

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

THIAGO FRANÇA REGES

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE TÊMPERA NA ENERGIA DE IMPACTO E  
FRATURA DE BARRAS DE DISPOSITIVO QUICK-STOP PARA USINAGEM

Uberlândia

2022

THIAGO FRANÇA REGES

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE TÊMPERA NA ENERGIA DE IMPACTO E  
FRATURA DE BARRAS DE DISPOSITIVO QUICK-STOP PARA USINAGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva

Uberlândia

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R333 Reges, Thiago França, 1999-  
2023 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE TÊMPERA NA ENERGIA DE  
IMPACTO E FRATURA DE BARRAS DE DISPOSITIVO QUICK-STOP  
PARA USINAGEM [recurso eletrônico] / Thiago França  
Reges. - 2023.

Orientador: Leonardo Rosa Ribeiro da Silva.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Silva, Leonardo Rosa  
Ribeiro da, 1991-, (Orient.). II. Universidade Federal  
de Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III.  
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

THIAGO FRANÇA REGES

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE TÊMPERA NA ENERGIA DE IMPACTO E  
FRATURA DE BARRAS DE DISPOSITIVO QUICK-STOP PARA USINAGEM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Uberlândia, 09 de fevereiro de 2023

Banca Examinadora:

---

Leonardo Rosa Ribeiro da Silva – Professor Adjunto (UFU)

---

Éder Silva Costa – Professor Adjunto (UFU)

REGES, T. F. (2023). Influência das condições de têmpera na energia de impacto e fratura de barras de dispositivo quick-stop para usinagem. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brasil.

## **RESUMO**

As principais variáveis do processo de usinagem dependem de fenômenos relacionados à formação do cavaco na interface cavaco-ferramenta. Para estudar esses fenômenos, utiliza-se o quick-stop, um dispositivo que interrompe o corte instantaneamente ao aplicar um impacto repentino no suporte da ferramenta, arremessando-a para baixo numa velocidade superior à velocidade de corte, de forma que o cavaco remanescente permanece com as características do processo de corte investigado. O suporte é apoiado por um pino fusível, feito de material frágil que tenha rigidez suficiente para suportar a força de usinagem, mas que quebre facilmente com o impacto do quick-stop. Este trabalho consiste no estudo da fragilidade de pinos de aço SAE 1045 através de ensaios de impacto nas peças temperadas. As barras usadas como pinos fusíveis foram temperadas em forno mufla sob diferentes condições de temperatura, tempo e meio de resfriamento, segundo um planejamento experimental do tipo fatorial completo  $2^3$ . Estas peças foram então submetidas a ensaio de impacto do tipo Izod, no qual a amostra é engastada na posição vertical e atingida por um pêndulo livre, medindo-se a energia necessária para a fratura da amostra. Os resultados permitiram o estudar a influência das variáveis de têmpera na fragilidade da peça, a fim de escolher a condição de têmpera ideal para conseguir o rompimento do pino durante os ensaios de torneamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** torneamento, quick-stop, ensaio de impacto, aço 1045.

REGES, T. F. (2023). Influence of quenching conditions on impact and fracture energy of quick-stop device bars for machining. Undergraduate completion work, Federal University of Uberlândia, Uberlândia-MG, Brazil.

### **ABSTRACT**

The main variables of the machining process depend on phenomena related to chip formation at the tool-chip interface. To study these phenomena, the quick-stop is used, a device that instantly interrupts the cut by applying a sudden impact on the tool holder, throwing it downwards at a speed higher than the cutting speed, so that the remaining chip remains with the characteristics of the investigated cutting process. The bracket is supported by a fusible pin, made of fragile material that has strong enough strength to withstand the force of machining, but breaks easily under quick-stop impact. This work consists of studying the brittleness of SAE 1045 steel pins through impact tests on quenched parts. The bars used as fusible pins were tempered in a muffle furnace under different conditions of temperature, time, and cooling medium, according to a 2<sup>3</sup> full factorial experimental design. These parts were then tested in an Izod-type impact test, in which the sample is set in a vertical position and hit by a free pendulum, measuring the energy required to fracture the sample. The results allowed studying the influence of temperature variables on the brittleness of the part, to choose the ideal temperature condition to obtain the collapse of the pin during the turning tests.

