

CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO JOMINY PARA OBTENÇÃO DE CURVAS DE TEMPERABILIDADE EMPREGANDO O AÇO AISI/SAE 4140

Dyego Fernandes Silva, dyegofernandestw@gmail.com¹

Luan Marcel Costa Vasconcelos, luanvasconcelos8@hotmail.com¹

Frank de Mello Liberato, frank.mello@ifmg@ifmg.edu.br¹

Felipe Farage David, felipe.farage@ifmg.edu.br¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Congonhas, Av. Michael Pereira de Souza, 3007, Campinho, 36417-050, Congonhas-MG.

Resumo. O aço está presente no cotidiano das mais diversas formas. Devido a diversidade de suas aplicações, tornou-se necessário a caracterização do material, bem como, a busca por alternativas de diminuir os custos de produção, garantir viabilidade econômica e ganhar competitividade no mercado. Tratando-se de aço, questões envolvendo a redução do consumo de matéria prima e os impactos ambientais estão sempre em pauta, necessitando constantemente de inovações no setor. O processo de tratamento térmico denominado têmpera realizados nos aços, tem por objetivo aumentar a dureza e a resistência dos aços, através da formação da estrutura martensítica. O presente trabalho tem como objetivo a construção de um dispositivo Jominy de baixo custo para realização de ensaios de temperabilidade. Foram realizados ensaios em amostras de aço do tipo AISI/SAE 4140, com a intenção de comparar os valores da literatura com os resultados obtidos nos ensaios. O projeto possui importância por se tratar da construção de um novo equipamento para uma instituição de ensino, incentivando o desenvolvimento de produções acadêmicas futuras utilizando esse equipamento. O dispositivo construído demonstrou-se funcional e adaptável. Juntamente com a metodologia aplicada na realização dos ensaios, foi possível a obtenção de resultados de acordo com a norma ASTM A255.

Palavras chave: Dispositivo Jominy, Temperabilidade, Dureza, Têmpera, Aço AISI/SAE 4140.

Abstract. Steel is present in everyday life in many different ways. Due to the diversity of its applications, it became necessary to characterize the material, as well as the search for alternatives to reduce production costs, guarantee economic viability and gain competitiveness in the market. In the case of steel, issues involving the reduction of consumption of raw materials and environmental impacts are always on the agenda, constantly needing innovations in the sector. The heat treatment process called quenching performed on steels, aims to increase the hardness and resistance of the steels, through the formation of the martensitic microstructure. The present work aims to build a low cost Jominy device for conducting hardenability tests. Tests were carried out on steel samples of type AISI/SAE 4140, with the intention of comparing the values in the literature with the results obtained in the tests. The project is important because it involves the construction of new equipment for an educational institution, encouraging the development of future academic productions using this equipment. The built device proved to be functional and adaptable. Along with the methodology applied in carrying out the tests, it was possible to obtain results in accordance with the ASTM A255 standard.

Keywords: Jominy Device, Hardenability, Hardness, Quenching, AISI/SAE 4140 steel.

1. INTRODUÇÃO

Frente às exigências do mercado e do cenário de desenvolvimento tecnológico e econômico impostos às empresas, inovações tem ganhado cada vez mais espaço e notoriedade. As inovações se apresentam de diferentes formas e podem gerar impactos incrementais ou radicais sobre produtos e sistemas de produção. As inovações incrementais estão relacionadas com melhoria de produto e processo, enquanto as radicais seguem a linha de desenvolvimento de novos produtos e processos, com melhorias em relação aos existentes (Freixanet, 2020; Park, 2020; Vögele *et. al.*, 2020).

O aço está presente em nosso cotidiano das mais diversas formas. A sua utilização é tão ampla que torna impossível visualizar o mundo sem o aço, deixando clara a dependência desse material e todas as evoluções tecnológicas que em sua função ao longo dos anos (Ismail, 2014; Stinville *et. al.*, 2010; Tomków *et. al.*, 2018).

Ao longo das últimas décadas, o setor industrial não cessou a busca por alternativas para diminuir os custos, garantir viabilidade econômica e ganhar competitividade no mercado. Questões envolvendo a redução do consumo de matéria

prima e os impactos ambientais estão sempre em pauta, fomentando a necessidade de inovações constantes no setor (Burgan, 2006; Miśkiewicz, 2020; Quader *et. al.*, 2015).

Através da modificação da microestrutura do material é possível melhorar algumas propriedades, como a resistência mecânica e dureza, sem que outras propriedades, como a tenacidade, sejam prejudicadas. Desta forma, a utilização de processos termomecânicos envolve a busca de microestruturas apropriadas, para que sejam garantidas as melhores propriedades possíveis e uma maior vida útil de um componente (Soleimani, 2021; Zhang *et. al.*, 2020).

Torna-se importante a caracterização do material ao longo de suas dimensões, como forma de prevenção de falhas. Uma das características do aço é a temperabilidade, que pode ser definida como a capacidade de endurecimento ou a capacidade de se obter estrutura martensítica. A temperabilidade pode ser obtida através de alguns ensaios, dentre eles pode-se destacar o ensaio Jominy, que será o objeto de estudo deste trabalho (Akinlabi *et. al.*, 2020).

O ensaio Jominy consiste no aquecimento de um corpo de prova com dimensões pré-determinadas até a temperatura de austenização, de acordo com a norma ASTM A255. Em seguida é feito o resfriamento por meio do lançamento de um jato de água controlado, em uma das extremidades do material, em temperatura ambiente. Após o processo de têmpera, são medidos os valores de dureza ao longo do comprimento do corpo de prova e com os valores é possível gerar a curva de temperabilidade, que é específica para cada aço e permitem obter dados importantes para a determinação de campos da sua utilização (ASTM, 2002).

