BANCADA DIDÁTICA ENSAIO JOMINY COM AQUECEDOR INDUTIVO

Bruno Tavares Leite[1], Eduardo dos Santos Zawadki[2], Giusepe Berton[3], Rodrigo Tavares de Lemos[4], Luiz Felipe Pellin Tessaro[5], Matheus Bondan[6] e Cheng Te Hung[7]

RESUMO

O ensaio Jominy é utilizado para avaliar a temperabilidade dos aços por meio da variação de dureza em função da distância em relação à extremidade submetida ao resfriamento. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma bancada didática em escala reduzida, concebida para integrar aquecimento por indução, resfriamento localizado por jato de água e medição de dureza Rockwell, com ênfase na aplicação em aulas práticas de Engenharia Mecânica. A pesquisa possui caráter aplicado e experimental, envolvendo projeto mecânico da bancada, definição dos componentes do sistema hidráulico e térmico, fabricação de corpos de prova e análise de perfis de dureza. Os registros experimentais disponibilizados contemplam os aços SAE 1045 e SAE 4140, avaliados entre 1,5 e 39 mm da extremidade resfriada. O SAE 1045 apresentou redução de 56 para 25 HRC, enquanto o SAE 4140 variou de 58 para 32 HRC. Em todas as posições avaliadas, o SAE 4140 manteve dureza superior, com diferença média de aproximadamente 8,4 HRC, evidenciando maior capacidade de conservar o endurecimento com o afastamento da região de resfriamento intenso. Os resultados sustentam a utilidade pedagógica da bancada para demonstrar o conceito de temperabilidade e a influência dos elementos de liga. Também se identificou que as dimensões do corpo de prova adotado caracterizam uma adaptação didática, razão pela qual os resultados devem ser interpretados comparativamente e não como certificação normativa do ensaio.

Palavras-chave: temperabilidade; ensaio Jominy; tratamento térmico; dureza Rockwell; aquecimento por indução.

[1] Filiação. E-mail: UniSenai Campus CIC. brunoindptavares@gmail.com
[2] Filiação. E-mail: UniSenai Campus CIC. eduardozawadzki55@gmail.com
[3] Filiação. E-mail: UniSenai Campus CIC. giusepeberton@gmail.com
[4] Filiação. E-mail: UniSenai Campus CIC. rodrigo_usilemos@hotmail.com
[5] Filiação. E-mail: UniSenai Campus CIC. lipe_pellin@hotmail.com
[6] Filiação. E-mail: UniSenai Campus CIC. matheusbondan@hotmail.com
[7] Filiação. E-mail: UniSenai Campus CIC. cheng.hung@sistemafiep.org.br

JOMINY TEST EDUCATIONAL BENCH WITH INDUCTION HEATER

ABSTRACT

The Jominy end-quench test is used to assess steel hardenability through the variation of hardness as a function of the distance from the quenched end. This study presents the development of a reduced-scale didactic bench designed to integrate induction heating, localized water-jet cooling, and Rockwell hardness measurement, with emphasis on practical Mechanical Engineering education. The research is applied and experimental and includes mechanical bench design, definition of hydraulic and thermal components, specimen manufacturing, and analysis of hardness profiles. The available experimental records comprise SAE 1045 and SAE 4140 steels, evaluated from 1.5 to 39 mm from the quenched end. SAE 1045 decreased from 56 to 25 HRC, whereas SAE 4140 varied from 58 to 32 HRC. At every evaluated position, SAE 4140 retained higher hardness, with an average difference of approximately 8.4 HRC, indicating a greater ability to preserve hardening as the distance from the most severe cooling region increases. The results support the educational usefulness of the bench for demonstrating hardenability and the effect of alloying elements. Because the adopted specimen geometry represents a didactic adaptation, the results should be interpreted comparatively rather than as a normative certification test.

Key words: hardenability; Jominy test; heat treatment; Rockwell hardness; induction heating.

1 INTRODUÇÃO

A indústria metalmecânica utiliza tratamentos térmicos para adequar propriedades como dureza, resistência mecânica, tenacidade e resistência ao desgaste às exigências de serviço. Entre essas propriedades, a temperabilidade ocupa posição de destaque porque descreve a capacidade de um aço desenvolver endurecimento em profundidade quando submetido à têmpera. Esse conceito não deve ser confundido com dureza máxima: dois aços podem atingir durezas elevadas próximos à superfície resfriada e, ainda assim, apresentar comportamentos distintos à medida que aumenta a distância em relação à região de maior extração de calor.

O ensaio Jominy constitui uma das formas clássicas de representar esse comportamento. No procedimento, uma extremidade do corpo de prova austenitizado é submetida a resfriamento intenso e o gradiente de taxa de resfriamento produzido ao longo do comprimento gera diferentes condições de transformação

microestrutural. A medição de dureza em posições sucessivas permite construir uma curva de resposta que evidencia a facilidade com que o material conserva níveis elevados de endurecimento à medida que se afasta da extremidade resfriada.