**KEYWORDS:** turning, quick-stop, impact test, 1045 steel.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	7
1.1. Objetivos.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	8
2.1. Formação do cavaco em usinagem .....	8
2.2. Quick stop .....	9
2.3. Têmpera de metais .....	10
2.4. Testes de impacto .....	11
3. METODOLOGIA.....	12
4. RESULTADOS .....	17
5. CONCLUSÕES .....	21
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	22

## **1. INTRODUÇÃO**

Para realizar estudo do cavaco (zonas de aderência, curvatura, etc.) é preciso avaliar sua interface com a ferramenta no momento exato do corte. Se um corte é interrompido de maneira tradicional, com uma desaceleração progressiva, à medida que a velocidade cai, o cavaco se molda para a respectiva velocidade de corte, em que as características diferem do que vigoram durante o processo de corte. Assim sendo, o último cavaco formado não será útil como objeto de estudo. Então, para resolver tão questão utiliza-se nas pesquisas em usinagem um equipamento capaz de interromper o corte de forma instantânea. Este equipamento é conhecido como quick-stop, que aplica um impacto repentino no suporte da ferramenta, arremessando-a para baixo numa velocidade superior à velocidade de corte, de forma que o cavaco remanescente permanece com as características do processo de corte realizado na velocidade de trabalho investigada. O suporte é apoiado por um pino fusível, feito de material frágil que tenha rigidez suficiente para suportar a força de usinagem, mas que quebre facilmente com o impacto sobre o quick-stop. Este trabalho consiste no estudo da fragilidade de pinos de aço SAE 1045 através de ensaios de impacto nas peças temperadas. Estes pinos consistem numa peça essencial ao funcionamento do equipamento, de maneira que sua fragilidade deve ser ajustada conforme os materiais a serem torneados. Essa propriedade pode ser avaliada através do ensaio de impacto do tipo Izod, no qual a amostra é engastada na posição vertical e atingida por um pêndulo livre, medindo-se a energia necessária para a fratura da peça. Para isso, deve-se entender a influência das principais variáveis de têmpera na fragilidade da peça, a fim de escolher a condição de têmpera ideal para conseguir o rompimento do pino durante os ensaios.

### **1.1. Objetivos**

Tem-se por objetivo geral a determinação das condições de têmpera mais adequadas para a fragilização dos pinos-fusível usados no quick-stop, avaliando-as através de ensaio de impacto normatizado. Para tal será utilizado um planejamento experimental que permita comparar pelo menos dois níveis de temperatura de austenitização, de tempo de aquecimento e dois tipos de meio de resfriamento. Posteriormente, as amostras serão fraturadas por pêndulo conforme o ensaio de impacto normatizado, e os valores de energia de impacto serão medidos para avaliação da fragilidade e determinação das condições de têmpera otimizadas para a faixa de trabalho do equipamento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Formação do cavaco em usinagem

O material removido da superfície da peça durante a usinagem é denominado cavaco, que é o subproduto final presentes em todas as operações de corte, e pode variar (em tipo, forma e extensão) entre os processos de usinagem ou no mesmo processo mudando as condições de corte. Pode-se dizer que a formação do cavaco é influenciada pela geometria da ferramenta (ângulo de saída, ângulo de posição, ângulo de inclinação da aresta e raio de ponta da ferramenta), material da peça (limite de escoamento, tenacidade e ductilidade), fluido de corte (tipo e método de aplicação), material da ferramenta (dureza, resistência ao desgaste e tenacidade), condições de corte (avanço, profundidade de corte e velocidade de corte), quebra-cavaco (postiço ou integral) e máquina-ferramenta (características estática e dinâmica) (FERRARESI, 1977).