O principal objetivo deste trabalho é a construção de um dispositivo de ensaio Jominy e a validação de sua eficiência através de ensaios que se provem coerentes. Para isso, será realizada a elaboração de um projeto para a construção e utilização do dispositivo.

2. METODOLOGIA

O presente trabalho tem como uma das suas diretrizes o aproveitamento de materiais presentes nos laboratórios do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – Campus Congonhas. Para que eles tenham uma saída viável de estudo, portanto, o dimensionamento do dispositivo se baseou nas dimensões de um tambor de descarte que se encontrava sem uso. A norma adotada para a construção do dispositivo foi a ASTM A255 (ASTM, 2002), com a finalidade de obter as curvas de temperabilidade de dois corpos de prova do aço SAE 4140. Além de testar a funcionalidade do dispositivo Jominy.

Em seguida, foi elaborada uma lista de materiais e equipamentos necessários para o desenvolvimento do projeto. Os materiais utilizados na construção do dispositivo Jominy foram: tambor de descarte (capacidade de 70 litros, com 630 mm de altura e 420 mm de diâmetro aproximadamente); tarugos de aço doados ao laboratório, do tipo SAE 4140; tubos e conexões de PVC; chapas de aço do tipo SAE 1020; cola para PVC; válvula de controle; válvula abre e fecha; bocal de cobre e; mangueira. Os equipamentos que foram utilizados para a montagem do dispositivo se encontram nos laboratórios de mecânica, do IFMG – Campus Congonhas. São eles: Esmerilhadeira; máquina de solda para eletrodo revestido; serra fita; torno universal; fresadora; forno Mufla microprocessado; durômetro Vickers e; instrumentos de medição (paquímetro e escala).

2.1. Construção do dispositivo Jominy

Com base na dimensão de diâmetro do tambor utilizado, foi projetado o dispositivo para fixação do jato de água e da amostra, conforme mostrado nas Figuras 1 e 2. O tambor também atua como um dispositivo para retenção da água durante o ensaio Jominy.

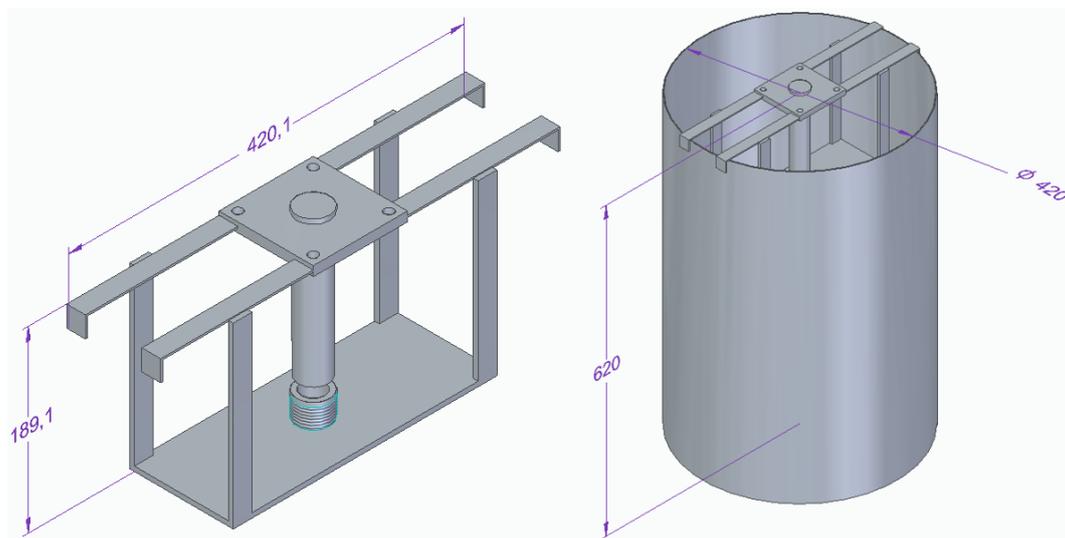


Figura 1. Modelo tridimensional do dispositivo Jominy: suporte para o posicionamento da amostra e do jato d'água (à esq.); suporte montado no tambor (à dir.). Medidas em mm. (Os autores, 2020)

