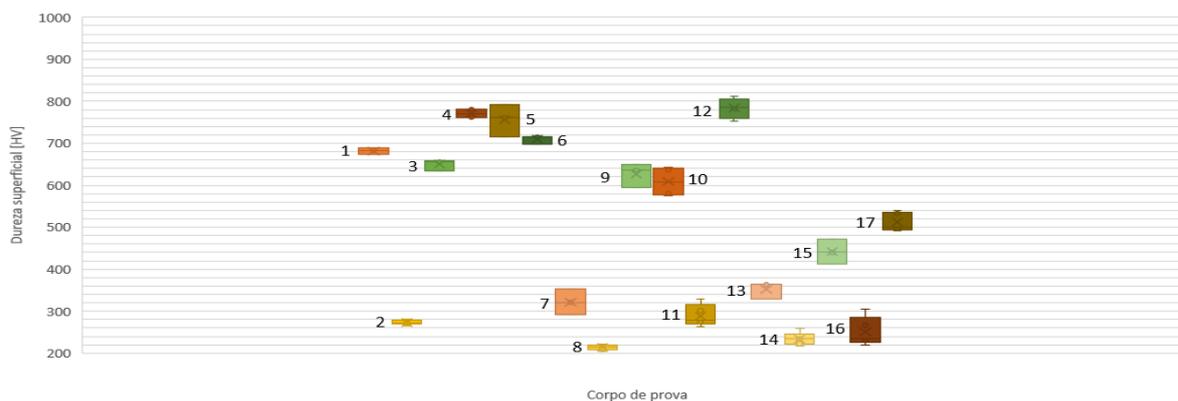
$$Y1 = 183,36C_{eq} + 123,29T.Resfriamento + 622,35 \quad (2)$$

Podemos assumir de imediato que a equação não abrange completamente os as durezas obtidas para todos os corpos de prova. Como primeiro indício, temos a constante sugerida maior que a dureza obtida em 7 (sete) dos experimentos, tornando inviável que o valor apresentado seja plausível para esses casos.

7.2 Durezas a 5mm da superfície

Da mesma forma como foi realizado para os valores de dureza superficial, os valores para dureza a 5mm da superfície foram tratados e estão apresentados na figura 14 abaixo.

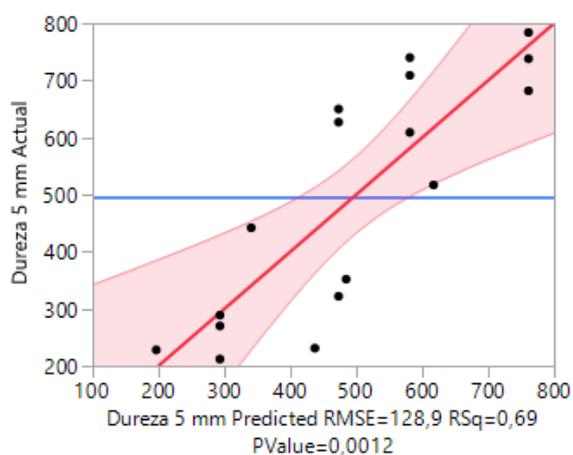
Figura 14 - Dispersão das durezas encontradas para cada experimento de dureza a 5mm após exclusão de valores atípicos.



Fonte. Autor.

Após a tratativa, os dados foram abastecidos no software, que retornou à disposição dos dados em função da zona esperada para os experimentos, como apresentado na figura 15 abaixo.

Figura 15 - Disposição dos dados encontrados para dureza a 5mm após remoção das variáveis descartadas.



Fonte. Autor.

A maior dureza a 5mm da superfície obtida foi observada no corpo de prova de ordem 12 (doze), utilizando o aço AISI 1045, com taxa de resfriamento de 60°C/s, permanecendo por 90 min em encharque a uma temperatura de 800°C.

Enquanto isso, a menor dureza obtida a 5mm da superfície foi observada no corpo de ordem 8 (oito) utilizando o aço AISI D2, com uma taxa de resfriamento de 60°C/s, permanecendo por 60 min em encharque a uma temperatura de 940°C.