Do ponto de vista educacional, o ensaio reúne conteúdos de ciência dos materiais, tratamentos térmicos, transferência de calor, metrologia e projeto mecânico. Uma bancada didática permite que o estudante associe conceitos abstratos - tais como austenitização, formação de martensita, gradiente térmico e influência de elementos de liga - a variáveis observáveis, como posição no corpo de prova e dureza obtida. Essa integração entre teoria e experimento é especialmente relevante na formação em Engenharia Mecânica, em que a seleção de materiais e o controle de processos térmicos são recorrentes em componentes submetidos a desgaste, fadiga e solicitações cíclicas.

O projeto desenvolvido no UniSENAI contemplou a construção de uma bancada para o ensaio Jominy, composta por estrutura metálica, cuba de resfriamento, sistema de recirculação de água, proteção em acrílico e aquecimento por indução. Entre os registros experimentais obtidos, há valores de dureza Rockwell C para corpos de prova dos aços SAE 1045 e SAE 4140. Por esse motivo, a análise comparativa apresentada neste artigo concentra-se nesses dois materiais, mantendo as conclusões vinculadas aos resultados efetivamente registrados durante o projeto.

Este artigo tem como objetivo desenvolver uma apresentação científica consolidada do projeto, descrever a configuração da bancada didática e analisar comparativamente os perfis de dureza dos aços SAE 1045 e SAE 4140. Como objetivos específicos, busca-se: contextualizar os fundamentos de temperabilidade e do ensaio Jominy; caracterizar os principais elementos construtivos da bancada; organizar os resultados de dureza em função da distância da extremidade resfriada; interpretar as diferenças entre os dois aços; e discutir os limites de equivalência entre a bancada em escala reduzida e o ensaio normativo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Temperabilidade e transformações durante a têmpera

A resposta de um aço ao resfriamento depende da composição química, do tamanho de grão austenítico, da condição de austenitização e da velocidade de extração de calor. Durante a têmpera, o objetivo é reduzir a temperatura do material com rapidez suficiente para limitar transformações difusionais e favorecer a formação de martensita. A martensita apresenta elevada dureza em razão da estrutura cristalina supersaturada em carbono, porém sua fração e sua distribuição ao longo da seção dependem diretamente do histórico térmico imposto ao componente (CALLISTER, 2008).

A temperabilidade representa a capacidade de formação de estruturas endurecidas em profundidade. A adição de elementos de liga pode deslocar as transformações difusionais para tempos maiores, possibilitando que regiões submetidas a taxas de resfriamento menos severas ainda desenvolvam elevada fração de martensita. Por essa razão, a comparação entre um aço carbono médio, como o SAE 1045, e um aço ligado da série 41xx, como o SAE 4140, constitui uma demonstração didática apropriada do efeito da composição sobre a manutenção de dureza em posições afastadas da extremidade resfriada.

É importante distinguir temperabilidade de dureza. A dureza é uma propriedade local mensurada em determinada condição microestrutural, enquanto a temperabilidade descreve a variação dessa resposta ao longo de uma geometria submetida a gradientes de resfriamento. A curva Jominy, portanto, não fornece apenas um número isolado; ela evidencia a persistência do endurecimento ao longo da distância e permite comparações entre materiais sob condições de ensaio equivalentes.

2.2 Ensaio Jominy e padronização

A ASTM A255-20a descreve o ensaio de têmpera em uma extremidade como método para determinação da temperabilidade dos aços. O princípio consiste em austenitizar um corpo de prova cilíndrico, submetê-lo a um jato de água em uma das

extremidades e medir a resposta de dureza em função da distância a partir da região resfriada. A norma caracteriza a temperabilidade pela profundidade de endurecimento observada em um corpo de prova de tamanho e forma padronizados, sob condições de resfriamento igualmente controladas.

No ensaio, a região diretamente atingida pelo jato apresenta a maior taxa de extração de calor. À medida que a distância aumenta, a condução interna e a menor severidade térmica produzem taxas de resfriamento progressivamente menores. Esse gradiente explica a tendência de redução de dureza normalmente observada ao longo do corpo de prova. A comparação de duas curvas obtidas sob condições semelhantes permite identificar qual material conserva maior dureza em regiões submetidas a resfriamento menos intenso.

Para fins de ensino, bancadas em escala reduzida podem reproduzir o princípio físico do ensaio, desde que a finalidade seja claramente delimitada. A redução da geometria do corpo de prova altera as condições de transferência de calor, a relação área-volume e os tempos térmicos. Consequentemente, uma adaptação dimensional deve ser tratada como experimento comparativo e didático, e não como ensaio de conformidade normativa.