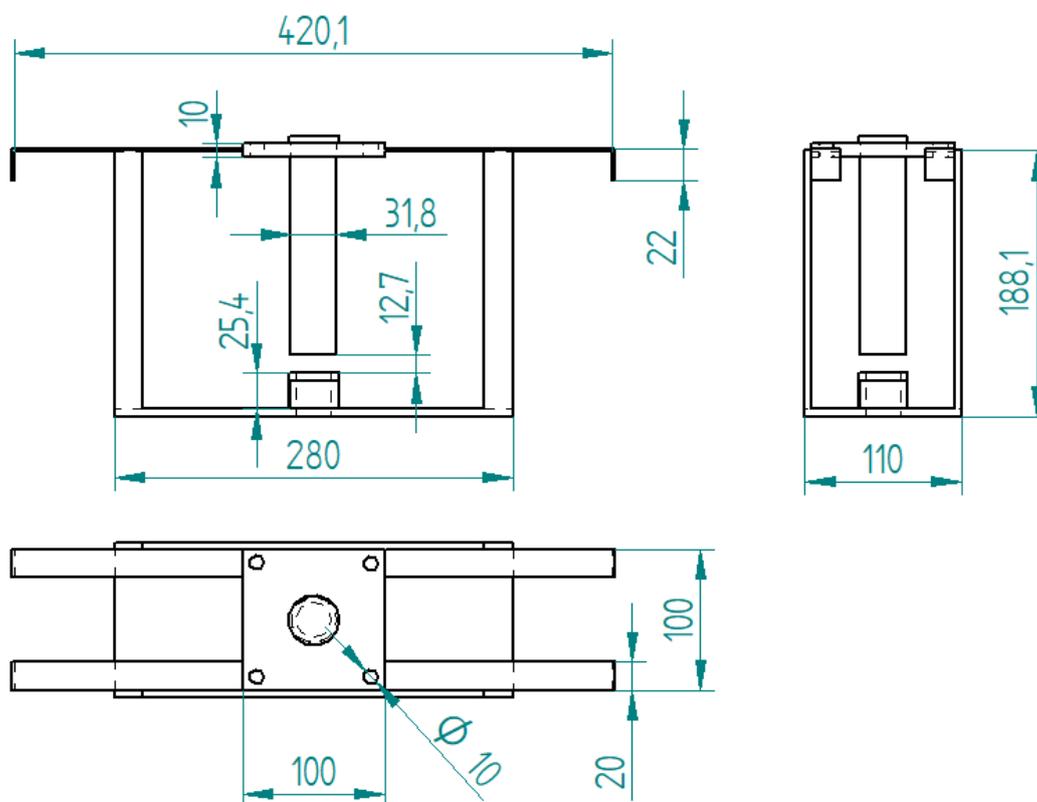


Figura 2. Vistas do desenho do suporte do dispositivo Jominy. Medidas em mm. (Os autores, 2020)



Figura 3. Amostra sendo submetida ao ensaio de temperabilidade no dispositivo Jominy, fabricado e montado no tambor de descarte (esq.); Detalhes da instalação dos canos de alimentação e de drenagem de água no dispositivo para ensaio Jominy (dir.) (Os autores, 2020)

Com base no projeto (Figura 2), criou-se o suporte de aço, buscando construir e executar o dispositivo Jominy de acordo com as medidas apresentadas. Pois assim é possível transformar o projeto em um produto funcional. O suporte para a colocação do corpo de prova, foi soldado junto a chapas de contenção de calor e adaptado para encaixe na parede do tambor. Para sua sustentação, foi necessário a colocação de chapas de aço (com formato de ganchos) em quatro pontos, dois na borda superior e dois na parte interior da parede. Dessa forma se torna possível a retirada do suporte como um todo. Fazendo com que o tambor possa ser utilizado para outras finalidades.

Todo o suporte é adaptável, para realização de ensaios de diferentes maneiras e tamanhos de corpos de prova. A placa central superior possui um furo de 25,4 mm (1") e é utilizada para suportar o corpo de prova. Essa placa pode ser substituída por outra com valor de diâmetro de furo diferente, apenas com a retirada dos quatro parafusos que a prendem. O conjunto foi montado de maneira uniforme, e possui uma distância aproximada de 188 mm (7,4") entre a placa superior e inferior, ocasionando na perpendicularidade entre os dois furos centrais (furo da placa central superior e furo do bocal de saída de água inferior).

Lembrando que, segundo a norma ASTM A255, o diâmetro do corpo de prova é de 25,4 mm (1") por 101,6 mm (4") de comprimento. Sendo que o bocal fica localizado a 12,7 mm (1/2") da parte inferior do corpo de prova.

Para a instalação do bocal foi necessário a abertura de rosca no furo do bocal apresentado acima. Dessa maneira, ao se rosquear o bocal junto ao furo, torna-se possível alterar sua altura, ajustando os parâmetros necessários para o ensaio.

O bocal escolhido é feito de cobre, para suportar as altas temperaturas provenientes do ensaio, e possui o diâmetro de 12,7 mm (1/2"). Uma mangueira é acoplada a esse bocal, sendo a responsável pelo acesso da água no processo. Como o suporte foi soldado de forma universal, facilitou o jato d'água a ser perpendicular a parte de baixo do corpo de prova.

Com o objetivo de controlar a vazão de água do processo, foi adaptado um sistema com canos PVC e duas válvulas controladoras. Uma para controle da quantidade de água e outra para abrir e fechar instantaneamente a água no processo. A altura do jato (63,5 mm ou 2 1/2") é medida antes do início do processo, quando não se há interferência dos corpos de prova. Após ser ajustado a segunda válvula entra em ação, fazendo com que a água só seja acionada no processo, quando o corpo de prova for retirado do forno mufla e colocado para o início do ensaio.

Todo esse sistema foi alimentado pela torneira do laboratório de ensaios mecânicos e metalográficos, que está acoplada a mangueira. Ao realizar o ajuste o processo pôde-se afirmar que o sistema de alimentação possuía a vazão necessária (instituída pela norma) para realização do procedimento. O dispositivo montado pode ser visto na Figura 3.

2.2. Confeção dos corpos de prova

Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizados os tarugos doados ao IFMG - Campus Congonhas, corpos de prova dos quais não foram possíveis adquirir sua composição química. Todo o trabalho foi feito na porcentagem média de composição de cada aço.

Os tarugos foram cortados na serra fita e usinados em um torno universal, dessa maneira, transformados em pinos, com diâmetro de 25,4 mm (1") e 101,6 mm (4") de comprimento. Após a fabricação, as amostras foram identificadas com marcações utilizando punção e escrita. Em seguida, os corpos de prova (CP1 e CP2) foram levados a um forno mufla, um de cada vez, a uma temperatura de 930°C por 30 minutos. Após o tempo de austenitização, efetuou-se a retirada do CP1 primeiramente, colocando-o no dispositivo Jominy, que estava seco. Foram tomadas precauções para que o ensaio se iniciasse de maneira rápida, para evitar que a amostra perdesse a sua temperatura para o ar. O dispositivo estava ajustado com 63,4 mm (2,5") de altura do jato d'água, que se manteve constante e com uma temperatura de 23°C. Ao ser levado ao dispositivo a alimentação de água foi ligada para dar início ao ensaio, que teve a duração aproximada de 10 min. O mesmo procedimento foi repetido para o CP2.

