

CARACTERIZAÇÃO DAS MICROESTRUTURAS FORMADAS NOS AÇOS AISI D2 E SAE 4140 EM DIFERENTES TAXAS DE RESFRIAMENTO

Higor Stork De Pieri¹

Fábio Peruch²

Resumo: Para alcançar maior competitividade tanto as empresas quanto os profissionais do ramo metal mecânico buscam melhorias nas propriedades dos aços com os quais trabalham, normalmente com tratamentos térmicos como têmpera e revenido. Para definir parâmetros e executar o tratamento de têmpera de maneira eficiente é necessário aprofundar os conhecimentos sobre o material a ser tratado. Com finalidade de avaliar a afinidade de um aço com o processo de têmpera, surgiu o método de *Jominy* que relaciona a dureza obtida pela têmpera em diferentes regiões de um corpo de prova. O presente estudo busca difundir os conhecimentos sobre os aços SAE 4140 e AISI D2, relacionando as durezas e microestruturas obtidas após ensaios *Jominy* monitorados com dois materiais de composições químicas e aplicabilidades bastante distintas. Através do sistema de monitoramento foi possível obter as curvas de resfriamento ao longo do corpo de prova e relacioná-las com as durezas das regiões monitoradas. Para o aço SAE 4140 obteve-se microestruturas distintas para cada taxa de resfriamento calculada, enquanto que no aço AISI D2 variando a taxa de resfriamento manteve-se uma matriz martensítica em toda a região analisada, porém o tipo dos carbonetos foi alterado e conseqüentemente a dureza desses carbonetos.

Palavras-chave: Ensaio *Jominy*. Temperabilidade. Microestrutura. Dureza.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos notou-se uma frequência maior de notícias e discussões a respeito do melhor processamento e reutilização dos recursos naturais, entre eles o minério de ferro que é componente base dos aços. Paralelo a esse cenário de preocupação com a escassez desses recursos no futuro, a demanda e a produção de aço crescem significativamente a cada ano. Segundo a World Steel, a associação mundial dos principais fabricantes de aço bruto, a produção de aço bruto em junho de 2019 foi de 159 milhões de toneladas, cerca de 4,6% maior em relação ao mesmo período de 2018. Em meio a esse cenário de aumento da demanda, cresce também a competitividade entre as indústrias do setor metalúrgico. Um dos meios que uma

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: higorstork@live.com

² Prof. Me Fábio Peruch. E-mail: fabio.peruch@satc.edu.br

indústria tem para melhorar a sua competitividade é fornecendo um produto com melhores características, ou seja, um produto com maior durabilidade, melhor desempenho e maior confiabilidade para o seu cliente.

Um processo importante e necessário ser realizado em grande parte dos componentes mecânicos de composição metálica são os tratamentos térmicos, entre eles a têmpera, que quando aplicado aos metais modifica as microestruturas fornecendo-lhes alteração nas suas propriedades mecânicas. Para avaliar a afinidade de um aço com o processo de têmpera surgiram métodos experimentais entre eles o método de *Grossman* e o método de *Jominy*.

O Laboratório de Metalurgia Física da Faculdade SATC “LAMEF” possui uma bancada para realização de ensaios *Jominy*, a mesma conta com um sistema de instrumentação que permite obter as temperaturas durante o ensaio.

Através do Ensaio *Jominy* monitorado, pretende-se caracterizar as microestruturas formadas nas diferentes taxas de resfriamento e conseqüentemente aprofundar os conhecimentos sobre os aços SAE 4140 e o aço AISI D2. Aços de diferentes composições químicas e aplicabilidades, porém, ambos são constantemente submetidos ao tratamento térmico de têmpera seguidos de revenido.

O aço AISI D2 por possuir elevado teor de carbono e cromo pretende-se compará-lo com o aço SAE 4140, evidenciando as características obtidas por sua composição química. Busca-se elaborar um trabalho que futuramente possa contribuir no entendimento das disciplinas de Ciência dos Materiais, onde serão comparadas as características mecânicas e microestruturais antes e depois do ensaio *Jominy*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

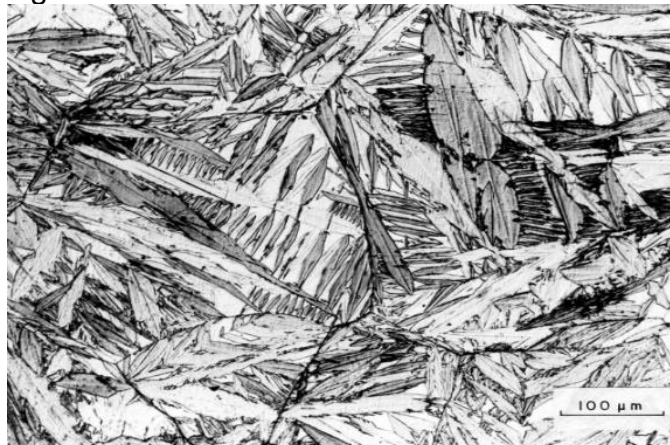
Nesta seção consta o referencial bibliográfico necessário para embasamento e sustentação deste estudo. Os assuntos são apresentados em seções e seguem uma sequência para melhor entendimento do tema e método utilizado.

2.1 Tratamento Térmico de Têmpera

Segundo Celestino et al. (2007), o tratamento térmico de têmpera resume-se em aquecer o material até sua temperatura de austenitização, mantê-lo até que todo o corpo esteja na mesma temperatura, logo após retirada desse material do forno faz-se o resfriamento brusco. Obtendo-se então estrutura martensítica. Os benefícios da têmpera são principalmente o aumento da dureza e da resistência mecânica, proporcionando maior resistência ao desgaste, à abrasão e conseqüentemente aumentando a confiabilidade e durabilidade do material em determinado projeto. Normalmente o tratamento de revenimento é aplicado logo após a tempera para alívio de tensões e garantir a melhor relação entre resistência e tenacidade.

Na Fig.1 é mostrada uma estrutura martensítica obtida por microscópio de um aço Fe-31wt%Ni-0.02wt%C resfriado em nitrogênio líquido, onde é alcançada uma taxa de resfriamento extremamente alta.

Figura 1: Estrutura martensítica



Fonte: J. R. C. Guimarães (2015)

Através da Fig. 1 é possível perceber que uma estrutura martensítica é composta de irregularidades, ou seja, conjuntos de cristais distorcidos que causam tensões internas e conseqüentemente alta dureza e resistência a deformação. Essa tensão é proveniente da expansão da célula unitária na transformação da austenita de arranjo CFC (cúbico de face centrada) para martensita TCC (tetragonal de corpo centrado).

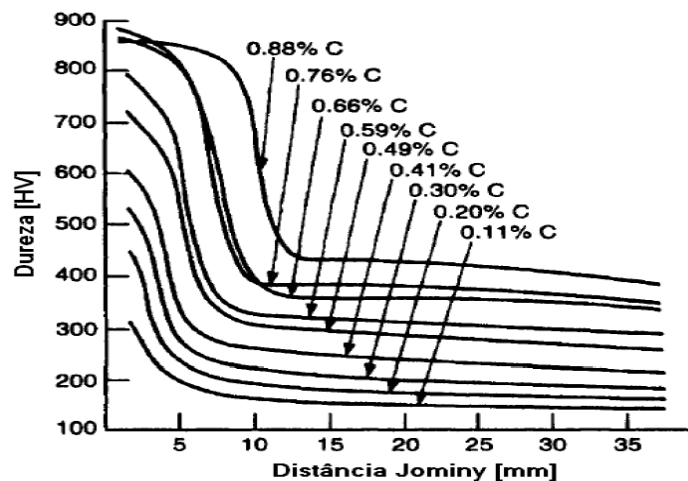
2.1.1 Temperabilidade

Segundo Callister (2012), o termo temperabilidade pode ser atribuído a capacidade de endurecimento do aço pela formação da martensita através do tratamento de têmpera. Uma liga de aço considerada de boa temperabilidade é aquela que forma martensita não apenas em sua superfície, mas em toda sua extensão e com certa profundidade.

Existem alguns fatores que influenciam na formação da martensita e consequentemente na temperabilidade dos aços. A adição de elementos de liga como carbono, manganês, cromo ou molibdênio deslocam as curvas de transformação para a direita, facilitando a formação da martensita mesmo com menores taxas de resfriamento.

De acordo com Llewellyn e Hudd (2004), a dureza de um aço está diretamente ligada com o seu teor de carbono, visto que o carbono influencia na formação da martensita. A Fig. 2 apresenta os valores de dureza obtidos ao longo de corpos de prova *Jominy* de diferentes teores de carbono.

Figura 2: Efeito do teor de carbono no endurecimento em aços

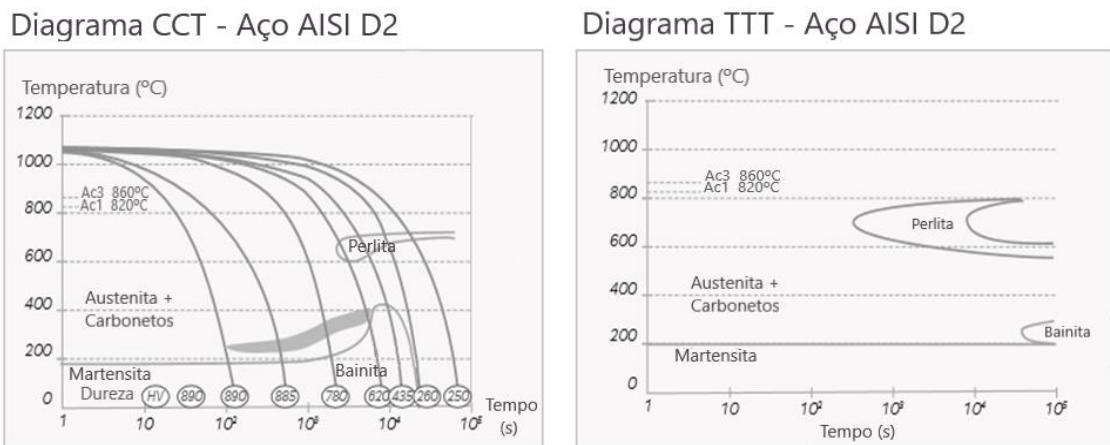


Fonte: adaptado de Llewellyn e Hudd (2004)

Na Fig. 2 é possível observar que ao aumentar a quantidade de carbono na composição da liga, aumenta-se consequentemente a dureza. Onde um aço com 0,11% de carbono consegue obter uma dureza de 200 HV, enquanto um aço com 0,88% de carbono pode chegar a quase 900 HV na mesma distância da extremidade resfriada por um jato de água.