2.3 Dureza Rockwell e interpretação dos perfis

A dureza Rockwell é amplamente utilizada no controle de materiais metálicos por permitir leitura direta e elevada produtividade. No método Rockwell C, indicado para aços endurecidos, a determinação da dureza é relacionada à profundidade permanente de penetração produzida sob condições padronizadas de pré-carga e carga principal. A ABNT NBR ISO 6508-1 estabelece requisitos para o método de ensaio Rockwell, incluindo condições do equipamento, do corpo de prova e do procedimento de medição.

No contexto do Jominy, as medições sequenciais de HRC devem ser associadas às respectivas distâncias da extremidade resfriada. O valor próximo à extremidade indica a resposta do material à condição de resfriamento mais severa; os valores em posições progressivamente mais afastadas demonstram a manutenção

ou a perda de endurecimento. A forma da curva, sua inclinação e a diferença entre materiais são mais informativas para a análise de temperabilidade do que um único valor de dureza.

Para que a comparação tenha significado experimental, a preparação superficial e a posição das indentações devem minimizar interferências geométricas. As medições foram registradas em intervalos definidos ao longo do corpo de prova e apresentadas em HRC para os aços SAE 1045 e SAE 4140. Como nesta etapa do projeto não foram realizadas repetições independentes nem registrados desvio-padrão e incerteza de medição, a análise é descritiva e comparativa, sem inferência estatística de significância.

2.4 Aquecimento por indução e transferência de calor

O aquecimento por indução baseia-se na geração de correntes elétricas induzidas no material condutor quando submetido a um campo eletromagnético alternado. Em aplicações de tratamento térmico, a técnica oferece aquecimento localizado, resposta rápida e possibilidade de controle temporal. Para uma bancada didática, essas características são atraentes porque reduzem a necessidade de um forno de grandes dimensões e facilitam a integração do sistema térmico à estrutura experimental (SMITH; HASHEMI, 2006).

A etapa de resfriamento pode ser interpretada à luz dos mecanismos de transferência de calor. A condução promove fluxo térmico das regiões internas mais quentes em direção às regiões mais frias, enquanto a convecção intensificada pelo jato de água remove energia da extremidade exposta. Conforme os fundamentos apresentados por Incropera et al. (2008), a intensidade do fluxo térmico depende do gradiente de temperatura, das propriedades do material e das condições de contorno. A variação espacial desses fatores é justamente o que produz o gradiente de resfriamento explorado pelo ensaio Jominy.

A integração de indução, jato de água e medição de dureza em uma mesma bancada cria uma sequência experimental coerente para o ensino: geração controlada de calor, transformação microestrutural associada ao ciclo térmico e

verificação mecânica por dureza. Entretanto, a validade quantitativa do ensaio depende do controle e do registro de parâmetros como temperatura de austenitização, tempo de encharque, vazão do jato, temperatura da água, tempo entre aquecimento e resfriamento e calibração do durômetro.

3 METODOLOGIA

3.1 Delineamento da pesquisa

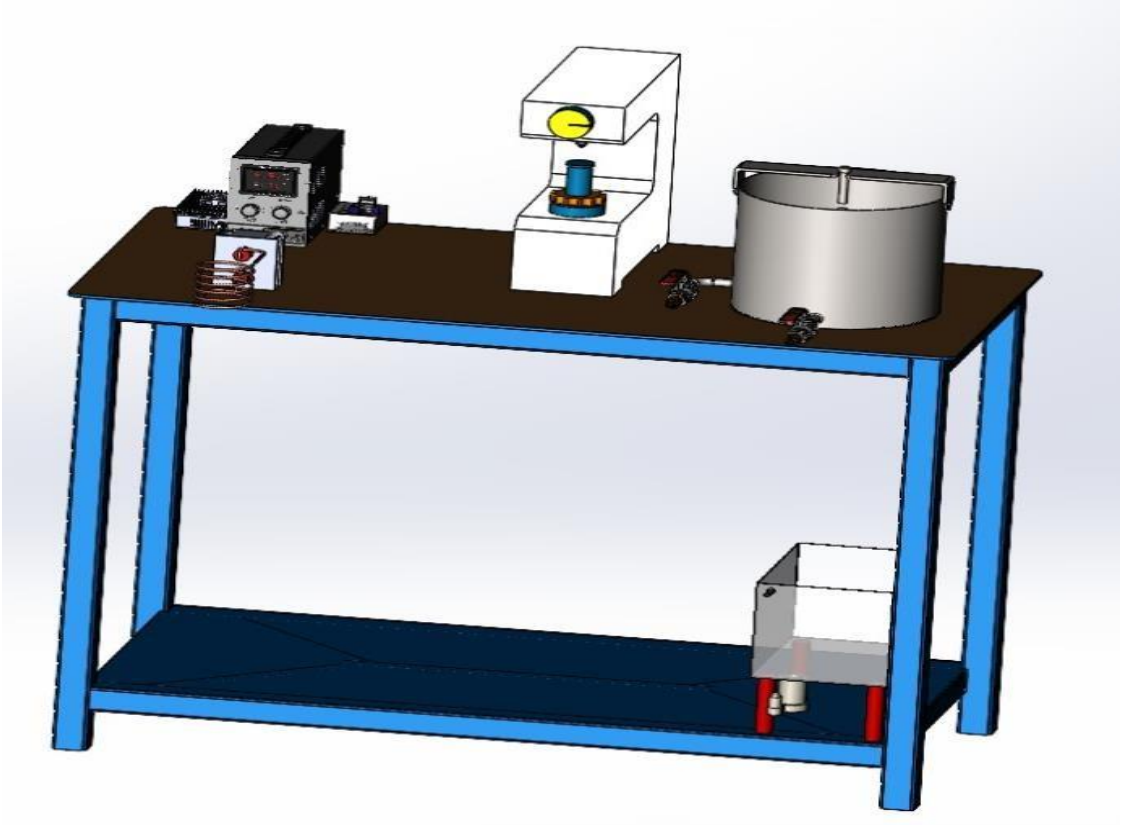
A pesquisa foi classificada como aplicada, de abordagem quantitativa e caráter experimental, pois envolve o desenvolvimento de um equipamento didático e a obtenção de uma variável mensurável - a dureza Rockwell C - em função da posição ao longo do corpo de prova. O estudo também possui componente de projeto de engenharia, uma vez que contempla concepção da estrutura, especificação de componentes, fabricação, montagem e avaliação funcional.