Ao término do tempo do ensaio, os corpos de prova foram resfriados totalmente no próprio tambor. Lembrando que não existe refluxo de água, a mesma era corrente e descartada. Para dar continuidade ao processo, os corpos de prova foram levados a fresadora, do qual cada lado em 180° foi usinado em 4mm de profundidade, para a criação de uma superfície plana para a realização dos ensaios de dureza, que serão descritos a seguir.

2.3. Realização dos ensaios de dureza

Para a obtenção dos valores de dureza nas medidas de distância corretas para a construção das curvas de temperabilidade, foi necessário um ajuste no durômetro Vickers presente no laboratório. O durômetro não possui uma morsa que consiga movimentar o corpo nas medidas exigidas por norma. Assim, foi criado um mecanismo junto a uma escala móvel, que resolveu o problema e permitiu uma padronização no processo de medição.

Antes da realização dos ensaios nas amostras de aço do tipo SAE 4140, foi utilizada uma amostra padrão, para verificação da calibração do durômetro Vickers, realizando 3 ensaios em pontos distintos dessa amostra padrão. Após isso, os resultados foram comparados com o histórico de resultados armazenados, apresentando uma média aproximada e assim confirmando a calibração do equipamento.

Os ensaios de dureza foram realizados em todos os pontos indicados pela norma, segundo as seguintes distâncias da borda da amostra que foi atingida pelo jato de água: a cada 1,59 mm (1/16") até a 16ª medida, e após isso, adotou-se a

distância de 3,18 mm (1/8”) entre as indentações, até chegar a 50,8 mm (2”) (24ª medida). A carga aplicada foi de 30 Kgf pelo tempo de 20 segundos. Em cada amostra, foram realizados dois ensaios em cada ponto de distância, sendo um em cada face usinada. Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente.

3. RESULTADOS

Após a medição das distâncias e a utilização do durômetro Vickers, seguindo as recomendações da norma ASTM A255, foram encontrados os valores, em cada um dos lados, dos corpos de prova. Foram calculadas as médias dos valores de dureza obtidos em uma mesma distância, nos dois lados de cada amostra, para os dois tipos de dureza, Vickers e Rockwell. Os valores em Rockwell C foram fornecidos pelo durômetro Vickers no decorrer dos ensaios. As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores de dureza obtidos nos ensaios, média e desvio padrão calculados, para os corpos de prova 1 e 2, respectivamente. Já as Tabelas 3 e 4 mostram os intervalos de confiança, limites inferior e superior, calculados para ambas as amostras.

Tabela 1. Valores de dureza e desvio padrão para a construção da curva de temperabilidade para o corpo de prova 1 (Os autores, 2020)

Distância [mm]	Distância [pol.]	Corpo de prova 1							
		Face 1		Face 2		Dureza Vickers Média [HVm]	Dureza Rockwell Média [HRCm]	Desvio Padrão HV	Desvio Padrão HRC
		Dureza Vickers [HV]	Dureza Rockwell C [HRC]	Dureza Vickers [HV]	Dureza Rockwell C [HRC]				
1,59	1/16	719,2	60,9	733,1	61,5	726,2	61,2	9,8	0,4
3,18	2/16	681,5	59,3	709	60,5	695,3	59,9	19,4	0,8
4,76	3/16	681,8	59,3	705,9	60,3	693,9	59,8	17,0	0,7
6,35	4/16	677,5	59,1	664,3	58,5	670,9	58,8	9,3	0,4
7,94	5/16	671,2	58,8	670,1	58,8	670,7	58,8	0,8	0,0
9,53	6/16	672,4	58,9	664,3	58,5	668,4	58,7	5,7	0,3
11,11	7/16	664,8	58,5	658,2	58,2	661,5	58,4	4,7	0,2
12,70	8/16	675,8	59,0	662,6	58,4	668,9	58,7	8,9	0,4
14,23	9/16	652,8	57,9	645,9	57,6	649,4	57,8	4,9	0,2
15,88	10/16	657,1	58,1	636,7	57,1	646,9	57,6	14,4	0,7
17,46	11/16	647,7	57,7	642,7	57,4	645,2	57,6	3,5	0,2
19,05	12/16	639,6	57,3	652,8	57,9	646,2	57,6	9,3	0,4
20,64	13/16	623,9	56,5	660,1	58,3	642,0	57,4	25,6	1,3
22,23	14/16	628,0	56,7	628,0	56,7	628,0	56,7	0,0	0,0
23,81	15/16	625,7	56,6	650,1	57,8	637,9	57,2	17,3	0,8
25,40	1	625,7	56,8	658,5	58,2	643,8	57,5	20,9	1,0
28,58	1 1/8	629,0	57,1	634,9	57,0	635,7	57,1	1,1	0,1
31,75	1 2/8	636,4	57,2	633,3	57,0	635,7	57,1	3,3	0,1
34,93	1 3/8	643,5	57,5	640,3	57,3	641,9	57,4	2,3	0,1
38,10	1 4/8	621,2	56,4	625,7	56,6	623,5	56,5	3,2	0,1
41,28	1 5/8	629,5	56,8	642,2	57,4	635,9	57,1	9,0	0,4
44,45	1 6/8	608,1	55,7	625,9	56,6	617,0	56,2	12,6	0,6
47,63	1 7/8	604,0	55,5	597,8	55,1	600,9	55,3	4,4	0,3
50,80	2	546,6	52,1	566,3	53,3	556,5	52,7	13,9	0,8

Tabela 2. Valores de dureza e desvio padrão para a construção da curva de temperabilidade para o corpo de prova 2 (Os autores, 2020)