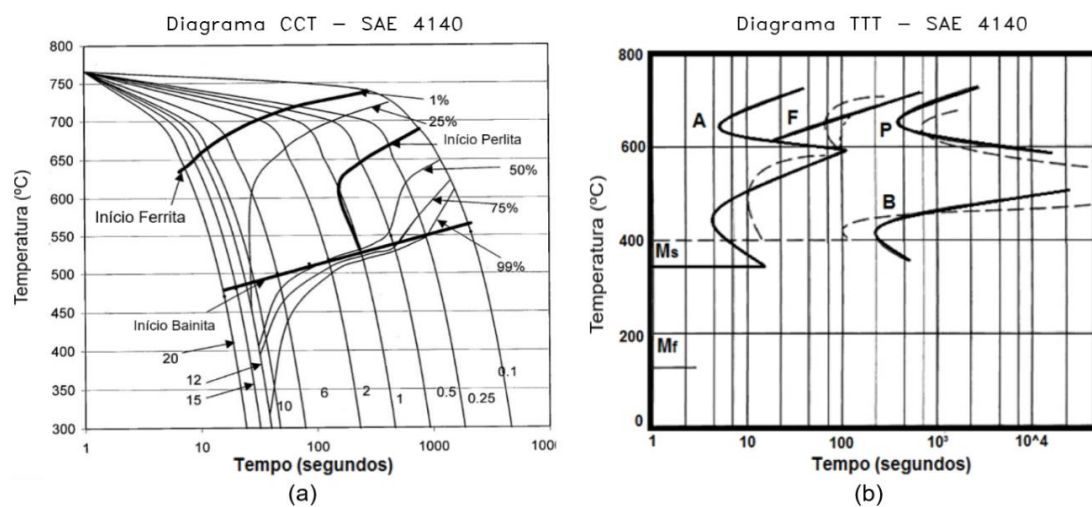
De acordo com Askeland e Phulé (2008), um aço considerado de boa temperabilidade é aquele capaz de formar uma seção espessa de martensita mesmo quando resfriado lentamente. A importância da velocidade de resfriamento na formação da martensita e também de outras microestruturas, pode ser observada nos diagramas TTT (tempo – temperatura – transformação) e CCT (Transformação em Resfriamento Contínuo) ilustrados na Fig. 3 e na Fig.4.

Figura 3: Diagrama CCT e TTT do aço AISI D2



Fonte: Adaptado de Industeel ArcelorMittal (2017)

Figura 4: Diagrama CCT e TTT do aço SAE 4140



Fonte: (a) Adaptado de Jayprakash Chipalkatti (1999); (b) TESTMAT (2013)

Nota-se pela Fig.3 e Fig. 4 que o diagrama dos dois materiais são bastante distintos. A elevada quantidade de carbono e outros elementos de liga do aço AISI D2 acaba deslocando o cotovelo da curva para a direita, tornando-o um aço de muita afinidade para a formação da martensita, mesmo adotando taxas de resfriamento mais brandas, ainda assim é possível obter elevada dureza.

É importante conhecer as temperaturas A_{e1} , A_{e3} e M_s pois indicam onde ocorre o início das transformações de fase. Para aços baixa liga pode-se calcular essas temperaturas utilizando as equações Eq. 1, Eq. 2 e Eq. 3 de Andrews (1965).

$$A_{e1} (^{\circ}C) = 723 - 16,9Ni + 29,1Si + 6,38W - 10,7Mn + 16,9Cr + 290As \quad (1)$$

$$A_{e3} (^{\circ}C) = 910 - 203\sqrt{C} + 44,7Si - 15,2Ni + 31,5Mo + 104V + 13,1W - 30Mn + 11Cr + 20Cu - 700P - 400Al - 400Ti \pm 16,7^{\circ}C \quad (2)$$

$$M_s (^{\circ}C) = 539 - 423C - 30,4Mn - 17,7Ni - 12,1Cr - 11Si - 7,5Mo \quad (3)$$

Para aços alta liga com percentual de cromo entre 8% e 14%, pode-se definir a temperatura de M_s com a Eq. 4 de Finkler e Schirra (1986).

$$M_s (^{\circ}C) = 635 - 474\{C + 0,86[N - 0,15(Nb + Zr)] - 0,066(Ta + Hf)\} - 33Mn + 17Cr + 17Ni + 21Mo + 39V + 11W \quad (4)$$

Onde:

A_{e1} = Temperatura crítica inicio da transformação ($^{\circ}C$)

A_{e3} = Temperatura de austenitização ($^{\circ}C$)

M_s = Temperatura de início da transformação da martensita ($^{\circ}C$)

Elementos Químicos = % do peso.

2.2 Ensaio Jominy Monitorado

Conforme a norma ASTM A255-10 (2018), o Ensaio *Jominy* consiste em testar a temperabilidade em um corpo de prova medindo a profundidade até onde formou-se estrutura martensítica. Primeiramente, o corpo de prova deve ser normalizado, isso ocorre colocando o mesmo no forno durante uma hora em

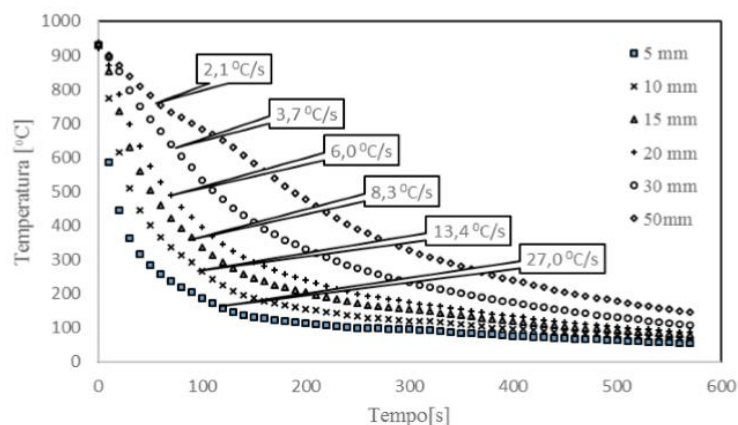
temperatura de austenitização e em seguida o corpo de prova deve ser resfriado em ar. Após a normalização o corpo de prova precisa ser austenitizado em um forno durante 30 minutos. Passado esse tempo deve ser retirado do forno e colocado imediatamente no suporte do dispositivo *Jominy* e o jato de água deve ser acionado.

Durante o procedimento, a extremidade que recebe o jato de água alcança uma taxa de resfriamento muito alta e essa taxa vai diminuindo ao se afastar da extremidade resfriada. O jato de água pode ser desligado quando o corpo de prova estiver totalmente resfriado para então realizar as medições de dureza.

O dispositivo para realização de ensaios *Jominy* monitorado, disponível no laboratório de metalurgia física da Faculdade SATC (LAMEF II), segue a norma ASTM A255 (2014). O mesmo possui um dispositivo auxiliar com termopares para coleta dos valores de temperatura durante o ensaio. Com esses dados de temperatura é possível elaborar gráficos de temperatura pelo tempo e calcular as taxas de resfriamento

O sistema de aquisição de dados funciona utilizando 6 termopares tipo K, ligados a placas digitalizadoras Max 6675, as placas são ligadas em conjunto com um arduino Mega 2560. Há uma programação primeiramente no software do arduino para comunicá-lo com o software Labview, onde há uma programação em blocos, responsável pela exibição de gráficos em tempo real e pelo arquivamento dos dados coletados em uma planilha .xls. Após o ensaio, os dados são processados e são elaborados os gráficos com as curvas desejadas. A Fig. 5 ilustra um gráfico obtido durante um ensaio *Jominy* monitorado. Para cálculo das taxas de resfriamento o autor Fernandes (2014) utilizou a metodologia de Nunura (2009).

Figura 5: Curvas de resfriamento durante ensaio *Jominy*



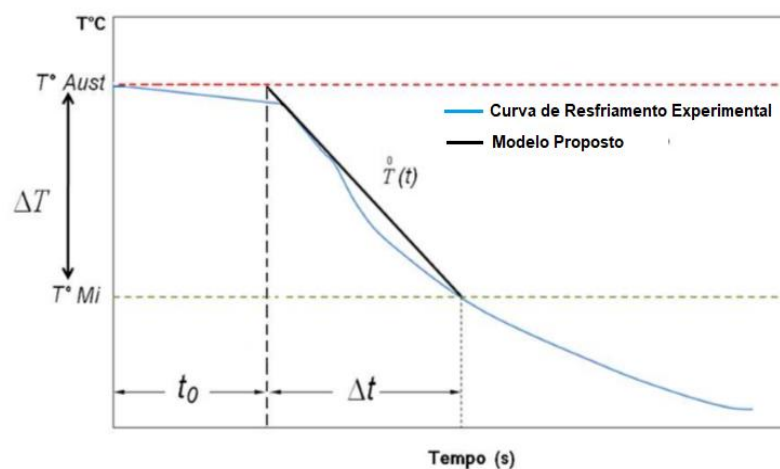
Fonte: Fernandes (2014)

A diferença entre as taxas de resfriamento ao longo das posições dos termopares chega a ser 10 vezes maior da posição 1 em relação a posição 6, todas partindo da mesma temperatura de austenitização de 950° C.