A metodologia desta etapa do estudo foi baseada nos registros de projeto e nos resultados experimentais efetivamente obtidos: desenhos técnicos, imagens da bancada, orçamento de componentes, identificação dos materiais ensaiados e medições de dureza. O planejamento inicial previa avaliações complementares, porém a discussão apresentada foi limitada às informações que possuem registro experimental suficiente para comparação, evitando extrapolações além dos dados disponíveis.

3.2 Projeto e constituição da bancada

A bancada foi concebida para concentrar em uma estrutura compacta as etapas essenciais do experimento: posicionamento do corpo de prova, aquecimento, transferência para a condição de resfriamento, geração do jato de água, contenção do fluido e recirculação. A Figura 1 apresenta a representação geral do conjunto didático desenvolvido no projeto.

Figura 1 – Concepção geral da bancada didática para o ensaio Jominy



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os registros de orçamento e projeto indicam a utilização de estrutura tubular metálica, cuba fabricada em aço inoxidável, tubulação também em aço inoxidável, válvulas de controle, mangueira flexível, bomba de recirculação em 220 V, proteção em acrílico e sistema de indução alimentado por fonte de 12 V e 80 A, com potência nominal próxima de 1 kW. O custo estimado do conjunto de materiais foi de R$ 5.700,00, valor que inclui componentes estruturais, hidráulicos, elétricos, corpos de prova e itens de proteção, veja Tabela 1.

A opção pelo aço inoxidável nos componentes em contato frequente com a água contribui para a durabilidade e a resistência à corrosão. A presença de uma barreira em acrílico é pertinente do ponto de vista de segurança didática, pois restringe respingos e cria separação física entre o operador e a região de resfriamento. O sistema de recirculação reduz o consumo de água e favorece a

repetição dos ensaios, desde que a temperatura do reservatório seja monitorada para evitar alteração significativa das condições térmicas entre ciclos.

Tabela 1 – Principais elementos construtivos registrados no projeto

Elemento	Especificação registrada	Função principal
Cuba	Aço inoxidável 304	Conter água e receber o jato de resfriamento
Estrutura	Tubo metálico 30 x 50 x 2 mm	Suportar os sistemas térmico e hidráulico
Bomba	Recirculação, 220 V	Manter o circuito de água
Proteção	Caixa de acrílico	Reduzir exposição do operador a respingos
Indução	Fonte 12 V/80 A e bobina ~1000 W	Aquecer o corpo de prova
Corpos de prova	SAE 1045 e SAE 4140, Ø18 x 76 mm	Amostras para avaliação comparativa

Fonte: Dados consolidados do projeto elaborado pelos autores.

A Figura 2 apresenta a cuba de resfriamento construída. O conjunto integra reservatório, suporte e válvulas, permitindo direcionar e interromper o fluxo de água. A configuração é coerente com a finalidade didática de tornar visível o circuito hidráulico e facilitar intervenções de manutenção ou ajuste.