Distância [mm]	Distância [pol.]	Corpo de prova 2							
		Face 1		Face 2		Dureza Vickers Média [HVm]	Dureza Rockwell Média [HRCm]	Desvio Padrão HV	Desvio Padrão HRC
		Dureza Vickers [HV]	Dureza Rockwell C [HRC]	Dureza Vickers [HV]	Dureza Rockwell C [HRC]				
1,59	1/16	702,9	60,2	734,3	61,5	718,6	60,9	22,2	0,9
3,18	2/16	688,1	59,6	730,8	61,4	709,5	60,5	30,2	1,3

4,76	3/16	677,7	59,1	714,8	60,7	696,3	59,9	26,2	1,1
6,35	4/16	665,9	58,6	689,9	59,6	677,9	59,1	17,0	0,7
7,94	5/16	654,7	58,0	695,8	59,9	675,3	59,0	29,1	1,3
9,53	6/16	645,1	57,6	709,9	60,5	677,5	59,1	45,8	2,1
11,11	7/16	649,6	57,8	684,6	59,4	667,1	58,6	24,7	1,1
12,70	8/16	643,2	57,5	678,0	59,1	660,6	58,3	24,6	1,1
14,23	9/16	636,4	57,1	678,0	59,1	657,2	58,1	29,4	1,4
15,88	10/16	642,7	57,4	674,1	59,0	658,4	58,2	22,2	1,1
17,46	11/16	646,1	57,6	683,8	59,4	665,0	58,5	26,7	1,3
19,05	12/16	630,3	56,8	669,8	58,8	650,1	57,8	27,9	1,4
20,64	13/16	633,8	57,0	680,9	59,3	657,4	58,2	33,3	1,6
22,23	14/16	635,1	57,1	685,5	59,5	660,3	58,3	35,6	1,7
23,81	15/16	632,0	56,9	682,6	59,3	657,3	58,1	35,8	1,7
25,40	1	628,7	56,7	669,3	58,7	649,0	57,7	28,7	1,4
28,58	1 1/8	613,2	56,0	662,6	58,4	637,9	57,2	34,9	1,7
31,75	1 2/8	584,8	54,4	639,0	57,3	611,9	55,9	38,3	2,1
34,93	1 3/8	554,3	52,6	592,2	54,8	573,3	53,7	26,8	1,6
38,10	1 4/8	524,2	50,7	546,0	52,1	535,1	51,4	15,4	1,0
41,28	1 5/8	507,0	49,6	526,4	50,8	516,7	50,2	13,7	0,8
44,45	1 6/8	487,5	48,2	505,4	49,4	496,5	48,8	12,7	0,8
47,63	1 7/8	462,0	46,3	491,9	48,5	477,0	47,4	21,1	1,6
50,80	2	442,3	44,6	472,2	47,0	457,3	45,8	21,1	1,7

Tabela 3. Intervalo de confiança, limites inferior e superior, calculados para o corpo de prova 1 (Os autores, 2020)

Distância [mm]	Distância [pol.]	Corpo de prova 1					
		Dureza Vickers [HV]			Dureza Rockwell C [HRC]		
		Intervalo de Confiança	Limite Inferior	Limite Superior	Intervalo de Confiança	Limite Inferior	Limite Superior
1,59	1/16	13,62	712,5	739,8	0,59	60,6	61,8
3,18	2/16	26,95	668,3	722,2	1,18	58,7	61,1
4,76	3/16	23,62	670,2	717,5	0,98	58,8	60,8
6,35	4/16	12,94	658,0	683,8	0,59	58,2	59,4
7,94	5/16	1,08	669,6	671,7	-	-	-
9,53	6/16	7,94	660,4	676,3	0,39	58,3	59,1
11,11	7/16	6,47	655,0	668,0	0,29	58,1	58,6
12,70	8/16	12,35	656,6	681,2	0,59	58,1	59,3
14,23	9/16	6,76	642,6	656,1	0,29	57,5	58,0
15,88	10/16	19,99	626,9	666,9	0,98	56,6	58,6
17,46	11/16	4,90	640,3	650,1	0,29	57,3	57,8
19,05	12/16	12,94	633,3	659,1	0,59	57,0	58,2
20,64	13/16	35,48	606,5	677,5	1,76	55,6	59,2
22,23	14/16	-	-	-	-	-	-
23,81	15/16	23,91	614,0	661,8	1,18	56,0	58,4
25,40	1	28,91	614,8	672,7	1,37	56,1	58,9
28,58	1 1/8	1,47	634,2	637,1	0,10	57,0	57,1
31,75	1 2/8	4,61	631,0	640,3	0,20	56,9	57,3
34,93	1 3/8	3,14	638,8	645,0	0,20	57,2	57,6
38,10	1 4/8	4,41	619,0	627,9	0,20	56,3	56,7
41,28	1 5/8	12,45	623,4	648,3	0,59	56,5	57,7
44,45	1 6/8	17,44	599,6	634,4	0,88	55,3	57,0
47,63	1 7/8	6,08	594,8	607,0	0,39	54,9	55,7
50,80	2	19,31	537,1	575,8	1,18	51,5	53,9

Tabela 4. Intervalo de confiança, limites inferior e superior, calculados para o corpo de prova 2 (Os autores, 2020)