Seguindo o modelo de Metals Handbook (1990), o autor Nunura (2009) desenvolveu uma equação para cálculo da taxa de resfriamento. Nesta equação são considerados os valores de temperatura a partir do momento que o corpo de prova é retirado do forno até o momento que o mesmo atinge uma temperatura definida, normalmente a temperatura inicial de formação da martensita (M_s). Essa diferença de temperaturas é relacionada com o intervalo de tempo que esse resfriamento aconteceu e como resultado tem-se a taxa de resfriamento média do corpo de prova até a sua temperatura M_s definida pela eq. (3) para o aço SAE 4140 e definida pela eq. (4) para o aço AISI D2.

Como os dois materiais em estudo possuem temperaturas M_s distintas, as taxas de resfriamento serão um pouco diferentes. Por isso, adotou-se também a metodologia proposta por Rebecchi (2011) para temperatura de austenitização de 902°C, onde após derivar as curvas de resfriamento obtidas por meio experimental e também por simulação computacional, formulou uma equação que fornece a taxa de resfriamento máxima para qualquer posição do corpo de prova durante o ensaio *Jominy*, ele obteve uma correlação de 0,98 nessa equação.

Figura 6: Metodologia para cálculo das taxas de resfriamento



Fonte: Nunura (2009)

Equação proposta por Nunura (2009)

$$\tilde{T} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{\text{austenitização}} - T_{\text{ms}}}{\Delta t} \quad \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}} \right] \quad (5)$$

Onde:

\tilde{T} = Taxa de resfriamento média ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)

$T_{\text{austenitização}}$ = Temperatura de austenitização adotada ($^{\circ}\text{C}$)

T_{ms} = Temperatura de início da formação da Martensita ($^{\circ}\text{C}$)

Δt = Variação do tempo entre $T_{\text{austenitização}}$ e T_{ms} (segundos)

Equação proposta por Rebecchi (2011)

$$\dot{T} = \frac{685,96}{x^{1,262}} \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}} \right] \quad (6)$$

Onde:

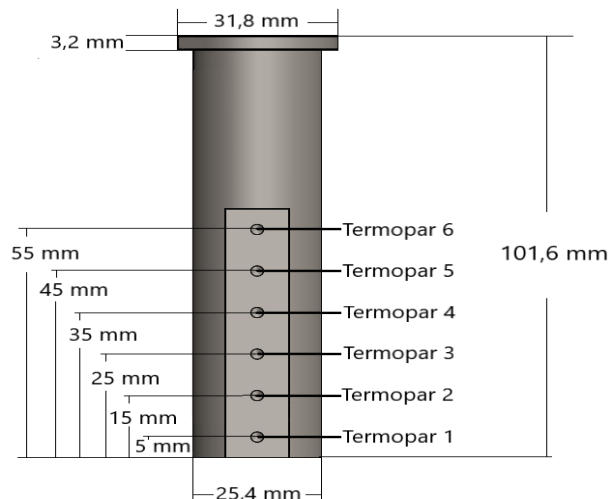
\dot{T} = Taxa de resfriamento máxima ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$)

x = Posição no corpo de prova (mm)

2.2.1 Corpos de Prova

As dimensões para o corpo de prova seguem a norma regulamentadora do ensaio ASTM A255-10 (2018). A Fig. 7 destaca os detalhes e medidas em milímetros do corpo de prova, além de indicar o local onde serão inseridos os termopares.

Figura 7: Corpo de prova para ensaio *Jominy* monitorado



Fonte: Do autor (2019)

Na Fig. 7 nota-se um rebaixo de aproximadamente 2 mm que cria uma face onde posteriormente são feitos os 6 furos. Os furos tem aproximadamente 3 mm de diâmetro e 10 mm de profundidade.

2.2.2 Aços SAE 4140 e AISI D2

O SAE 4140 é um aço comumente utilizado industrialmente devido sua boa combinação de resistência à fadiga e a fratura, além da sua capacidade de endurecimento em longas seções transversais. Suas aplicações são diversas, desde à fabricação de cilindros, engrenagens, anéis, rolamentos, eixos até tirantes, parafusos e porcas. (GGD Metals, 2019).

O AISI D2 é um aço ferramenta para trabalho a frio de maior utilização no setor metal-mecânico, isso está ligado a sua alta penetração de dureza com a têmpera, que proporciona excelente resistência ao desgaste tanto abrasivo quanto adesivo. Suas aplicações estão principalmente na indústria de conformação e corte a frio, sendo utilizado na confecção de punções, ferramentas para repuxo, extrusão, dobramento, na confecção de pentes laminadores de roscas, bastante utilizado também na confecção de moldes para injeção de plásticos de alta abrasividade e de matrizes para indústria cerâmica (GGD Metals, 2019).

Os valores para cada elemento da composição química dos aços em estudo devem estar entre os limites apresentados na Tab. 1.

Tabela 1: Faixa de composição química dos aços (% peso)

AÇO	C	Mn	Si	Cr	Mo	V_{máx}
AISI D2	1,40 - 1,60	0,15 - 0,60	0,15 - 0,60	11,0 – 13,0	0,70 – 1,20	1,10
SAE 4140	0,38 - 0,43	0,75 - 1,0	0,15 - 0,35	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25	-

Fonte: GDD Metals, (2019)

Na Tab. 2 estão representados os valores de dureza dos materiais e o estado de fornecimento.

Tabela 2: Características dos materiais

Material	Fornecimento	Dureza (HB)
SAE 4140	Laminado, sem tratamento	275 - 286
AISI D2	Laminado, Recozido	222 - 229

Fonte: GGD Metals,2019

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção serão apresentados os procedimentos experimentais executados para elaboração deste estudo, os mesmos estão organizados em ordem cronológica.

3.1 ANÁLISE QUÍMICA

A análise da composição química foi realizada utilizando o método de espectrometria de emissão óptica, que consiste na emissão de uma descarga elétrica de alta potência numa atmosfera inerte de gás argônio.

3.2 USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Foram usinados 6 corpos de prova, sendo 3 de cada material. A usinagem seguiu as dimensões da norma ASTM A255-10 (2018). Também foi usinado um rebaixo de cerca de 2 mm onde foram feitos os 6 furos em cada corpo de prova para alocação dos termopares, (esses detalhes estão ilustrados e comentados na Fig. 7). A normalização foi realizada após a usinagem conforme a norma que rege o ensaio.

3.3 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS *JOMINY*

A temperatura do forno foi programada em 900°C, ficando um pouco acima da temperatura mínima de austenitização dos dois aços em estudo. Adotou-se uma

nomenclatura para cada um dos corpos de prova para facilitar a identificação dos mesmos e a mesma está representada na Tab. 3.

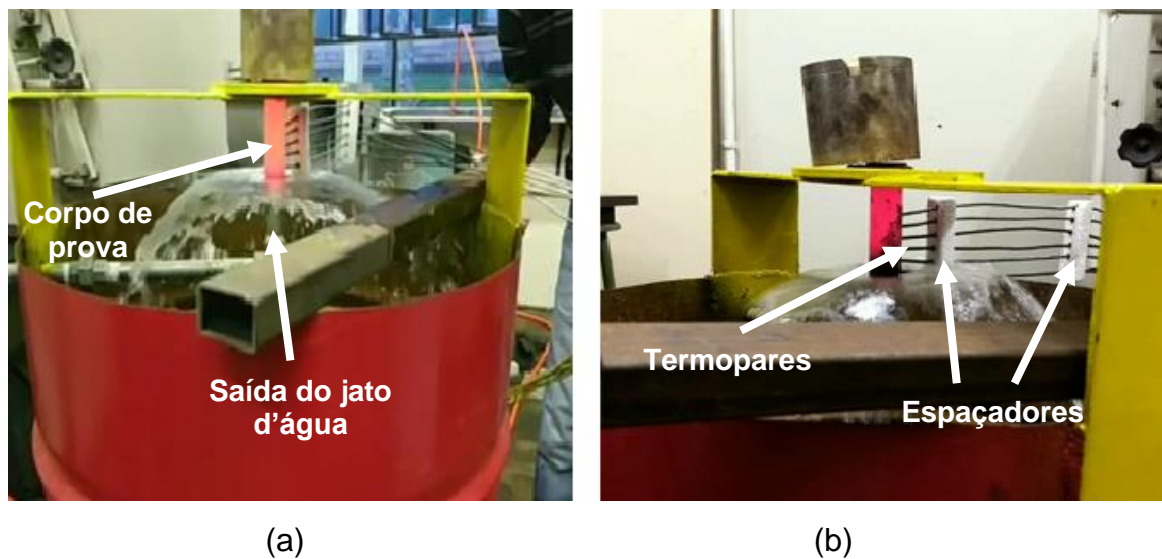
Tabela 3: Organização dos corpos de prova

Nome	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6
Material	SAE 4140	SAE 4140	SAE 4140	AISI D2	AISI D2	AISI D2

Fonte: Do autor (2019)

Com os 6 termopares inseridos no primeiro corpo de prova de aço SAE 4140, o mesmo foi colocado no forno resistivo e após o corpo de prova atingir a mesma temperatura em todos os 6 termopares, cronometrou-se 30 minutos. Para então retirar o corpo de prova do forno, posicioná-lo na bancada e liberar o fluxo de água.