Machado et al. (2011) divide a formação do cavaco em quatro eventos bem distintos: (1) recalque inicial, quando a cunha cortante penetra na peça e deforma elasticamente; (2) deformação plástica, quando o material pressionado contra a cunha de corte entra no regime plástico e se deforma na chamada “zona de cisalhamento primário”, mostrada esquematicamente na Figura 1; (3) ruptura, quando o material em deformação na aresta atinge o limite máximo de resistência e rompe pela abertura de uma trinca na aresta de corte. As propriedades do material e as condições de avanço e de velocidade de corte, além de outros fatores, irão determinar a extensão de propagação da trinca ao longo do plano de cisalhamento primário o que dará origem a cavacos contínuos ou descontínuos. (4) deslizamento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

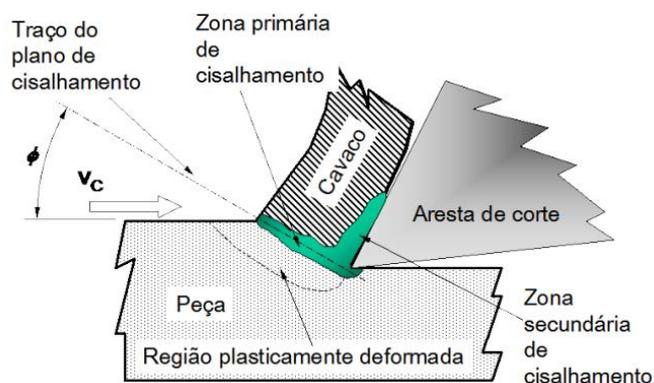


Figura 1. Esquema mostrando as zonas de cisalhamento primária e secundária (MACHADO et.al., 2011).

## 2.2. Quick stop

O estudo da interface cavaco-ferramenta é um grande desafio, pois não é possível avaliar diretamente a interface cavaco-ferramenta durante o processo de corte, uma vez que as velocidades de saída dos cavacos são muito elevadas, a interface cavaco-ferramenta tem pequena área de contato e está submetida a altíssimas pressões na zona de cisalhamento primária (CHERN, 2005). Assim, a intenção do método quick-stop é “congelar” o corte durante a usinagem para obter informações mais detalhadas sobre a estrutura do material deformado na raiz do cavaco. Dessa forma, as análises teóricas, em conjunto com observações diretas da microestrutura deformada, contribuem diretamente para o entendimento do mecanismo da formação do cavaco. Nos dispositivos quick-stop, a ferramenta de corte é retraída com velocidade superior à velocidade de corte (de duas a três vezes maiores), deixando a raiz do cavaco em condições de análise detalhada por meio de microscopia. Basicamente, esses dispositivos têm a função de estabelecer a operação de corte com o suporte da ferramenta apoiado em um pino de aço temperado. Esse pino possui rigidez suficiente para suportar as forças de corte, porém tem baixa tenacidade ao impacto, para fraturar sem deformação. Quando a formação do cavaco está acontecendo, pela ação de um golpe brusco externo (que pode ser desferido manualmente ou por um dispositivo pneumático, pela ação de uma mola ou mesmo por um projétil a base de pólvora), o pino se rompe e a ferramenta é afastada da peça em alta velocidade, quase instantaneamente. A Figura 2 mostra uma foto de raiz de cavaco conseguida num teste de quick-stop.