Distância [mm]	Distância [pol.]	Corpo de prova 2					
		Dureza Vickers [HV]			Dureza Rockwell C [HRC]		
		Intervalo de Confiança	Limite Inferior	Limite Superior	Intervalo de Confiança	Limite Inferior	Limite Superior
1,59	1/16	30,77	687,8	749,4	1,27	59,6	62,1
3,18	2/16	41,85	667,6	751,3	1,76	58,7	62,3
4,76	3/16	36,36	659,9	732,6	1,57	58,3	61,5
6,35	4/16	23,52	654,4	701,4	0,98	58,1	60,1
7,94	5/16	40,28	635,0	715,5	1,86	57,1	60,8
9,53	6/16	63,50	614,0	741,0	2,84	56,2	61,9
11,11	7/16	34,30	632,8	701,4	1,57	57,0	60,2
12,70	8/16	34,10	626,5	694,7	1,57	56,7	59,9
14,23	9/16	40,77	616,4	698,0	1,96	56,1	60,1
15,88	10/16	30,77	627,6	689,2	1,57	56,6	59,8
17,46	11/16	36,95	628,0	701,9	1,76	56,7	60,3
19,05	12/16	38,71	611,3	688,8	1,96	55,8	59,8
20,64	13/16	46,16	611,2	703,5	2,25	55,9	60,4
22,23	14/16	49,39	610,9	709,7	2,35	55,9	60,7
23,81	15/16	49,59	607,7	706,9	2,35	55,7	60,5
25,40	1	39,79	609,2	688,8	1,96	55,7	59,7
28,58	1 1/8	48,41	589,5	686,3	2,35	54,8	59,6
31,75	1 2/8	53,12	558,8	665,0	2,84	53,0	58,7
34,93	1 3/8	37,14	536,1	610,4	2,16	51,5	55,9
38,10	1 4/8	21,36	513,7	556,5	1,37	50,0	52,8
41,28	1 5/8	19,01	497,7	535,7	1,18	49,0	51,4
44,45	1 6/8	17,54	478,9	514,0	1,18	47,6	50,0
47,63	1 7/8	29,30	447,6	506,3	2,16	45,2	49,6
50,80	2	29,30	427,9	486,6	2,35	43,4	48,2

Com posse dos dados das tabelas, foi possível a construção dos gráficos representando as curvas de temperabilidade para os dois corpos de prova de aço SAE 4140.

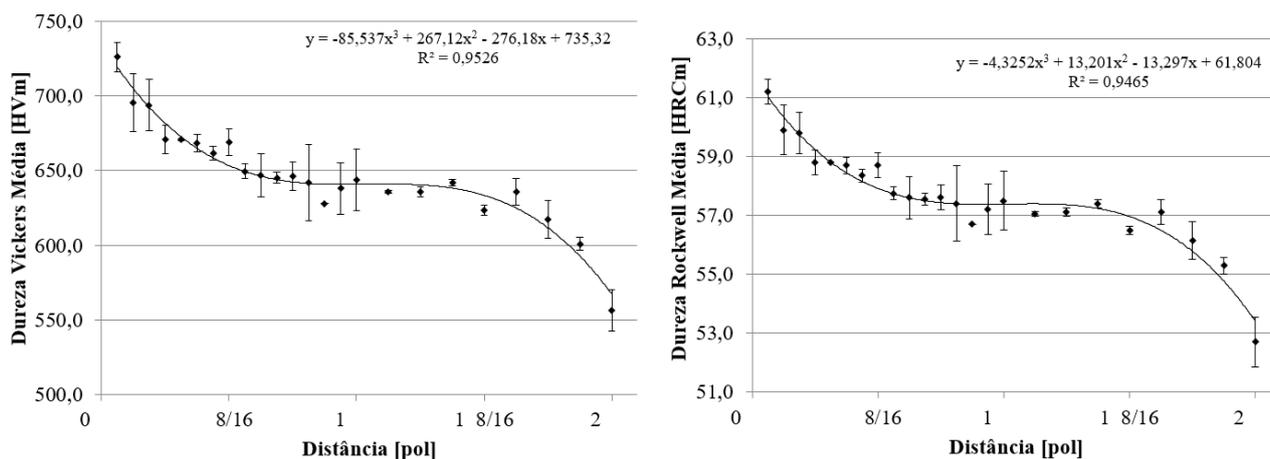


Figura 4. Curvas de temperabilidade para o corpo de prova 1, utilizando os valores de dureza Vickers (esq.) e utilizando os valores de dureza Rockwell C (dir.) (Os autores, 2020)

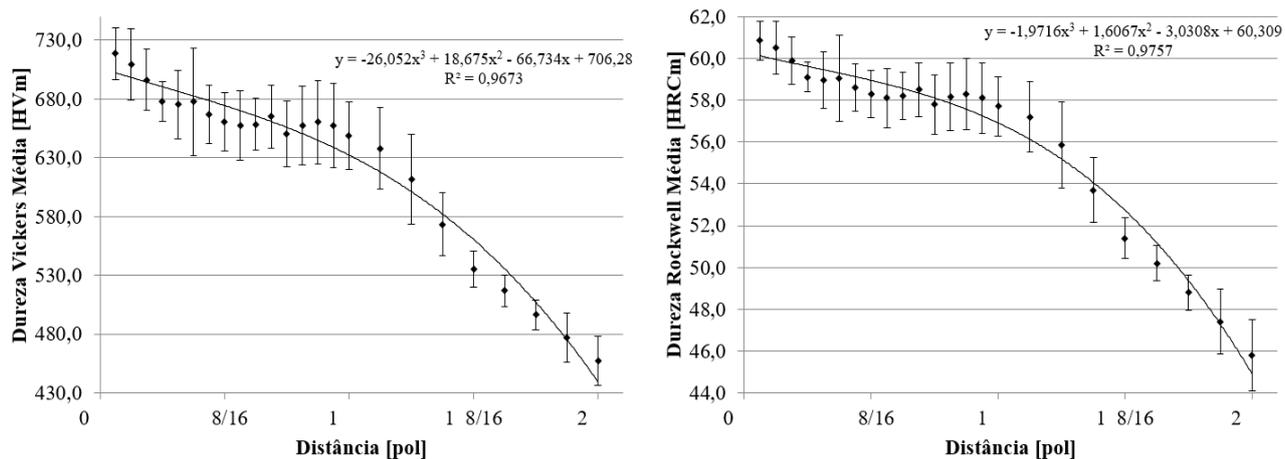


Figura 5. Curvas de temperabilidade para o corpo de prova 2, utilizando os valores de dureza Vickers (esq.) e utilizando os valores de dureza Rockwell C (dir.) (Os autores, 2020)

Para alguns pontos não foi possível calcular o intervalo de confiança, nem os limites inferior e superior, devido ao fato de não ter havido diferença entre os valores de dureza obtidos nos ensaios (5ª e 14ª medidas do CP1).