Figura 8: Corpos de prova durante a etapa de resfriamento



Fonte: Do autor (2019)

A Fig. 8.a ilustra o estado do corpo de prova nos primeiros segundos após abertura do fluxo de água. Nota-se que o material ainda está inteiramente austenitizado, enquanto na Fig. 8.b com aproximadamente 1 minuto de resfriamento já é perceptível a diferença entre as temperaturas ao longo da superfície do corpo. Também foram colocados dois espaçadores de cerâmica para também servir de apoio e garantir a fixação dos termopares, na Fig. 8.b pode-se observar os dois espaçadores de cor branca.

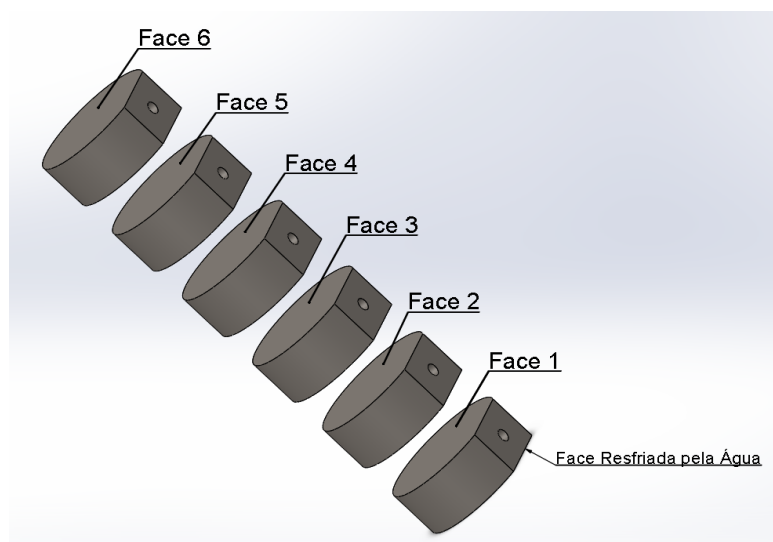
Repetiu-se o procedimento para os outros cinco corpos de prova.

3.4 DESBASTE E CORTE DOS CORPOS DE PROVA

Após os ensaios *Jominy* foi necessário realizar um desbaste superficial nos corpos de prova para retirar as carepas resultantes da descarbonetação (perda do carbono por oxidação). Também foi realizado um desbaste de aproximadamente 2 mm criando uma superfície plana para realização dos ensaios de dureza.

Dos 6 corpos de prova ensaiados, foram selecionados dois (um de cada material), para análises metalográficas. Os corpos de prova foram cortados em uma cortadeira metalográfica modelo MESOTOM da marca PANAMBRA, utilizando fluido de corte refrigerante a fim de evitar superaquecimento e consequentemente a modificação das microestruturas nas faces cortadas. A Fig. 9 ilustra as regiões seccionadas para realização das análises.

Figura 9: Esquemático corpo de prova seccionado em 6 partes



Fonte: Do autor (2019)

3.5 ANÁLISES METALOGRÁFICAS

Após seccionamento dos corpos de prova, foi dado início a preparação das amostras para a execução das análises metalográficas em cada uma das 6 faces.

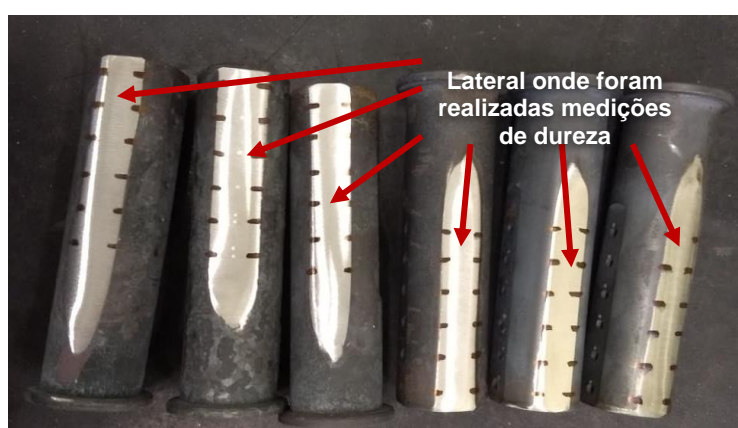
Para preparação das superfícies foram realizadas as etapas de lixamento, polimento e ataque químico, conforme a norma ASTM E3-11 (2017). Para visualização das microestruturas foi utilizado um microscópio modelo BX-51M da marca OLYMPUS®, com lentes de aumento de 50x, 200x, 500x e 1000x.

3.6 ENSAIOS DE DUREZA E MICRODUREZA

Os ensaios de dureza *Rockwell C* (HRc) foram realizados em um durometro modelo HR-400 da marca MITUTOYO®, e seguido a metodologia da norma ASTM E18 (2017). Foram realizadas 3 medições para cada posição, tanto na lateral do corpo de prova na mesma faixa dos termopares como também em cada uma das 6 superfícies preparadas para metalografia, os valores exibidos nas tabelas são a média das 3 medições.

Os ensaios de microdureza *Vickers* (HV) foram realizados em um microdurometro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZU® e seguido a metodologia da norma ASTM E18 (2017). Foram realizadas medições de dureza nas amostras em estado de fornecimento e nas 6 superfícies de cada corpo de prova que foi cortado, as medições foram feitas nas matrizes e nos carbonetos.

Figura 10: Corpos de prova após desbaste com disco *flap*



Fonte: Do autor (2019)

Na Fig. 10 estão indicadas as superfícies laterais na mesma faixa das regiões dos furos dos termopares. Nessa superfície desbastada foram realizados os ensaios de dureza HRc.

3.7 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Após realização dos ensaios *Jominy*, foram obtidos 6 arquivos .xls contendo as informações das temperaturas dos 6 termopares durante o ensaio. Para processamento dos dados, ou seja, filtragem dos valores e elaboração dos gráficos foi utilizado o *software Microsoft Excel® 2016*.

Com os valores de temperatura processados no *software Excel* juntamente com os valores de A_{c3} e M_s , encontrados pelas Eq. (1), (3), (4) citadas na seção 2.1.1, utilizou-se as Eq. (5) e (6) citadas na seção 2.2, para calcular a taxa de resfriamento para cada uma das 6 regiões dos termopares, isso tanto para o aço AISI D2 quanto para o aço SAE 4140.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os resultados obtidos na análise da composição química estão representados na Tab. 4.

Tabela 4 – Composição Química dos Aços AISI D2 e SAE 4140 (em % peso)

AÇO	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P
AISI D2	1,36	0,35	0,44	11,24	0,76	0,78	-
SAE 4140	0,39	0,83	0,20	0,82	0,17	-	0,035

Fonte: Do autor (2019)

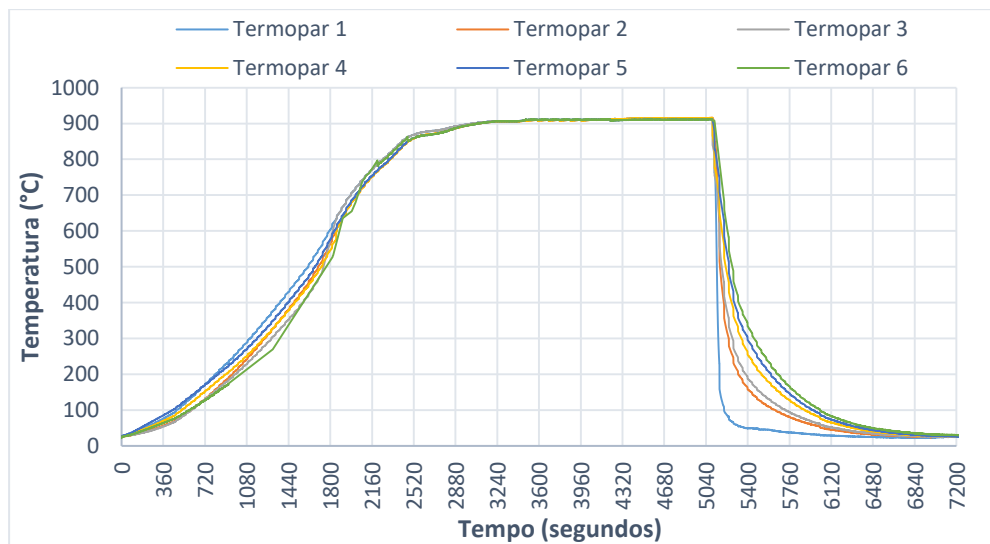
Relacionando os valores da Tab. 4 obtidos na análise química com os valores da Tab. 1, validou-se ambos os materiais e foi dada sequência no estudo.

4.2 CURVAS DE TEMPERATURA

Para cálculos das taxas de resfriamento foram utilizados os dados de temperatura dos 6 ensaios, os valores apresentados nas tabelas são as médias dos 3 ensaios de cada material.

Após a filtragem e processamento dos dados, elaborou-se os gráficos de aquecimento e resfriamento. Na Fig. 11 é possível observar as curvas de aquecimento dos corpos de prova, seu tempo de permanência dentro do forno e posteriormente a queda brusca de temperatura no resfriamento.

Figura 11: Curvas de temperatura durante o ensaio do CP 4 (AISI D2)



Fonte: Do autor (2019)

Nota-se uma pequena disparidade entre as medições dos termopares na fase de aquecimento, porém a partir de 750° C há uma estabilização e as curvas ficaram bem definidas. Atribui-se essa disparidade ao próprio desgaste dos termopares, visto que já eram usados e ao retirar os termopares do corpo de prova era necessário um esforço maior, podendo também ter danificado os mesmos nos últimos 3 ensaios.