Figura 2 – Cuba de resfriamento e conjunto de válvulas

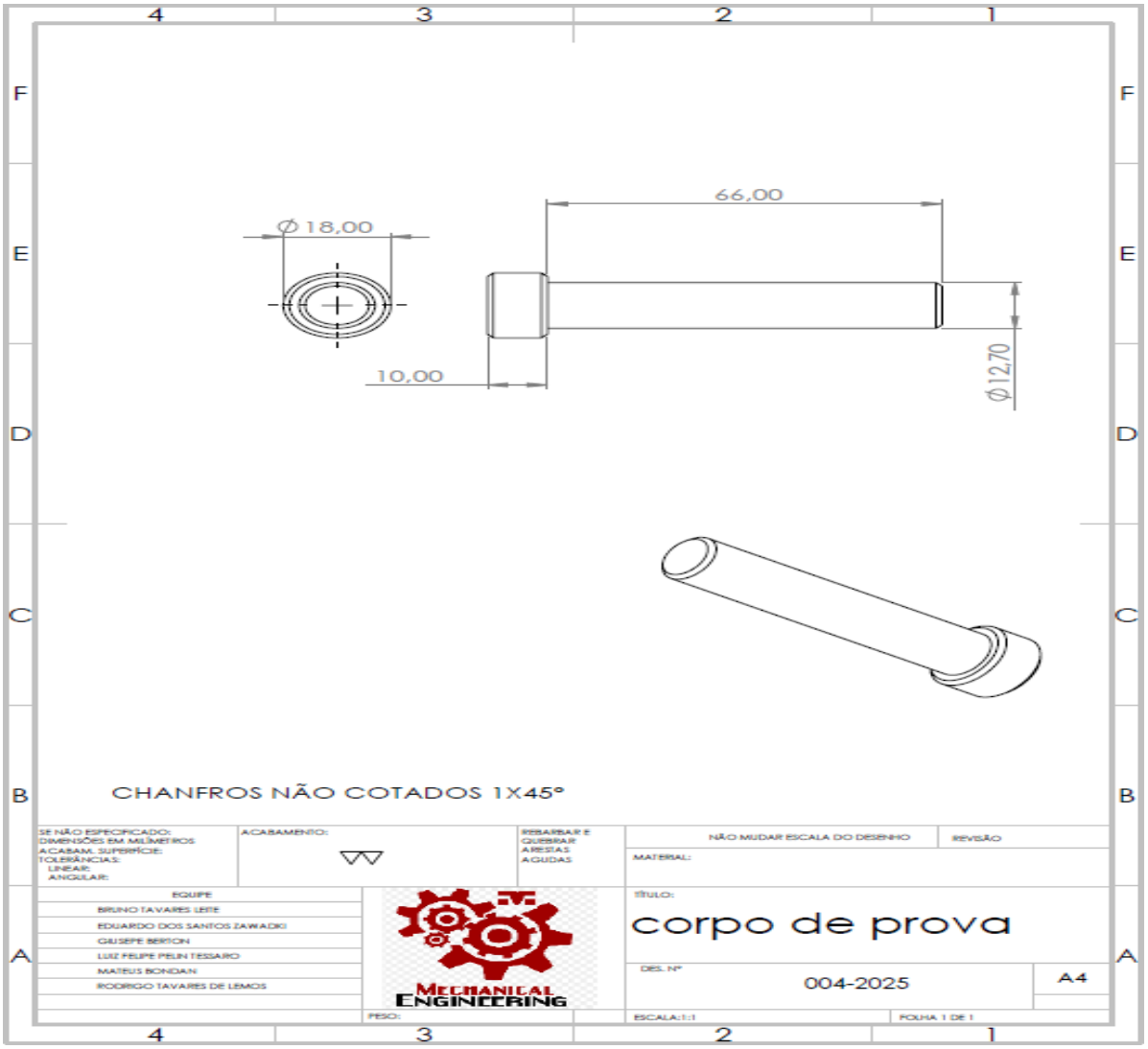


Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Corpo de prova e procedimento experimental

O desenho disponibilizado para o corpo de prova indica geometria reduzida, com haste de aproximadamente 66 mm de comprimento, diâmetro nominal de 12,70 mm na região útil e cabeça com diâmetro de 18,00 mm e espessura de 10,00 mm. O orçamento do projeto registra corpos de prova identificados como SAE 1045 e SAE 4140 com dimensão global aproximada de Ø18 x 76 mm. A Figura 3 reproduz o desenho técnico utilizado na fabricação.

Figura 3 – Desenho técnico do corpo de prova em escala reduzida



Fonte: Elaborado pelos autores.

A ASTM A255-20a adota um corpo de prova cilíndrico padronizado com 1,0 polegada de diâmetro para o ensaio quantitativo de temperabilidade. Consequentemente, a geometria utilizada neste projeto não deve ser apresentada como reprodução integral da configuração normativa. Trata-se de uma bancada em escala didática que preserva o princípio de resfriamento em uma extremidade e a leitura de dureza em função da distância. Essa distinção metodológica é essencial para evitar extrapolações indevidas dos resultados para certificados de material ou especificações industriais.

O procedimento experimental descrito no trabalho envolve aquecimento do corpo de prova até a condição de austenitização, seguido de resfriamento localizado da extremidade por jato de água. Após o resfriamento, a dureza foi medida em posições sucessivas ao longo da região útil. Para este artigo, foram utilizados os registros de distância e dureza contidos na tabela do trabalho de origem, com posições de 1,5 a 39 mm.