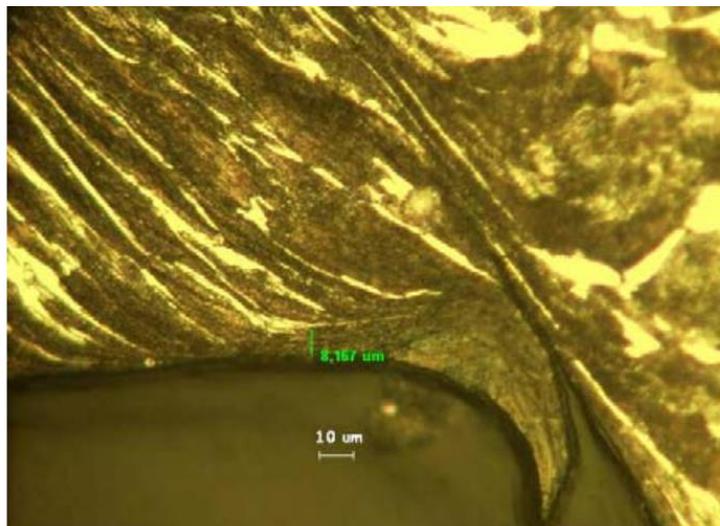


Figura 2. Formação de APC na raiz de um cavaco de aço SAE 1050, avaliada após ensaio com quick-stop. Adaptado de Sousa (2013).

O Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia já desenvolveu várias pesquisas com este dispositivo, sendo mais utilizada a versão com acionamento pneumático. Neste caso, uma cuíca de freio de caminhão é acionada pela abertura de uma válvula de ar comprimido, que desloca rapidamente o pistão da cuíca e provoca um impacto rápido e forte sobre o suporte da ferramenta, que permanece apoiado sobre um pino fusível, como mostrado em azul nos desenhos CAD da Figura 3(a) e Figura 3(b). As Figura 3(c) e Figura 3(d) mostram fotos do equipamento real montado no torno.