O maior valor de dureza encontrado foi de 61,2 HRC (CP1) e o menor valor encontrado foi o de 45,8 (CP2). Foram traçadas em todos os gráficos regressão polinomial de terceiro grau, exibindo coeficientes de determinação R^2 com valores acima de 0,94. Isso significa que as equações geradas descrevem com muita segurança o comportamento das curvas de temperabilidade. As equações de terceiro grau e seus respectivos valores de R^2 para cada gráfico se encontram nas Figuras 4 e 5.

4. DISCUSSÃO

Comparando os dois corpos de prova, encontrou-se uma diferença máxima de dureza em um mesmo ponto de 14%, na 23ª medida (47,63 mm ou 1 7/8"). Os maiores valores de dureza foram encontrados nesses corpos de prova, no CP1 o valor foi de 61,2 HRC e no CP2 o valor foi de 60,9 HRC. Ambos encontrados na primeira medida (1,59 mm ou 1/16"), mais próximo do local onde o jato de água realizou a têmpera primeiro, formando uma maior quantidade martensita, logo, conferindo maior dureza ao aço naquele local. (Graf *et. al.*, 2020)

Para comparação dos resultados presentes na literatura, teve-se como base os trabalhos de Ahadi Akhlaghi *et. al.* (2020) e de Franco (2013), foi possível realizar uma comparação de resultados, tendo em vista que eles também utilizaram o aço SAE 4140 em seus trabalhos.

Ambos os autores disponibilizaram as composições químicas dos respectivos aços utilizados, o que não acontece neste trabalho (Tabela 5). Para as amostras de aço utilizadas neste presente trabalho não foi possível a obtenção de sua composição química.

Tabela 5. Composição química das amostras de aço SAE 4140 encontradas na literatura (teores em % de massa) (Ahadi Akhlaghi *et. al.*, 2020 e Franco, 2013)

Autor	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
Ahadi Akhlaghi, I.	0,416	0,800	0,420	0,020	0,001	0,230	-	0,047
Franco, F.	0,390	0,870	0,240	0,021	0,026	0,980	0,020	0,170

Ahadi Akhlaghi *et. al.* (2020) obteve ao final dos ensaios de dureza um valor máximo de 55,5 HRC na parte mais próxima à ponta submetida ao jato d'água, a aproximadamente 0,5 cm de distância, e um valor de menor dureza de 31,5 HRC, obtido a aproximadamente 8,5 cm de distância da ponta temperada. Já Franco (2013), obteve um valor máximo de dureza 52 HRC, obtido a aproximadamente 9 mm da ponta temperada, e um valor mínimo de 34 HRC, obtido a aproximadamente 45 mm da ponta temperada. Com o conhecimento dos valores de dureza e distância da ponta temperada a que foram obtidos, foi possível a elaboração da Tabela 6, comparando os valores de dureza encontrados nos experimentos deste trabalho com os encontrados na literatura.

Tabela 6. Comparação entre os valores encontrados para dureza (Ahadi Akhlaghi *et. al.*, 2020 e Franco, 2013)

Autor	Distância aprox. [mm]	Dureza máxima [HRC]	Diferença [%]	Distância aprox. [mm]	Dureza mínima [HRC]	Diferença [%]
Os autores, 2020	1,6	61,2	-	50,8	45,8	-
Ahadi Akhlaghi, 2020	5,0	55,5	9,3	85,0	31,5	31,2
Franco, 2013	9,0	52	15,0	45,0	34,0	25,8

Analisando os dados da Tabela 6, foi possível observar uma diferença máxima de aproximadamente 15% entre os valores de dureza máxima encontrados nos experimentos e na literatura. As diferenças de valores mínimos de dureza encontrados foram mais expressivas, em torno de 31%. Porém, é importante observar as distâncias em que cada valor de dureza foi obtido. No geral, todos os três trabalhos apresentam curvas de temperabilidade com comportamento semelhante.

Outro fator que pode ter influenciado nas durezas encontradas nos trabalhos é a composição química do aço. Segundo Graf (2020), a composição química do aço é uma das causas que pode causar alterações na morfologia da martensita a ser formada. Apesar de ambos os aços analisados neste trabalho serem do mesmo tipo (AISI/SAE 4140), eles não possuem a mesma composição química.

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo principal a criação de um dispositivo funcional e adaptável, para realização de ensaios de temperabilidade do tipo Jominy, buscando reutilizar ao máximo materiais disponíveis nos laboratórios do IFMG – Campus Congonhas, tornando a construção desse dispositivo de baixo custo e viável.

É possível afirmar que o dispositivo Jominy é funcional dentro do processo adotado, alguns fatores comprovam isso como por exemplo: o maior valor de dureza medido sempre foi o obtido na primeira medida 1,59 mm (1/16”) e, entre uma medida e outra, a diferença de valores de dureza foi inferior a 4 HRC, atendendo as especificações da norma.

Todavia ter um dispositivo que consiga estudar a temperabilidade é importante para o desenvolvimento de produções acadêmicas e caracterização de materiais. Como por exemplo: a diferenciação de têmpera entre fabricantes de uma mesma entrega, adição de ligas em aços para estudo, entre outros.