A relação entre as propriedades e a dureza a 5mm da superfície também apresentam relações que podem ser descritas como:

- Meio de resfriamento: Quanto maior a taxa de resfriamento, maior a dureza obtida.
- Tempo de encharque: Quanto maior o tempo de encharque, menor a dureza (exceto para os resfriamentos em óleo, onde esta relação apresentou o comportamento inverso).
- Carbono equivalente: Quanto maior o carbono equivalente, maior a dureza obtida.
- Temperatura de encharque: A depender da temperatura de transformação de cada aço, a temperatura deve ser ligeiramente maior para que a transformação aconteça assim que a peça entrar em contato com o meio de resfriamento.

Após o processamento das informações, a equação de dureza a 5mm da superfície modelada pelo software de design de experimentos de acordo com a equação 3 abaixo.

$$Y2 = 144Ceq + 90T.Resfriamento + 186,47T.Resfriamento^2 + 340,67 \quad (3)$$

De modo semelhante à equação 2, os componentes da equação 3 demonstram inconsistência para as durezas encontradas experimentalmente, sendo a constante de dureza superior à dureza encontrada para 6 (seis) dos experimentos. Novamente a modelagem demonstrou-se ineficiente para o modelamento do experimento.

8 CONCLUSÃO

Este estudo buscou contribuir com o desenvolvimento das pequenas e médias empresas metalúrgicas que têm em suas atividades cotidianas o uso de tratamentos térmicos, em específico a têmpera. Foi possível realizar os procedimentos de tratamentos térmicos, bem como o estudo e planejamento do design de experimentos, a seleção dos materiais ocorreu juntamente com a empresa parceira, como também a fabricação dos corpos de provas. A realização dos tratamentos térmicos ocorreu normalmente, assim como os ensaios metalográficos. Equações de previsão de dureza foram obtidas, apesar da sua pouca assertividade.

Apesar da diversidade de propriedades que podem ser modificadas, aprimorar uma característica muitas vezes implica na redução de outras. Vale destacar que o tratamento térmico não altera a composição química, apenas as propriedades mecânicas e metalúrgicas. As peças tratadas termicamente são amplamente utilizadas, visando otimização de propriedades para aplicações específicas. O processo de tratamento térmico envolve controle preciso de parâmetros como temperatura, tempo, atmosfera e taxa de resfriamento. Entre os métodos de resfriamento estão solução aquosa, água, óleo e ar. O design de experimentos é uma ferramenta estatística valiosa para otimizar esses processos, permitindo a previsão do comportamento e a obtenção de condições ideais com um número reduzido de experimentos. A simplificação da ciência dos tratamentos térmicos, juntamente com a representação clara dos principais parâmetros, pode impulsionar o crescimento das indústrias metalúrgicas locais. Isso não apenas desmistificaria a área para novos candidatos, facilitando o recrutamento na indústria metalúrgica, mas também tornaria as atividades mais acessíveis para qualquer funcionário seguir uma metodologia desenvolvida para reproduzir resultados. O objetivo foi estabelecer uma correlação entre a dureza obtida e os parâmetros alterados, permitindo mapear as mudanças de propriedades do material. Os resultados podem ser documentados e visualmente representados, facilitando a reprodução dos procedimentos. Este trabalho visou fornecer informações valiosas para pequenas empresas, possibilitando o desenvolvimento, melhoria na qualidade das entregas e redução do tempo de execução de projetos.

Foi possível analisar os resultados encontrados com uma nova abordagem, visando contribuir o máximo possível com o desenvolvimento do estudo. Mesmo com as dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento, foi possível perceber

características e padrões comportamentais inerentes às durezas superficiais e a 5mm (cinco milímetros) da superfície relacionados a cada meio de resfriamento utilizado.

Dentre as dificuldades encontradas, a maior delas foi quanto a utilização correta dos metais adequados para o design de experimentos, uma vez que não foi possível contornar a situação e a exaustão causada pelo ambiente insalubre de um laboratório de testagem de materiais com o forno ligado à altas temperaturas, mesmo com o isolamento térmico presente no forno, o ambiente torna-se bastante quente e isto pode acabar exaurindo quem estiver fazendo os experimento e acarretar a erros de procedimento ou etiquetagem dos corpos de prova, comprometendo os resultados. Resultados divergentes indicam que o C_{eq} não demonstrou ser um bom indicador para caracterização e modelagem do material quando se trata de temperabilidade.