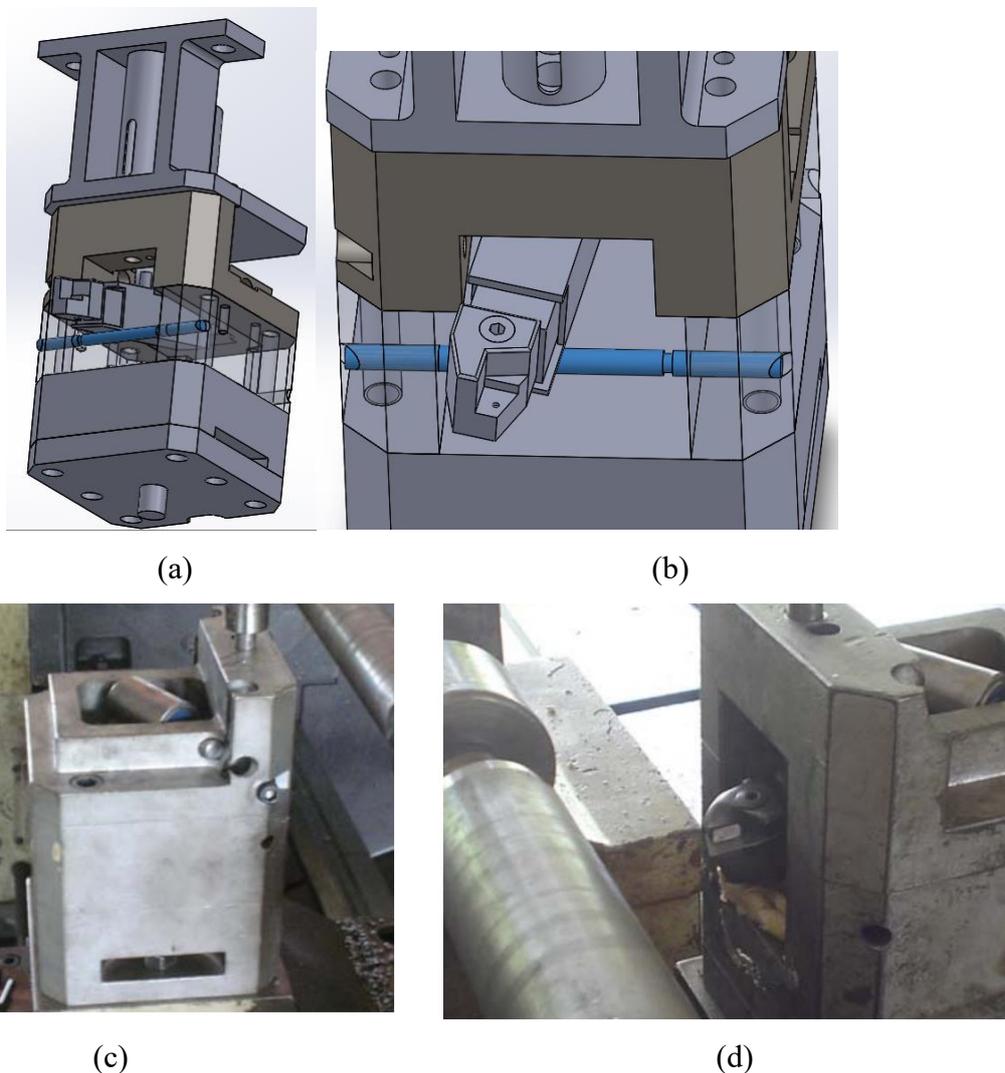


Figura 3. Desenho CAD (a, b) e fotos (c, d) do quick-stop pneumático usado no LEPU.

Adaptado de Luiz (2007).

### 2.3. Têmpera de metais

As propriedades mecânicas de um aço estão diretamente ligadas à sua microestrutura, que influencia na dureza, ductilidade, resistência mecânica e tenacidade. As diversas aplicações possíveis para um aço, requerem diferentes combinações de características, que são possíveis de serem obtidas através de tratamentos térmicos como a têmpera, na qual o aço aquecido acima da temperatura de austenitização é resfriado rapidamente, de forma que o carbono aprisionado na estrutura CFC austenítica não tenha tempo de difundir e formar cementita, ficando então retido na rede cristalina, distorcendo-a. A microestrutura resultante é a martensita, uma fase metaestável supersaturada de carbono, que devido à sua transformação por cisalhamento, modifica o reticulado cristalino gerando tensões internas que dificultam a propagação de discordâncias e deformação do material (CALLISTER, 2008). Assim, devido à baixa capacidade de deformação, apresenta maior dureza, porém com baixa tenacidade, tornando esse tratamento ideal para produção dos pinos fusíveis para o quick-stop.

As características das peças temperadas variam de acordo com a taxa de transferência de calor entre a peça e o meio resfriamento aplicado no tratamento. Os meios de têmpera mais comumente utilizados são água, óleo, salmoura e, mais recentemente, soluções poliméricas. O processo de têmpera e aquecimento dos aços está diretamente relacionado à densidade do fluxo de calor. Vários fatores influenciam no mecanismo de têmpera do metal processado. Condições internas à amostra afetam a difusão de calor e a superfície da amostra e outras condições externas podem afetar o potencial de extração de calor do fluido, como: agitação, pressão e temperatura de trabalho dos fluidos. A severidade do tratamento térmico se refere à habilidade do fluido na extração de calor do aço aquecido. Quanto maior a severidade do meio maior será a distorção da peça. Existem representações quantitativas da severidade que presumem um coeficiente de transferência de calor constante em todo o processo de resfriamento, o que muitas vezes não é verdade. Quando utilizados meios de tempera como óleo e água, por exemplo, ocorre vaporização da solução, modificando o mecanismo de resfriamento do aço. Forma-se uma bolha de vapor que impede o fluxo de calor natural, sendo assim, o coeficiente de transferência de calor será diferente nesse momento, resultando em heterogeneidade na extração de calor (DA SILVA JUNIOR et al., 2016). Algumas referências (GGD METALS, 2023) sugerem que para aços 1045 a têmpera deve ser feita austenitizando em temperatura entre 820 – 850 °C por 1 hora para cada 25 mm de espessura da peça. O resfriamento pode ser em água ou polímero, embora óleo também possa ser usado para seções menores do que 10 mm se temperar a partir de 840 – 860°C.