4.2.1 CÁLCULO DAS TAXAS DE RESFRIAMENTO

O cálculo das taxas de resfriamento para cada um dos termopares seguiu o referencial citado na seção 2.2. Na Tab. 5 encontram-se as temperaturas críticas A_{c1} , A_{c3} e M_s .

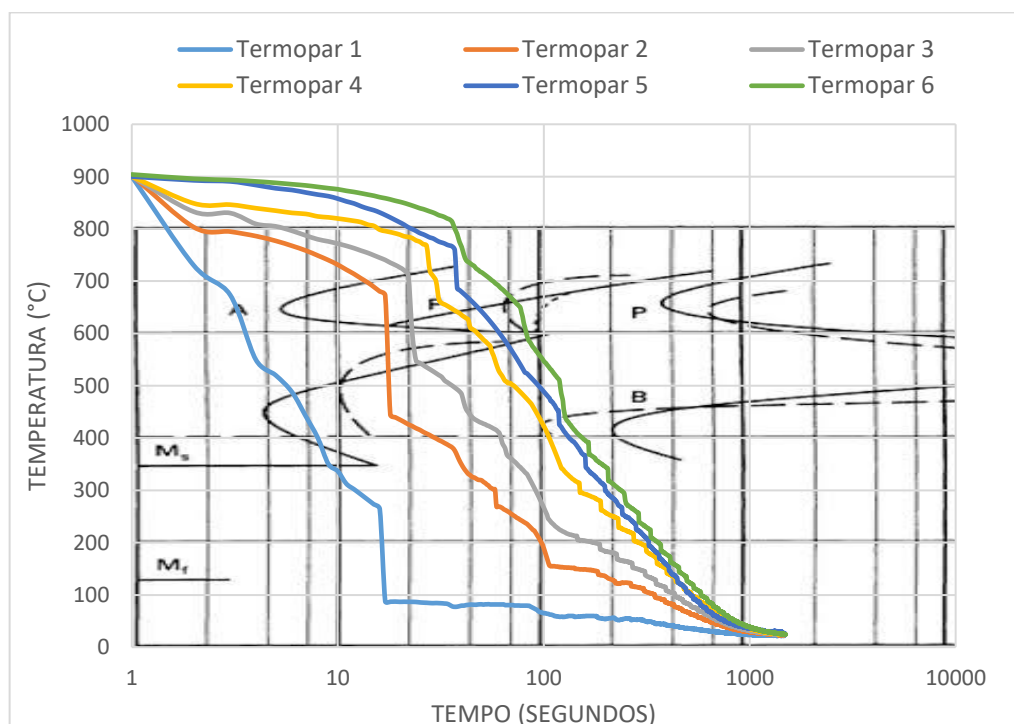
Tabela 5: Temperaturas críticas (°C)

Material	A_{c1}	A_{c3}	M_s
SAE 4140	737,43	777,91	327,04
AISI D2	820,00	860,00	167,73

Fonte: Do autor (2019) e Industeel ArcelorMittal (2017)

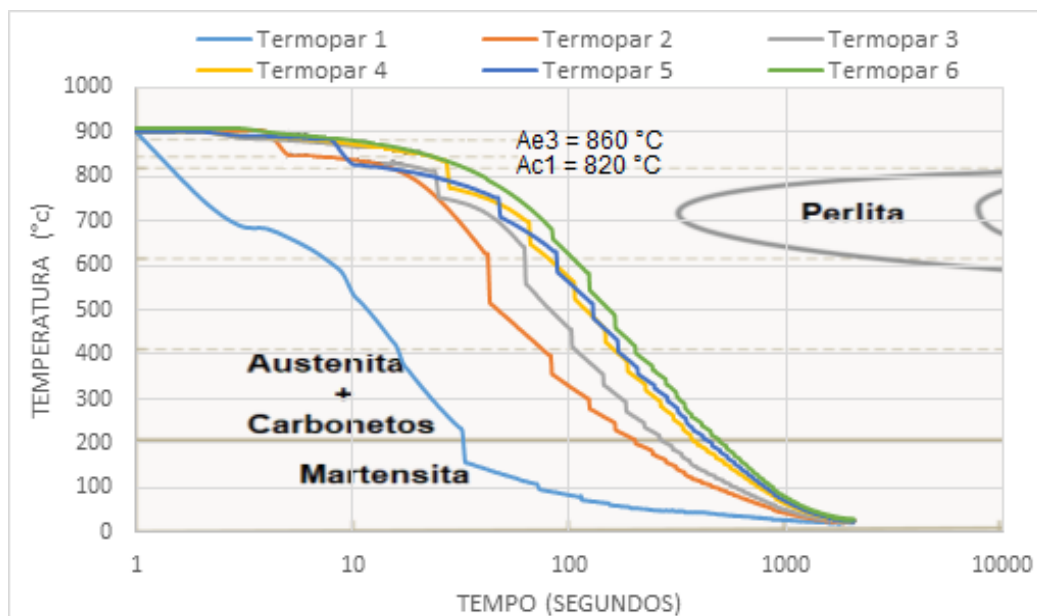
Na Fig. 12 e na Fig. 13 estão ilustradas as curvas de resfriamento sobre os respectivos diagramas TTT de cada aço.

Figura 12: Curvas de resfriamento sobre diagrama TTT do aço SAE 4140



Fonte: Do autor (2019)

Figura 13: Curvas de resfriamento sobre sobre diagrama TTT do aço AISI D2



Fonte: Do autor (2019)

Observando a Fig. 12 e Fig. 13 nota-se a grande diferença entre a taxa de resfriamento da região 1 em relação as demais, para os dois ensaios as curvas dos termopares 4, 5 e 6 ficaram muito próximas.

A Tab. 6 representa os valores das taxas de resfriamento máxima (\dot{T}) e média (\tilde{T}), calculadas para cada um dos termopares.

Tabela 6: Taxas de resfriamento para cada posição

Termopar	Posição (mm)	\dot{T} Taxa máxima (°C/s)	SAE 4140		AISI D2	
			\tilde{T} (°C/s)	Desvio Padrão (°C/s)	\tilde{T} (°C/s)	Desvio Padrão (°C/s)
1	5	89,98	19,27	1,06	16,89	0,65
2	15	22,49	8,62	0,88	8,29	1,01
3	25	11,8	5,64	1,35	3,76	0,19
4	35	7,72	3,89	0,56	2,87	0,31
5	45	5,62	3,25	0,61	2,21	0,13
6	55	4,36	2,15	0,29	1,94	0,22

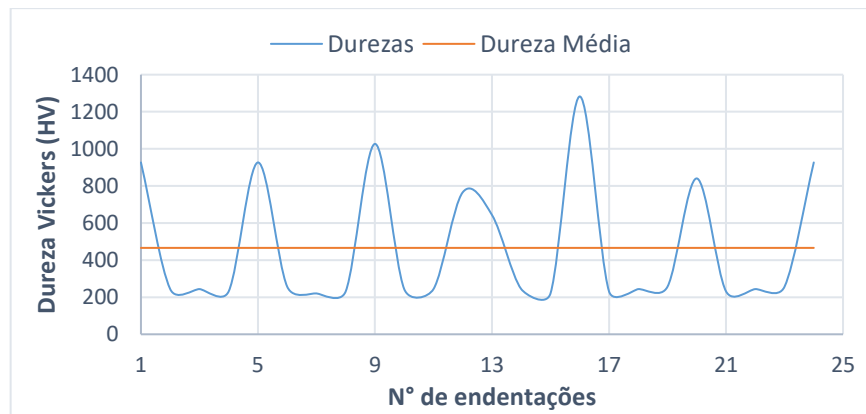
Fonte: Do autor (2019)

Observa-se uma menor taxa de resfriamento do aço AISI D2, pelo do fato da temperatura de martensita superior ser menor levou mais tempo para atingi-la.

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DUREZA E MICRODUREZA

Na Fig. 14 e Fig. 15 estão ilustrados os valores de microdureza do material em seu estado de fornecimento, as medições partiram do centro das amostras em direção a borda.

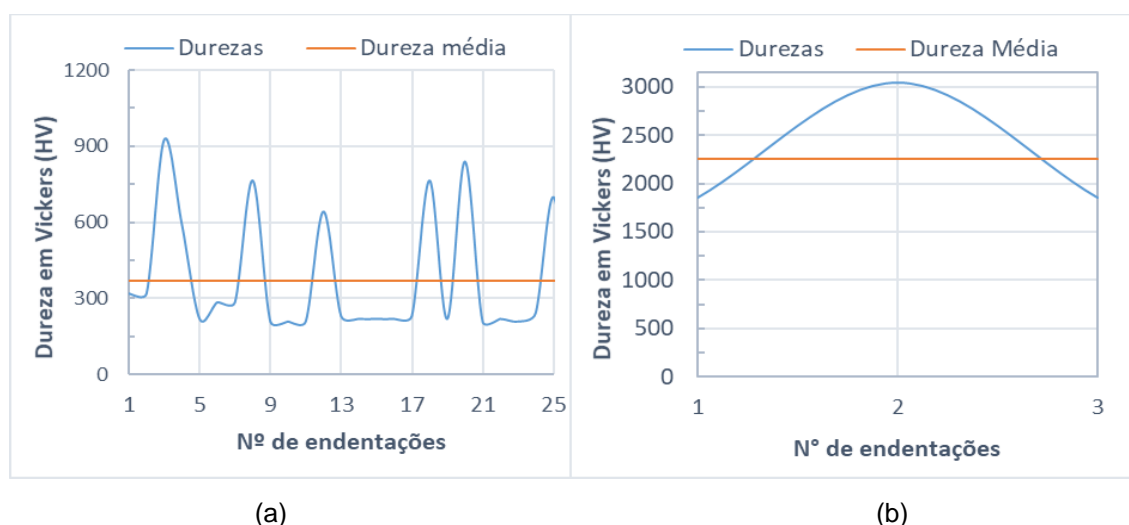
Figura 14: Perfil de microdureza na matriz do SAE 4140



Fonte: Do autor (2019)

A dureza média da matriz do aço SAE 4140 em estado de fornecimento foi de aproximadamente 466 HV, em algumas regiões de ferrita e perlita a dureza ficou próxima de 220 HV, chegando até 1280 HV nos carbonetos.