Tendo como experiência o trabalho em questão apresentado e visando resultados mais precisos, algumas sugestões plausíveis são: Utilização de um único material para estudo, eliminando a presença da variável do carbono equivalente; Estudo metalográfico para acompanhamento das microestruturas formadas ao longo da espessura da peça estudada; Utilização de tempo de encharque menor que 60 (sessenta) minutos por polegada para pôr a prova a convenção técnica utilizada; Avaliação de composição química da(s) liga(s) utilizada(s); Utilização de equipamentos automatizados e de maior precisão para realização da preparação metalográfica.

Espera-se que este trabalho possa ser utilizado como base para o desenvolvimento da metalurgia aplicada à realidade das pessoas que a utilizam em seu cotidiano, e contribua com os estudos metalúrgicos envolvendo tratamentos térmicos, visando o desenvolvimento deste tema, dada a importância que o tema presente possui no cotidiano dos indivíduos da sociedade foi o aspecto base da construção deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. ALVARES, Beatriz Vieira; Madani, Fernando Silveira. Indústria 4.0 - Automação da Análise de Dados e Recursos de Tecnologia da Informação com Foco na Gestão. Iniciação Científica. Escola de Engenharia Mauá. 2019.
2. AMORSOLO, A. V.; FUNKENBUSCH, P. D.; KADIN, A. M. A parametric study of titanium silicide formation by rapid thermal processing. **Journal of materials research**, 1996.
3. DOS ANJOS, ADILSON. Planejamento de experimentos I. **Universidade Federal do Paraná. Curitiba**, p. 98, 2005.
4. BAUDISCH, Alfred Reinold. Ciência de Dados é Explorar Big Data para Fazer Perguntas para Prever o Futuro. 2016. Disponível em: <https://alfredbaudisch.medium.com/o-que-%C3%A9-ci%C3%Aancia-de-dados-data-science-7af5bdac101a> Acesso em: 11 agosto de. 2022.
5. BESSANT, J., & Tidd, J.. Inovação e empreendedorismo. Porto Alegre: Bookman. (2009).
6. CALLISTER, Jr. e William, D., 2002, "Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução", **Editores LTC**, São Paulo, 5ed., p. 78-100
7. CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro: **LTC**, 1999.
8. CALADO, Verônica e Montgomery, Douglas C. Planejamento de Experimentos Usando o Statistica. **Editores e-papers**. Rio de Janeiro, 2003;
9. CAMARGO, S. M. *et al.* Tratamentos térmicos: normalização, têmpera e revenido do aço 1140 fabricado em siderúrgica de Marabá-Pa. **CONEM**. São Luís, MA, 2012;
10. CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos. **Abm**, 1977;
11. CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. 7. Ed. São Paulo: **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, 2008;
12. COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. **3a. Ed. Edgard Blücher Ltda**. São Paulo, 1974;
13. DA SILVA, Helder Antônio; DA SILVA, Messias Borges. Aplicação de um projeto de experimentos (DOE) na soldagem de tubos de zircaloy-4. **Revista Eletrônica Produção & Engenharia**, v. 1, n. 1, p. 41-52, 2008.

14. Design de experimentos (DoE) - Uma abordagem estatística para a otimização de reações. METTLER TOLEDO. Disponível em:
https://www.mt.com/br/pt/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/design-of-experiments-doe.html#:~:text=O%20que%20%C3%A9%20o%20Design,para%20obter%20os%20valores%20ideais. Acesso em: 10/08/2022;
15. FERREIRA, Carlos Roberto *et al.* Tratamento térmico por indução eletromagnética em tubos de aço SAE 1045 para produção de hastes de sondagem geológica. Rem: **Revista Escola de Minas**, v. 57, p. 23-26, 2004;
16. FIDÉLIS, P.H., Pagotto, C.R., Borato, T.H.A. Análise dos efeitos dos parâmetros de corte na rugosidade Ra no torneamento do Al6351-T6 através de Planejamento de Experimentos. **11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação 24 a 26 de maio de 2021**, Curitiba, PR, Brasil, 2021;
17. GERDAU. Manual dos aços: Aços finos Piratini. Piratini: Gerdau, 2003. 106 p.
18. GRIZENDI, E. Manual de orientações gerais sobre inovação. [Brasília, DF]: Ministério das Relações Exteriores. Departamento de Promoção Comercial e Investimentos. Divisão de Programas de Promoção Comercial, 2011. Disponível em: <http://download.finep.gov.br/dcom/manualinovacao.pdf>. Acesso em: 11 agosto de 2022;
19. HIBBELER, R.C. Resistência dos materiais, 5ª edição, 2004;
20. KARIMI, P , H. Abdollahi , N. Aslan , M. Noaparast & S. Z. Shafaei. *Application of Response Surface Method and Central Composite Design for Modeling and Optimization of Gold and Silver Recovery in Cyanidation Process, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, 32:1, 116. 2010;
21. KEHL, George Luis; DEL CORRAL, Francisco Muñoz. Fundamentos de la práctica metalográfica. **Aguilar**, 1963;
22. LEE, Edward A. The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models. **Sensors**, 2015;
23. LEITE, Sueli Souza *et al.* Ensaio de tração mecânica e análise metalográfica do aço SAE 1045. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 2, n. 1, 2017;