#### **2.4. Testes de impacto**

O teste de impacto mais utilizado para avaliação de materiais metálicos segue a norma ASTM E23 (2018) e determina a energia de impacto e resistência ao impacto de uma barra com entalhe feita do metal de interesse. Nesse ensaio, uma única força com uma grande carga é aplicada ao corpo de prova, resultando em tensões multiaxiais. Os testes são realizados em temperaturas altas, baixas ou ambiente, com o objetivo de prever com precisão a probabilidade de uma fratura frágil. Existem duas configurações possíveis, Charpy e Izod. Na primeira, a amostra de metal é centralizada nos suportes do equipamento para ser atingida pelo pêndulo na superfície contraposta ao entalhe. Na segunda, a amostra de metal é engastada verticalmente no suporte do equipamento, sendo atingida pelo pêndulo na extremidade livre, na superfície que contém o entalhe, que fica no nível das garras. O esquema dos equipamentos pode ser visto na Figura 4. A energia do pêndulo é determinada pela sua massa e o ângulo inicial de soltura. Após a fratura, o pêndulo sobe até um ângulo menor do que o inicial, pois parte de sua energia mecânica foi transferida a amostra. Assim, a energia absorvida pela fratura da amostra é a energia de impacto e confere uma medida da tenacidade ao impacto do material.

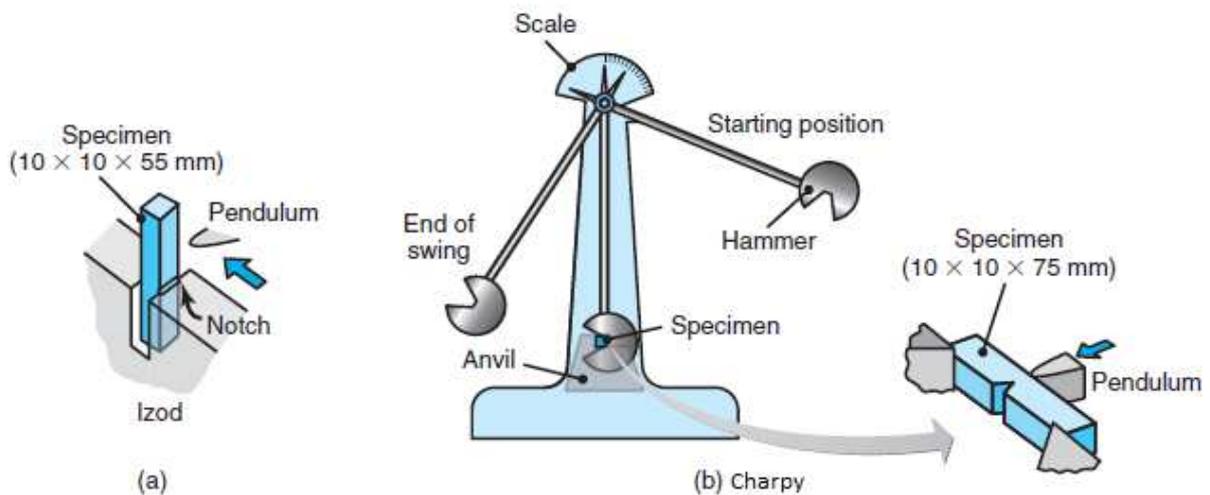


Figura 4. Representação dos ensaios de impacto por pêndulo, do tipo Izod e Charpy.

Adaptado de Green Mechanic (2023).

### 3. METODOLOGIA

A fim de avaliar o tratamento térmico mais adequado para ajustar a resistência ao impacto das peças utilizadas no quick-stop, as amostras foram produzidas com a mesma geometria da barra usada como pino fusível. As peças cilíndricas de aço AISI 1045 foram

preparadas por torneamento até as dimensões finais mostradas na Figura 5, conferindo-as com paquímetro analógico de resolução 0,1 mm e faixa de medição de 0 a 150 mm, e considerando aceitável um desvio de até 0,5 mm no seu diâmetro. Em seguida, o processo de têmpera foi feito seguindo um planejamento experimental do tipo fatorial completo em 2 níveis e 3 variáveis, conforme a Tabela 1, para avaliação da influência da temperatura e tempo de tratamento térmico, além do meio de resfriamento. A variável de saída foi a energia de impacto absorvida pelas amostras.