Figura 15: Perfil de microdureza no aço AISI D2: (a) na matriz; (b) carbonetos



Fonte: Do autor (2019)

No aço AISI D2 obteve-se uma microdureza média de 370 HV e um desvio padrão alto devido as regiões com incidência de carbonetos como ilustrado em (a), enquanto em (b) nota-se que no carboneto a dureza média foi de 2250 HV.

Na Tab. 7 estão representados os valores de dureza HRc médios após os ensaios *Jominy*. Essas medições foram realizadas na lateral dos corpos de prova, região onde ocorreu o desgaste de 2 mm conforme ilustrado na Fig. 12.

Tabela 7: Valores de dureza HRc na lateral dos corpos de prova

Posição Termopares (mm)	Dureza HRc - SAE 4140				Dureza HRc - AISI D2			
	CP 1	CP 2	CP 3	Desvio Padrão	CP 4	CP 5	CP 6	Desvio Padrão
5	46,73	50,77	52,80	3,09	53,10	50,70	51,23	1,26
15	42,07	52,20	52,37	5,90	51,50	49,97	51,17	0,81
25	41,87	44,93	50,17	4,20	51,17	49,43	50,77	0,91
35	40,77	41,33	43,30	1,33	50,23	48,53	50,37	1,02
45	34,33	37,83	37,47	1,93	49,30	45,17	50,13	2,66
55	28,07	34,23	33,57	3,38	47,13	45,07	49,63	2,28

Fonte: Do autor (2019)

Após seccionamento das 6 faces conforme ilustrado na Fig. 9, realizou-se as medições de dureza HRc, os valores estão representados na Tab. 8.

Tabela 8: Dureza HRc nas faces seccionadas do CP 2 e CP 4

Face	CP 2 (SAE 4140)			CP 4 - AISI D2		
	Taxa de Resfriamento (°C/s)	Dureza Média (HRc)	Desvio Padrão (HRc)	Taxa de Resfriamento (°C/s)	Dureza Média (HRc)	Desvio Padrão (HRc)
1	19,27	49,37	3,18	16,89	52,07	0,81
2	8,62	40,40	4,06	8,29	51,67	0,45
3	5,64	37,30	3,82	3,76	51,43	1,12
4	3,89	35,63	3,50	2,87	51,40	0,35
5	3,25	34,30	0,78	2,21	51,27	0,12
6	2,15	31,55	3,75	1,94	51,10	1,49

Fonte: Do autor (2019)

Observa-se no CP 2 que a dureza HRc decresce juntamente com a taxa de resfriamento, consequência das diferentes microestruturas que se formaram. Já no CP 4 apesar da variação da taxa de resfriamento ser grande, a dureza pouco variou ao longo do corpo de prova.

Após preparação das faces seccionadas, foram realizadas as medições de microdureza nas matrizes dos CP 2 e CP 4, na Tab. 9 estão representados os resultados em HV.

Tabela 9: Microdureza HV nas faces seccionadas

Face	CP 2 (SAE 4140)		CP 4 - AISI D2	
	Taxa de Resfriamento (°C/s)	Dureza Média (HV)	Taxa de Resfriamento (°C/s)	Dureza Média (HV)
1	19,27	873,06	16,89	891,90
2	8,62	757,28	8,29	790,73
3	5,64	684,29	3,76	778,68
4	3,89	595,65	2,87	693,33
5	3,25	472,45	2,21	668,16
6	2,15	232,83	1,94	649,26

Fonte: Do autor (2019)

Observando os valores de microdureza na Tab. 9 para ambos os aços, nota-se uma variação maior no aço SAE 4140. Nas primeiras faces os valores até se aproximam com os do aço AISI D2, porém ao afastar-se da superfície resfriada a

dureza nas faces do CP2 decrescem significativamente. No CP 4 a dureza decresce de forma moderada apesar da grande variação nas taxas de resfriamento médias.

As medições de microdureza no CP 4, tem por objetivo relacionar a taxa de resfriamento média com os tipos de carbonetos presentes em cada face. A Tab. 10 representa os dados de microdureza medidos nos carbonetos do CP 4.

Tabela 10: Microdureza nos carbonetos do CP 4 (AISI D2)

Face	CP 4 - AISI D2	
	Taxa de Resfriamento (°C/s)	Dureza Média (HV)
1	16,89	3101,50
2	8,29	2723,97
3	3,76	2496,33
4	2,87	2346,44
5	2,21	1823,30
6	1,94	1743,41

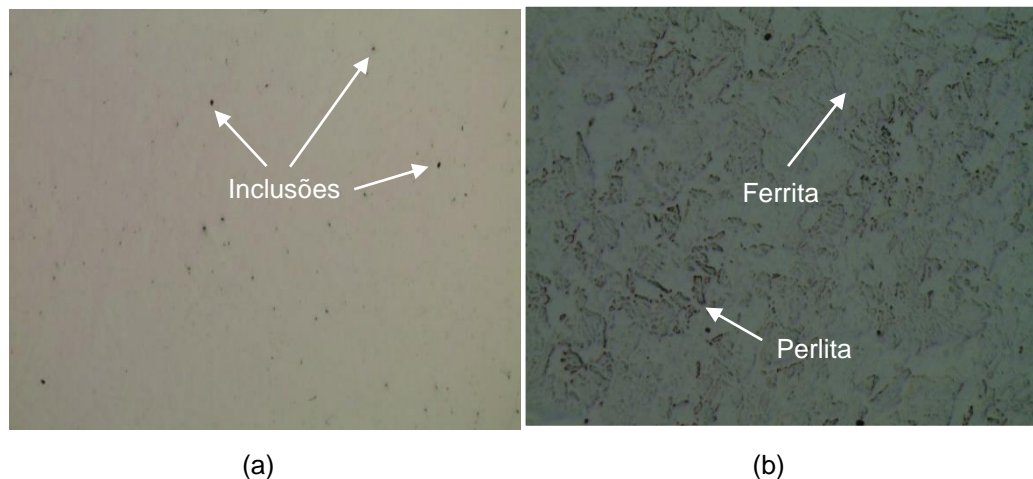
Fonte: Do autor (2019)

Em relação aos carbonetos presentes nas faces do CP 4 ficou evidente que apesar da dureza HRC não variar significativamente como ocorreu no CP 2, a dureza dos carbonetos diminuiu com a redução da taxa de resfriamento média, devido ao tipo de carboneto presente. Nas primeiras faces acredita-se que pela composição química deste aço e pela elevada dureza dos carbonetos, tratam-se de carbonetos de vanádio (VC~2800 HV) e alguns carbonetos de silício (SiC~3200 HV), intercalados com carbonetos de cromo (M₂₃C₆~ 1650 HV) em formato de pequenos glóbulos e também predominância de carbonetos do tipo (M₇C₃~1800 HV) compostos principalmente de cromo e ferro e ocorrendo também com molibdênio e vanádio, organizando-se em lamelas grosseiras.

4.4 METALOGRAFIAS

Foram realizadas análises metalográficas dos materiais em estado de fornecimento conforme ilustrado na Fig. 16 e Fig. 17 e após os ensaios *jominy* também foram realizadas análises metalográficas nas 6 faces de cada corpo seccionado.

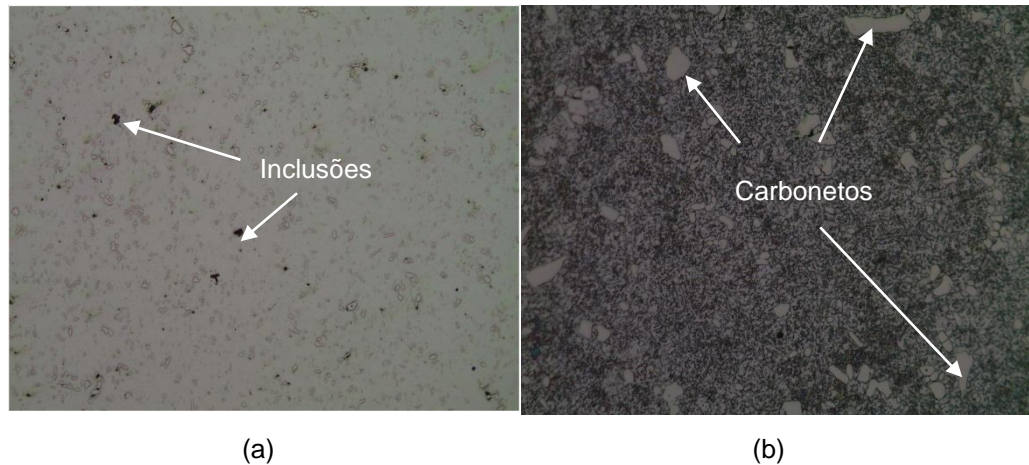
Figura 16: Metalografias do Aço SAE 4140 em estado de fornecimento: (a) sem ataque (50x) e (b) Ataque com Nital 2% (500x)



Fonte: Do autor (2019)

Observa-se na Fig. 16 (a) alguns pontos pretos, trata-se de inclusões não metálicas. Em (b) de acordo com a dureza, acredita-se tratar de uma matriz perlítica com incidência de ferrita.