3.4 Medição de dureza e tratamento dos dados

As medições foram realizadas em dureza Rockwell C, utilizando durômetro digital. A Figura 4 apresenta o tipo de equipamento registrado no projeto. Os valores foram organizados em função da distância da extremidade resfriada e submetidos a análise descritiva. Foram calculadas a redução total de dureza entre a primeira e a última posição, a diferença de dureza entre os materiais em cada ponto e a diferença média ao longo das posições avaliadas.

Nesta etapa do projeto não foram registrados réplicas independentes, valores de incerteza, certificado de calibração do durômetro, temperatura real de austenitização, vazão do jato ou temperatura da água em cada ensaio. Assim, os resultados são utilizados para comparação do comportamento dos dois aços dentro da bancada desenvolvida. Em uma etapa futura de validação metrológica, recomenda-se realizar pelo menos três repetições por condição, registrar os

parâmetros térmicos e hidráulicos e apresentar média, desvio-padrão e incerteza de medição.

Figura 4 – Durômetro Rockwell digital utilizado como referência no projeto



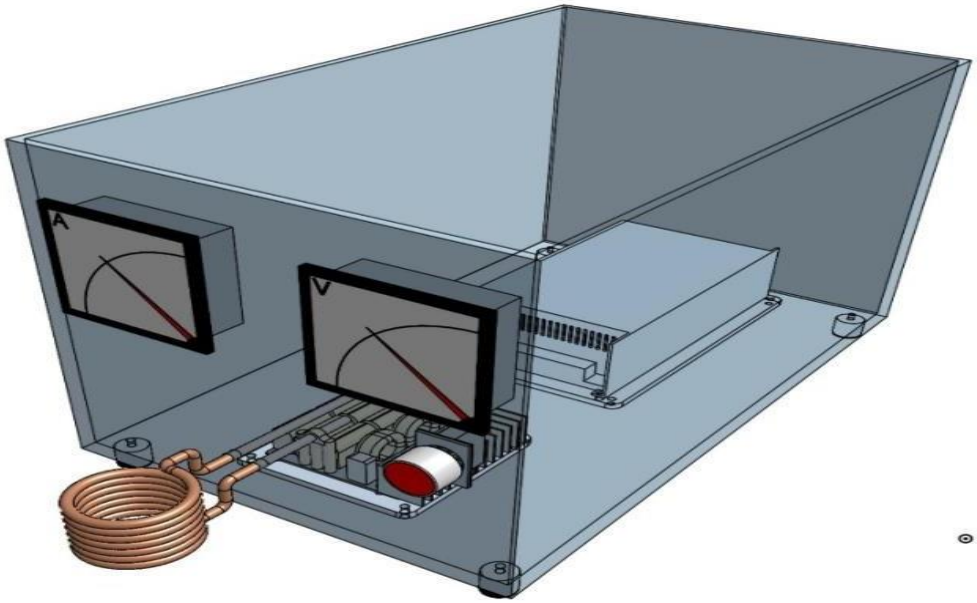
Fonte: Registro do projeto.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Resultado construtivo da bancada

O conjunto desenvolvido demonstra viabilidade de integração entre estrutura de suporte, sistema de indução, circuito hidráulico e região de resfriamento em um arranjo compacto. A Figura 5 apresenta uma representação do módulo de aquecimento e circulação associado ao projeto. Essa arquitetura favorece a observação do ciclo de tratamento térmico e possibilita que o estudante acompanhe as etapas de preparação, aquecimento, têmpera e ensaio de dureza como partes de um mesmo processo.

Figura 5 – Representação do módulo térmico e hidráulico integrado à bancada



Fonte: Elaborado pelos autores.

A principal contribuição do equipamento é pedagógica: a bancada transforma o conceito de temperabilidade em uma relação mensurável entre distância e dureza. Além disso, o projeto integra conteúdos de desenho técnico, seleção de materiais, fabricação, segurança, eletricidade, transferência de calor e metrologia. Essa natureza multidisciplinar amplia o valor educacional do experimento e permite que o equipamento seja utilizado em diferentes unidades curriculares.

Sob a ótica de projeto, a construção em escala reduzida apresenta vantagens de custo, mobilidade e simplicidade. Em contrapartida, a redução dimensional exige que os resultados sejam interpretados dentro do próprio arranjo experimental. Alterações de diâmetro e comprimento modificam a dissipação de calor, de modo que a curva obtida na bancada não deve ser empregada diretamente como curva Jominy normativa de catálogo.

4.2 Perfis de dureza dos aços SAE 1045 e SAE 4140

A Tabela 2 apresenta os valores de dureza registrados para os dois aços. Ambos exibem comportamento monotonicamente decrescente com o aumento da

distância da extremidade resfriada, resultado compatível com a redução progressiva da taxa de resfriamento ao longo do corpo de prova.