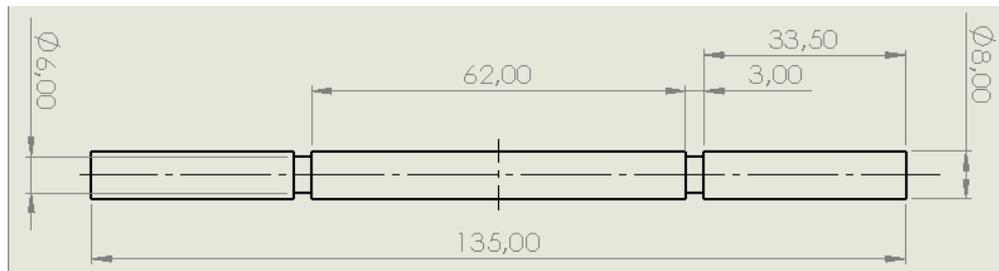


Figura 5. Dimensões dos corpos de prova torneados, em milímetros.

Tabela 1. Planejamento experimental do tipo fatorial completo  $2^3$ , com produção de pelo menos 3 amostras para cada condição de têmpera.

Condição de têmpera	Temperatura	Tempo	Meio de resfriamento
A	800°C	20 min	óleo
B			água
C		60 min	óleo
D			água
E	900°C	20 min	óleo
F			água
G		60 min	óleo
H			água

Durante o tratamento térmico, a temperatura do forno foi registrada utilizando um sensor termopar do tipo K, acoplado a um Arduino e módulo MAX31855, para amplificação do sinal e transmissão dos dados, tal como no trabalho de Campos et al (2020). A aquisição foi realizada numa taxa de 0,2 Hz, através do aplicativo Serial USB Terminal 1.46 num smartphone conectado ao sistema do Arduino por via USB. O sistema de aquisição utilizado pode ser visto

nas Figura 6(b) e Figura 6(c), junto com o esquema de conexão dos sensores e microcontrolador, na Figura 6(a).