24. LIŠČIĆ, B.; TENSI, H.M.; CANALE, L.C.F.; TOTTEN, G.E. Quenching Theory and Technology. 2nd Edition. **IFHTSE and CRC Press**, Florida, USA. 2010;
25. MACHADO, Izabel Fernanda. Technological advances in steels heat treatment. **Journal of materials processing technology**, v. 172, n. 2, p. 169-173, 2006;
26. MAIA, Aline. Determinação da taxa de resfriamento de diferentes meios de extração de calor e a influência sobre a dureza do aço ABNT 8620. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 2, n. 1, p. 82-90, 2020;
27. NAKANO, R. K. Influência da taxa de deformação na falha de uniões por solda a ponto. São Paulo: EDUSP, 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
28. NAVIDI, William. Probabilidade e estatística para ciências exatas. AMGH Editora, 2012.
29. O universo do tratamento térmico – Como surgiu essa solução milenar, diferentes tipos de materiais, regulamentações e o aperfeiçoamento na indústria com soluções inteligentes. Metalurgia, 2019. Disponível em: <https://www.metalurgia.com.br/noticias-tratamento-termico/#:~:text=Os%20primeiros%20registros%20da%20exist%C3%Aancia,os%20modificava%20de%20diferentes%20maneiras>. Acesso em: 27 de julho de 2022;
30. O que é design de experimentos. Treinamentos e soluções, 2015. Disponível em: <https://icegetec.com.br/o-que-e-design-de-experimentos/#contents>. Acesso em: 07 de agosto de 2022;
31. O que é dureza do aço? Aços nobre, 2024. Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/o-que-e-dureza-do-aco-brinell-rockwell-vickers-tabela/>. Acesso em 08 de fevereiro de 2024;
32. REED-HILL, R.E. (1982). Princípios de metalurgia física. 2a. ed. Rio de Janeiro: **Ed. Guanabara Dois S.A.** 1982;
33. ROHDE, Regis Almir. Metalografia preparação de amostras. Laboratório de ensaios mecânicos. Universidade Regional Integrada do alto Uruguai e Missões, 3ª Edição, Rio Grande do Sul, 2010;
34. RUGGIERI, Juliano Emílio. Classificação dos óleos de têmpera nacionais. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1998;

35. SCHUMPETER, J. Teoria do desenvolvimento econômico. São Paulo: Abril Cultural, 1988;
36. SILVA, Helder Antônio; Borges Silva, Messias. Aplicação de um projeto de experimentos (DOE) na soldagem de tubos de zircaloy-4. Rev. Eletrônica Produção & Engenharia, v. 1, n. 1, p. 41-52, set./dez, 2008.
37. SILVEIRA, Cristiano. Planejamento de Experimentos – DOE – *Design of Experiments*. Citisystems, 2012. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/planejamento-experimentos-doe-design-experiments/>. Acesso em: 07 de agosto de 2022.
38. SOUZA, R.O.A. *et al.*, “Avaliação da Dureza Vickers de Resinas Compostas de Uso Direto e Indireto”, Cienc. Odontol. Bras., v.12, n.1, p.23-30. 2009;
39. TIGRE, P. B. Gestão da inovação: a economia da tecnologia no Brasil. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006;
40. TRINDADE, Denisson R. *et al.* Estudo e Avaliação do Tempo de Permanência a Temperatura no Tratamento Térmico de Têmpera do Aço SAE 1045. **Revista Processos Químicos**, v. 11, n. 21, p. 67-76, 2017;
41. VEADO, Juarez Távora *et al.* Aspectos do ensaio de microdureza. 1965;