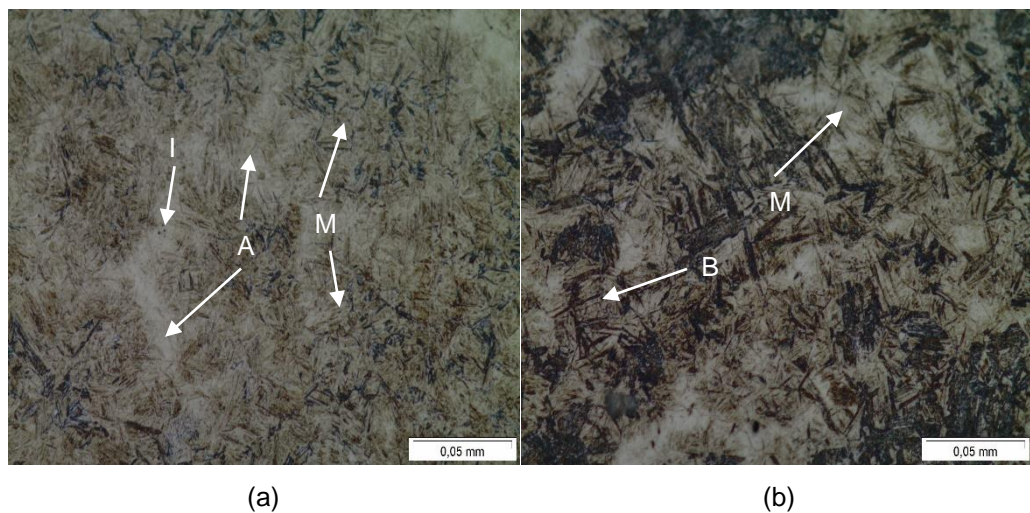
Figura 17: Metalografias do aço AISI D2 em estado de fornecimento: (a) Sem ataque (50x) e (b) Ataque com Nital 2% (500x)

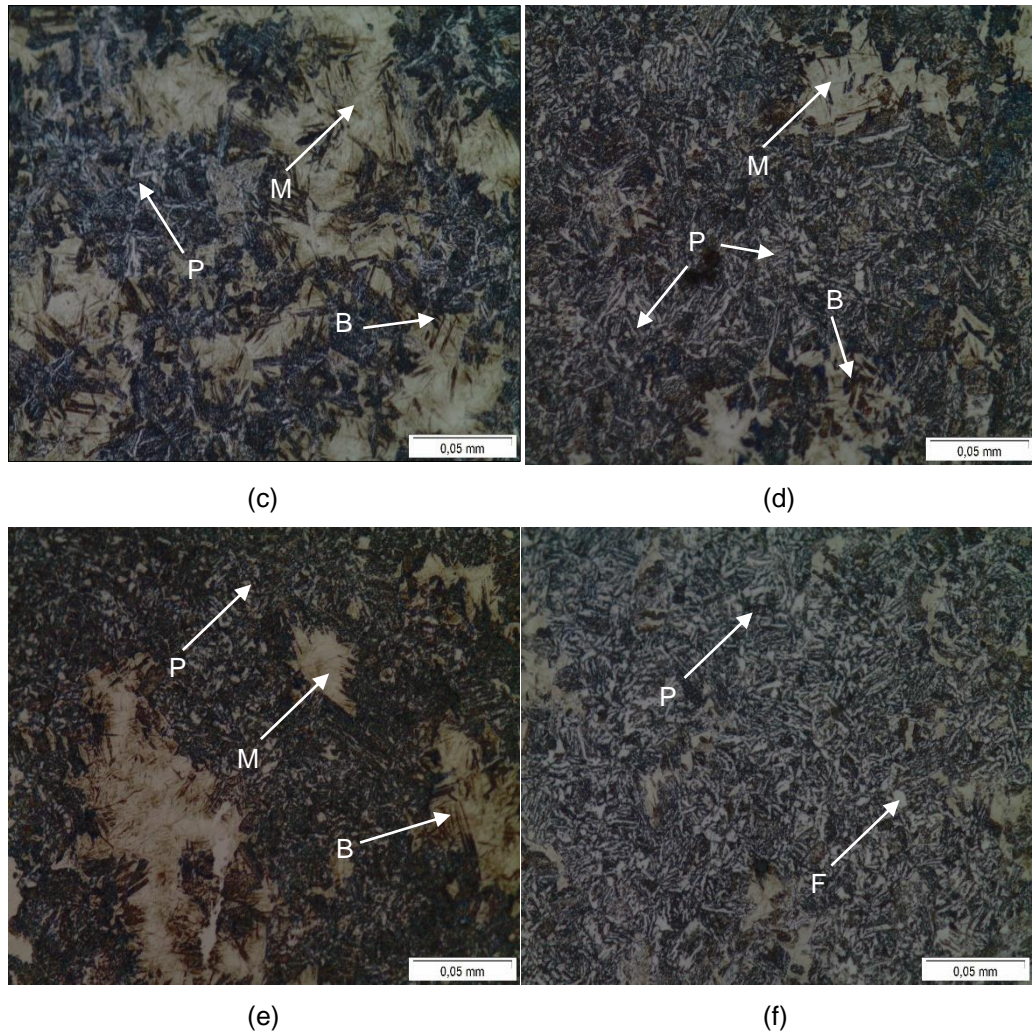


Fonte: Do autor (2019)

Nota-se na Fig. 17 (a) alguns pontos pretos, que são inclusões resultantes de impurezas na liga. Já em (b) é possível observar os carbonetos grossos (primários) e a grande maioria de carbonetos finos (secundários) distribuídos ao longo de uma matriz ferrítica.

Figura 18: Metalografias após ensaio *Jominy* CP 2 SAE 4140, ataque com Nital 2% e lente de 500x: (a) Face 1; (b) Face 2; (c) Face 3; (d) Face 4; (e) Face 5; (f) Face 6





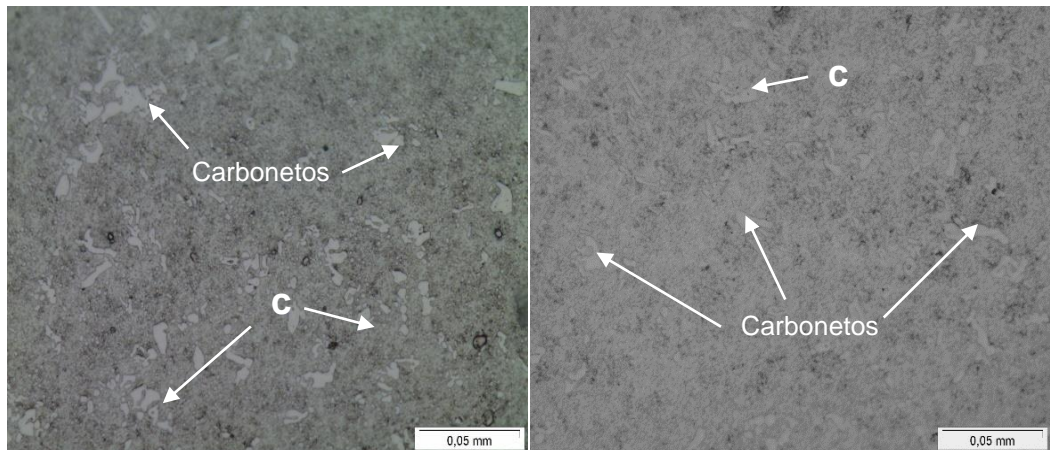
Fonte: Do autor (2019)

Na Fig. 18 (a) observa-se uma matriz de martensita temperada indicada pela letra M, cercada pelos contornos de grãos austeníticos indicada pela letra A. Nota-se ainda que as inclusões não metálicas indicadas pela letra I, localizam-se nos contornos de grãos. Em (b) há ocorrência de martensita e aparecimento de núcleos de bainita indicada pela letra B.

Na Fig.18 (c) nota-se ainda ocorrência de martensita e um aumento da concentração de núcleos de bainita, com aparecimento de pequenas regiões de perlita indicada pela letra P. Em (d) há ocorrência de perlita em grande concentração e pequenas regiões de bainita e ainda pequenas regiões de martensita.

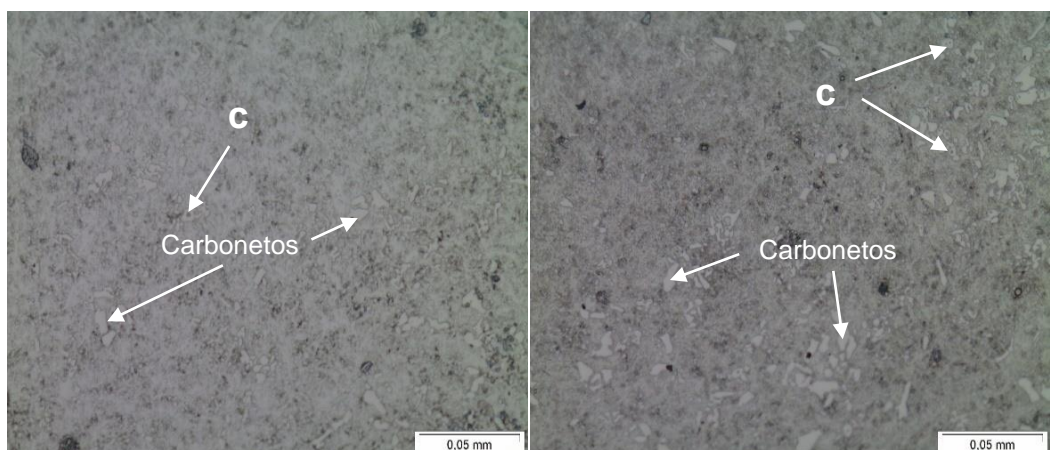
Na Fig. 18 (e) se revelou uma matriz perlítica com ocorrência de núcleos de bainita, sobre algumas regiões menores de martensita. Em (f) revelou-se uma matriz predominante perlítica com núcleos de ferrita indicada pela letra F.