Embora nem todos os valores foram exatamente os encontrados na literatura, o estudo representou um grande aprendizado, cumprindo com os objetivos pré-estabelecidos no início do processo.

Contudo, é possível afirmar que foi de grande valia o estudo, tanto para o aluno, como para instituição. De agora em diante será possível caracterizar novas formas de aço de baixo carbono e retirar suas curvas de forma confiável e de acordo com a norma.

Para trabalhos futuros, os autores sugerem:

Dar continuidade para o trabalho presente, otimizando os resultados com: análise dos componentes químicos presentes nas amostras ensaiadas, fazendo o levantamento de suas características, como tamanho de grão e, a utilização de um software para mostra da possível curva.

Para realização de novos ensaios é necessário ajustar melhor a metodologia, seguindo os ensinamentos presentes nesse trabalho, otimizar a saída do dispositivo, aumentar a vazão de saída e elaborar uma forma de reutilizar a água para um desenvolvimento mais sustentável dos ensaios.

Fica aberta a possibilidade de estudos futuros relacionados ao ensaio de outros materiais ferrosos, visando mais conhecimento na área de aplicação de tratamentos térmicos de diversos materiais como forma de obter melhores propriedades mecânicas.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Congonhas (IFMG – Campus Congonhas) pela estrutura cedida, fazendo com que fosse possível a realização dos experimentos necessários para a produção deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- AHADI AKHLAGHI, I.; KAHROBAEE, S.; AKBARZADEH, A.; KASHEFI, M.; KRAUSE, T. W. Predicting hardness profile of steel specimens subjected to Jominy test using an artificial neural network and electromagnetic nondestructive techniques. *Nondestructive Testing and Evaluation*, p. 1–17, 4 jun. 2020.
- AKINLABI, E.; IKUMAPAYI, O. M.; BODUNDE, O. P.; ADARAMOLA, B. A.; UCHEGBU, I. D.; FATOBA, S. O. Impact of Quenching on the Hardenability of Steels EN-3 (~1015), EN-8 (~1040) and EN-24 (~4340) during Jominy End Quench Technique. v. 11, p. 290–297, 30 set. 2020.

- ASTM, I. S. W. A255-02 Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel. West Conshohocken (us): [s.n.], v. 01.05, 2002.
- BURGAN, B. A.; SANSOM, M. R. Sustainable steel construction. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 62, n. 11, p. 1178–1183, nov. 2006.
- FRANCO, F. A.; GONZÁLEZ, M. F. R.; CAMPOS, M. F. Relation Between Magnetic Barkhausen Noise and Hardness for Jominy Quench Tests in SAE 4140 and 6150 Steels. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 32, n. 1, p. 93–103, mar. 2013.
- FREIXANET, J.; RIALP, A.; CHURAKOVA, I. How do innovation, internationalization, and organizational learning interact and co-evolve in small firms? a complex systems approach. *Journal of Small Business Management*, v. 58, n. 5, p. 1030–1063, 2 set. 2020.
- GRAF, M. et al. Investigation of Size Effects Due to Different Cooling Rates of As-Quenched Martensite Microstructures in a Low-Alloy Steel. *Applied Sciences*, v. 10, n. 15, p. 5395, 4 ago. 2020.
- ISMAIL, A.; ADAN, N. H. Effect of Oxygen Concentration on Corrosion Rate of Carbon Steel in Seawater. *American Journal of Engineering Research*, p. 4, 2014.
- MIŚKIEWICZ, R.; WOLNIAK, R. Practical Application of the Industry 4.0 Concept in a Steel Company. *Sustainability*, v. 12, n. 14, p. 5776, 17 jul. 2020.
- PARK, Y.; NAKAOKA, I.; CHEN, Y. The R&D Strategy of Automobile Companies in Radical Innovation. *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, v. 7, n. 3, p. 184–189, out. 2020.
- QUADER, M. A.; AHMED, S.; GHAZILLA, R. A. R.; AHMED S.; DAHARI, M. A comprehensive review on energy efficient CO₂ breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p. 594–614, out. 2015.
- SOLEIMANI, M.; MIRZADEH, H.; DEHGHANIAN, C. Effects of spheroidization heat treatment and intercritical annealing on mechanical properties and corrosion resistance of medium carbon dual phase steel. *Materials Chemistry and Physics*, v. 257, p. 123721, jan. 2021.
- STINVILLE, J. C.; VILLECHAISE, P.; TEMPLIER, C.; RIVIERE, J. P.; DROUET, M. Plasma nitriding of 316L austenitic stainless steel: Experimental investigation of fatigue life and surface evolution. *Surface and Coatings Technology*, v. 204, n. 12–13, p. 1947–1951, mar. 2010.
- TOMKÓW, J.; FYDRYCH, D.; ROGALSKI, G.; ŁABANOWSKI, J. Temper Bead Welding of S460N Steel in Wet Welding Conditions. *Advances in Materials Science*, v. 18, n. 3, p. 5–14, 1 set. 2018.
- VÖGELE, S.; GRAJEWSKI, M.; GOGRUKHA, K.; RÜBBELKE, D. Challenges for the European steel industry: Analysis, possible consequences and impacts on sustainable development. *Applied Energy*, v. 264, p. 114633, abr. 2020.
- ZHANG, X.; MCMURTREY, M. D.; WANG, L.; O'BRIEN, R. C.; SHIAU, C.; WANG, Y.; SCOTT, R.; REN, Y.; SUN C. Evolution of Microstructure, Residual Stress, and Tensile Properties of Additively Manufactured Stainless Steel Under Heat Treatments. *JOM*, v. 72, n. 12, p. 4167–4177, dez. 2020.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.