Tabela 2 – Dureza Rockwell C em função da distância da extremidade resfriada

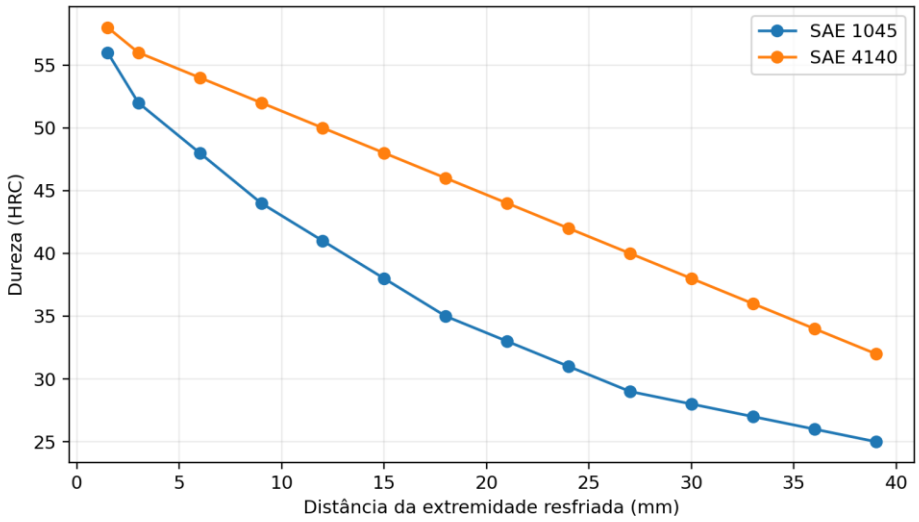
Distância (mm)	SAE 1045 (HRC)	SAE 4140 (HRC)
1,5	56	58
3	52	56
6	48	54
9	44	52
12	41	50
15	38	48
18	35	46
21	33	44
24	31	42
27	29	40
30	28	38
33	27	36
36	26	34
39	25	32

Fonte: Dados experimentais registrados no projeto original.

A Figura 6 apresenta graficamente os perfis de dureza. A separação progressiva entre as curvas nas posições intermediárias evidencia que a principal diferença entre os materiais não está apenas na dureza inicial, mas na capacidade do SAE 4140 de conservar níveis mais elevados de dureza quando a taxa de resfriamento diminui.

O SAE 1045 apresentou 56 HRC a 1,5 mm e 25 HRC a 39 mm, correspondendo a uma redução absoluta de 31 HRC e relativa de aproximadamente 55.4%. O SAE 4140 iniciou com 58 HRC e atingiu 32 HRC na última posição, redução de 26 HRC, equivalente a aproximadamente 44.8%. Embora ambos os materiais apresentem queda de dureza, o aço ligado conserva uma parcela maior da dureza inicial ao longo da distância.

Figura 6 – Perfis de dureza dos aços SAE 1045 e SAE 4140



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados experimentais do projeto.

A diferença entre as curvas foi de apenas 2 HRC na posição de 1,5 mm, mas aumentou nas regiões intermediárias e atingiu 11 HRC entre 18 e 27 mm. Considerando todas as posições, o SAE 4140 apresentou vantagem média de aproximadamente 8.4 HRC. Esse padrão é coerente com maior temperabilidade: próximo à extremidade, a severidade do resfriamento é suficiente para produzir elevada dureza nos dois aços; em regiões menos severamente resfriadas, a composição do SAE 4140 favorece a manutenção do endurecimento.

Em 30 mm, por exemplo, o SAE 1045 apresenta 28 HRC, enquanto o SAE 4140 registra 38 HRC. A diferença de 10 HRC nessa região demonstra, de forma didática, que materiais com durezas próximas sob resfriamento muito intenso podem apresentar desempenho bastante distinto em profundidade. Em componentes reais de maior seção, esse comportamento influencia a distribuição de propriedades mecânicas entre superfície e núcleo.

A interpretação microestrutural compatível com esse comportamento é que o SAE 4140 apresenta maior resistência às transformações difusionais durante o resfriamento, preservando maior potencial de formação de microestruturas endurecidas em taxas menores. Já o SAE 1045, por possuir menor contribuição de

elementos de liga, tende a perder dureza mais rapidamente com a redução da severidade do resfriamento. Essa análise está de acordo com os fundamentos de temperabilidade discutidos por Callister (2008) e Smith e Hashemi (2006).

4.3 Significado didático e aplicação em Engenharia Mecânica

Os resultados permitem explorar em aula uma sequência de raciocínio típica da engenharia de materiais. O estudante observa que a extremidade resfriada representa uma condição de alta severidade térmica e que as posições subsequentes representam taxas menores. Em seguida, relaciona o perfil de dureza à composição do aço e à possibilidade de formação de diferentes microestruturas. Por fim, conecta essa resposta à seleção de materiais para eixos, engrenagens, pinos e outros componentes em que a profundidade de endurecimento é relevante.