Figura 19: Metalografias após ensaio *Jominy* CP 4 AISI D2, ataque com Nital 2% e lente de 500x: (a) Face 1; (b) Face 2; (c) Face 3; (d) Face 4; (e) Face 5; (f) Face 6



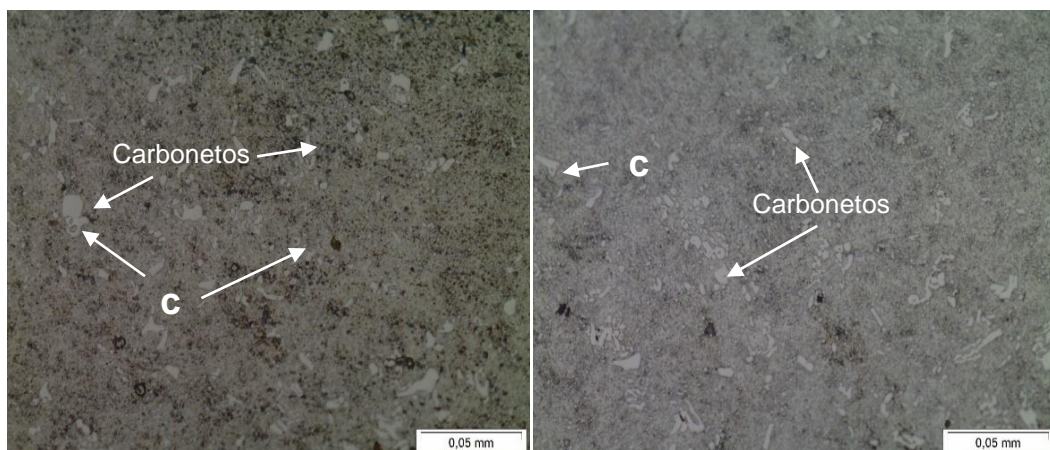
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Fonte: Do autor (2019)

Observa-se que praticamente todas as faces do CP 4 são formadas por uma matriz de martensita temperada, rica em carbonetos e mesmo com as menores taxas de resfriamento não se formou perlita e nem bainita. Os carbonetos maiores trata-se dos carbonetos primários que se formam durante o processo de solidificação do aço, os menores são os carbonetos secundários provenientes dos tratamentos térmicos o qual o aço foi submetido. Destacou-se microconstituintes indicados pela letra C no centro dos carbonetos, que são núcleos de martensita que ficaram aprisionados no centro de carbonetos que se agruparam.

5 CONCLUSÕES

Correlacionando as taxas de resfriamento calculadas, as microestruturas reveladas em cada face juntamente com os valores de dureza e microdureza coletados chegou-se a algumas conclusões.

A taxa de resfriamento e a composição química estão diretamente ligadas quando deseja-se elevar a dureza pelo tratamento térmico de têmpera. Para um aço com 0,4% de carbono é necessário utilizar taxas de resfriamento médias de 19°C/s para obter estrutura martensítica. Já para um teor de carbono de 1,4% pode-se aplicar uma taxa de resfriamento de 1,9°C/s e também obter estrutura martensítica.

O aço SAE 4140 mostrou-se um aço de boa temperabilidade, porém requer um controle maior na velocidade de resfriamento para obtenção de estrutura monofásica. Observou-se que uma queda de apenas 3°C/s na taxa de resfriamento, já foi o suficiente para formar microestruturas distintas e uma queda brusca na dureza. Outro fator relevante deste aço é a capacidade de combinação de microestruturas diferentes para obter uma boa relação de dureza, resistência mecânica e tenacidade.

Quanto ao aço AISI D2, confirmou-se que se trata de um aço de elevada temperabilidade, pois obteve-se valores de dureza em torno de 50 HRc em praticamente toda a região analisada, confirmando os valores indicados pela literatura

para a temperatura de austenitização aplicada. Com a variação da temperatura de resfriamento, obteve-se variância no tipo e conseqüentemente na dureza dos carbonetos presentes em cada face partindo de 3000 HV na primeira face e chegando em 1800 HV na última face (sabendo que a dureza dos carbonetos influencia diretamente na resistência ao desgaste abrasivo, que é a principal característica de um aço ferramenta). Em relação a quantidade de carbonetos obteve-se uma distribuição homogênea em todas as faces analisadas.

Acredita-se que caso fosse adotada uma temperatura de austenitização em torno de 1100°C para o AISI D2, os valores de dureza da matriz se aproximariam de 60 HRc, assim ocorreria uma maior concentração de carbono dissolvido na austenita e posteriormente na matriz martensítica, porém, haveria diminuição na quantidade de carbonetos e conseqüentemente queda na resistência ao desgaste abrasivo.

Para trabalhos futuros utilizando esse dispositivo é interessante fazer a substituição do arduino por uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*, evitando travamentos originados no arduino e maior facilidade na elaboração dos gráficos e cálculos das taxas de resfriamento.

Agradecimentos

Ao meu orientador Fábio Peruch, pelo apoio e conhecimentos compartilhados durante a execução deste trabalho, aos bolsistas Eric e Marcos Paulo pelo apoio na realização dos ensaios. Aos meus familiares e minha namorada que me incentivaram durante a realização deste trabalho.

6 BIBLIOGRAFIA

ASTM A255-10, "Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel", Conshohocken, PA, 2018.

ASTM International, ASTM E3 – 11 (2017). Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. Conshohocken : ASTM International, 2017.

ASTM International, ASTM E18: Standard Test Methods for Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM; 2017.

ANDREWS, K.W. Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 203, Part 7, July 1965, 721-727

ASKELAND, D. R. e PHULÉ P. P., *Ciência e Engenharia dos Materiais*. Primeira Edição. Editora Cengage Learning, São Paulo, 2006.

ASM HANDBOOK. Heat Treatment. ASM, Vol.4, 1985.

ASM HANDBOOK. Metallography and Microstructures. ASM Vol.9, 2004.

Callister, Jr. William D.; Rethwisch, David G. "Materials Science and Engineering: An Introduction". 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Utah: Wiley, 2009.

Celestino, P. A. P.; Felipe, R. C. T. S.; Machado, T. G. (2007). "Análise Comparativa entre o Tratamento Térmico (Têmpera) e o Tratamento Termoquímico (Cementação) realizado em Aço 1040". *HOLOS*, v. 3. doi: 10.15628/holos.2007.147

DATA SHEET, AISI 4140: Latrobe Specialty Steel Company, disponível em: http://fordtoolsteels.com/wp-content/uploads/sites/85/2017/10/LSS_4140-4142HT.pdf, acesso em 03 de Outubro de 2019.

Fernandes, 2014, "Caracterização das Microestruturas Obtidas por Meio de Ensaio *Jominy* Monitorado do Aço SAE 1026", *Cadernos UniFOA*, Edição N°24.

FINKLER, H. & SCHIRRA, "M. Transformation Behavior of High Temperature Martensitic Steels with 8 to 14% Chromium". *Steel Research*, 67:8, August 1986, p. 328-336

GGD Metals, Aços Ferramenta: Aço AISI D2, disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/produto/aisi-d2/>, acesso em 01 de Maio de 2019.

GGD Metals, Aços Para Construção Mecânica: Aço SAE 4140, disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-4140/>, acesso em 01 de Maio de 2019.

GUIMARAES, José Roberto Costa; RIOS, Paulo Rangel. "Microstructural Path Analysis of Martensite Dimensions in FeNiC and FeC Alloys". *Mat. Res.*, São Carlos, v. 18, n. 3, p. 595-601, June 2015.

Jayprakash Chipalkatti, “MODELING OF AUSTENITE DECOMPOSITION IN AN AISI 4140 STEEL, UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA”, PhD Thesis, 1999, pp. 20, 79.

Karl, E. Thelning, “Steel and its Heat treatment”, 2nd ed., Butterworth, London, 1984, p. 145.

Llewellyn D., Hudd R. “Steels: Metallurgy and Applications”. Third Edition. Butterworth-Heinemann. Madras. Índia. 2004.

MORELLI SERNA, MARILENE. “Quantificação e identificação de carbonetos no aço ferramenta AISI/SAE M2”. 2008. 108 p. Tese (Doutorado em Ciências na Área de 63 Tecnologia Nuclear – Materiais.) - IPEN, São Paulo, 2008.

NUNURA, César Rolando, “Correlação Numérico-experimental da Microestrutura, Taxa de Resfriamento e Características Mecânicas do Aço ABNT 1045”. 2009. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

Produção de Aço Bruto Junho 2019. World Steel, 2019. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2019/June-2019-crude-steel-production.html>>. Acesso em: 10 de Agosto de 2019.

REBECHI, João Guilherme. “Correlações Numéricas entre Taxas de Resfriamento, Microestruturas e Propriedades Mecânicas para o Tratamento Térmico do Aço AISI/SAE 4140”. 2011. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre.

TESTMAT, Tratamento Térmico e Gráfico da Curva TTT, disponível em <http://www.testmat.com.br/blog/2013/09/23/tratamento-termico-e-grafico-curva-ttt>, acesso em 01 de Maio de 2019.