A bancada também permite discutir por que dureza superficial elevada não garante, isoladamente, comportamento adequado em seção. Um material pode apresentar valor alto próximo à superfície e queda acentuada em profundidade; outro pode manter valores mais elevados por uma extensão maior. Essa diferença tem consequências práticas na resistência ao desgaste, na fadiga de contato e no suporte mecânico de regiões endurecidas.

Outra contribuição importante é a possibilidade de incorporar atividades de melhoria experimental. Os estudantes podem avaliar influência da temperatura de austenitização, estabilidade da vazão, temperatura do fluido de resfriamento, posição do corpo de prova e preparação da superfície para dureza. Dessa maneira, a bancada deixa de ser apenas um demonstrador e passa a funcionar como plataforma para investigação de variáveis de processo, repetibilidade e incerteza.

4.4 Limitações e requisitos para validação futura

O planejamento inicial do projeto previa a avaliação de outros aços e a realização de etapas complementares, como análise química, dilatometria, metalografia e revenido. Entretanto, os resultados quantitativos consolidados nesta etapa correspondem às medições de dureza dos aços SAE 1045 e SAE 4140. Por

essa razão, a discussão e as conclusões foram delimitadas a esses materiais e às variáveis efetivamente medidas, mantendo a coerência entre objetivo, método e resultados.

A segunda limitação refere-se à geometria reduzida do corpo de prova. A ASTM A255-20a estabelece corpo de prova padronizado para o ensaio quantitativo, enquanto o projeto utiliza uma geometria menor. A bancada reproduz adequadamente o princípio físico de resfriamento em uma extremidade, mas a equivalência quantitativa com curvas normativas requer um programa específico de correlação. Uma possibilidade futura é ensaiar, no mesmo lote de material, corpos de prova padronizados em equipamento convencional e corpos reduzidos na bancada, comparando as curvas obtidas.

Também são necessários registros mais completos dos parâmetros de processo. Temperatura de austenitização, tempo de permanência, tempo de transferência, vazão do jato, diâmetro do bocal, temperatura inicial e final da água, condição superficial e calibração do durômetro devem ser documentados. O uso de termopares, pirômetro ou câmera térmica pode fortalecer a rastreabilidade do ciclo de aquecimento. Da mesma forma, a repetição dos ensaios e a análise estatística permitiriam avaliar a dispersão e a robustez da bancada.

Com essas melhorias, o equipamento poderá evoluir de demonstrador didático para uma plataforma experimental com maior capacidade de comparação quantitativa. Para ampliar a confiabilidade dos resultados, as próximas etapas deverão relacionar cada conclusão às variáveis medidas, aos procedimentos registrados e às respectivas condições de repetibilidade e incerteza.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento da bancada didática em escala reduzida mostrou-se tecnicamente adequado para demonstrar os princípios do ensaio Jominy e integrar conteúdos de tratamentos térmicos, transferência de calor, projeto mecânico e medição de dureza. A estrutura concebida reúne sistema hidráulico, cuba de resfriamento, componentes de proteção e aquecimento por indução, formando um recurso de baixo porte e aplicável ao ambiente acadêmico.

A análise dos dados disponíveis demonstrou comportamento distinto entre os aços SAE 1045 e SAE 4140. O SAE 1045 apresentou redução de 56 para 25 HRC entre 1,5 e 39 mm, enquanto o SAE 4140 variou de 58 para 32 HRC no mesmo intervalo. O SAE 4140 manteve dureza superior em todas as posições e apresentou diferença média de aproximadamente 8,4 HRC em relação ao SAE 1045. A maior separação entre as curvas ocorreu nas posições intermediárias, resultado compatível com maior temperabilidade do aço ligado.

Os objetivos de apresentar a bancada, analisar os perfis de dureza e demonstrar o conceito de temperabilidade foram atendidos com base nos resultados registrados para os aços SAE 1045 e SAE 4140. As etapas previstas para outros materiais e para análises complementares deverão ser concluídas experimentalmente antes de serem incorporadas às conclusões do projeto.

Como continuidade, recomenda-se padronizar e registrar os parâmetros térmicos e hidráulicos, realizar repetições independentes, documentar a calibração do durômetro e executar uma comparação com corpos de prova nas dimensões normativas da ASTM A255-20a. Essas ações permitirão quantificar a repetibilidade e estabelecer uma correlação entre a bancada didática em escala reduzida e o ensaio convencional, ampliando a qualidade científica e a utilidade da plataforma em projetos futuros.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A255-20a: **Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 6508-1: **Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell** - Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

CALLISTER, William D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de ciência e engenharia dos materiais.** 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

VAN VLACK, Lawrence H. **Elementos de ciência e engenharia de materiais.** 6. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

VILLA, Rogério Dias Costa; SILVA, Ricardo. **Tratamentos térmicos dos aços: teoria, prática e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2020.

Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.