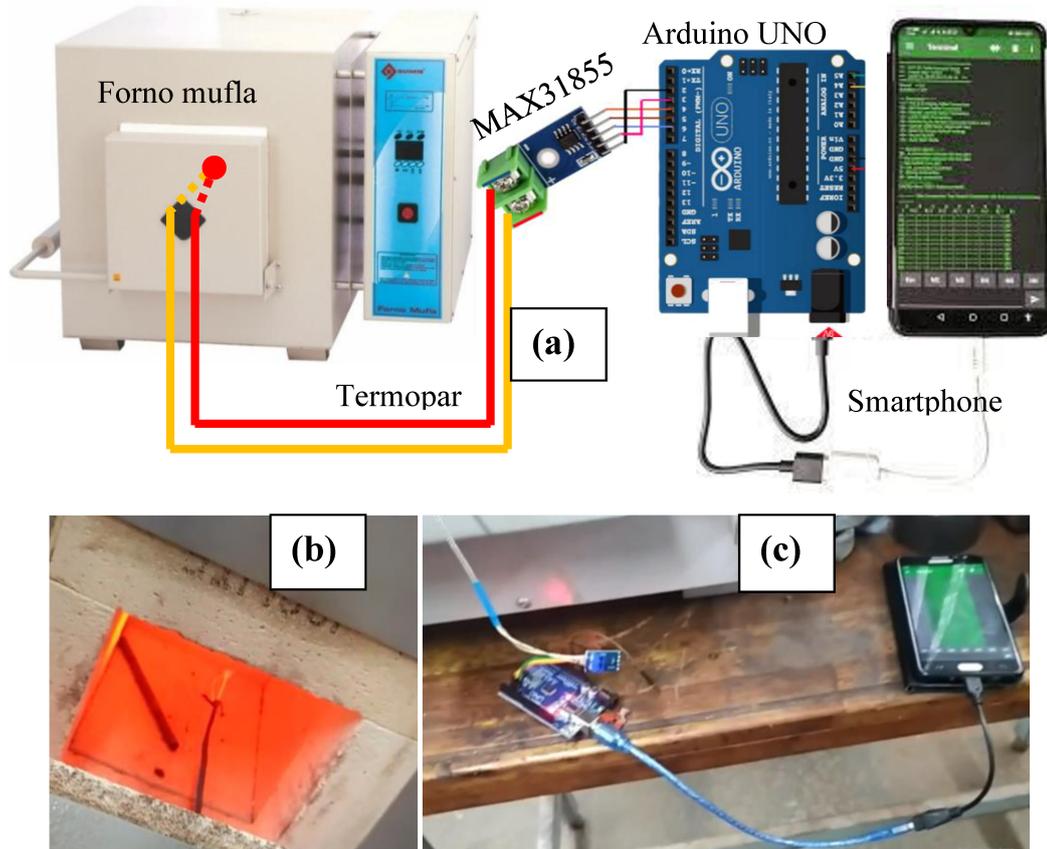


Figura 6. Sistema de medição e aquisição de temperatura baseado em Arduino UNO conectado ao smartphone, com módulo MAX31855 e termopar medindo a temperatura no forno mufla.

As curvas de temperatura dos ensaios podem ser vistas na Figura 7. Foram feitas apenas duas operações de têmpera no forno, com as condições de têmpera A a D na primeira e condições E a F na segunda operação. Inclusive, pode-se observar no gráfico de temperatura os momentos nos quais as amostras são retiradas do forno, pois ocorrem quedas significativas da temperatura do termopar ao abrir a porta do forno mufla. Para facilitar o manuseio, cada grupo de barras de suporte de quick-stop de uma mesma condição de têmpera foram amarradas com arame, formando um cacho. Logo após o aquecimento, o cacho de amostras era coletado com um gancho longo e mergulhado rapidamente nos meios de resfriamento, deixando as amostras repousarem por alguns minutos até esfriar completamente. Foi utilizada água da torneira e óleo de motor (usado) para a têmpera.

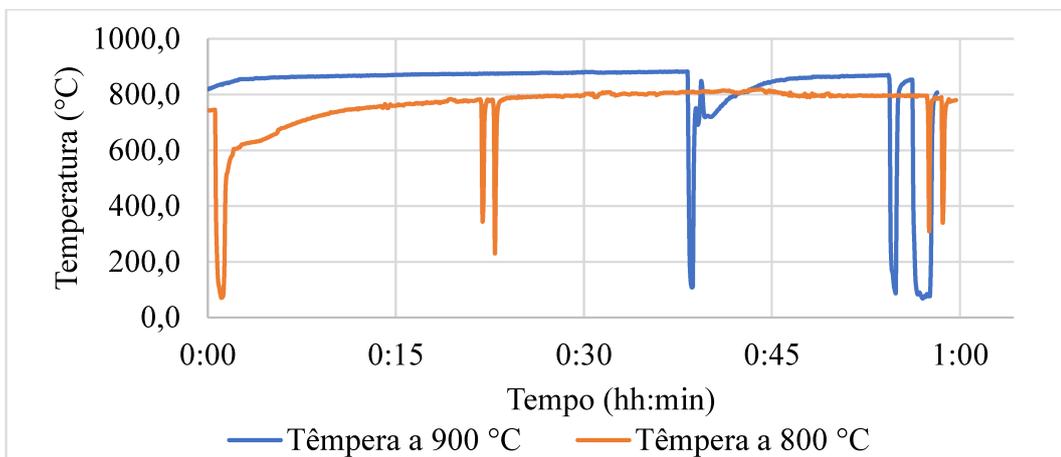


Figura 7. Curvas de temperatura do forno durante a austenitização dos pinos de aço 1045.

Os ensaios de impacto foram realizados seguindo as recomendações gerais da norma ASTM E23 (2018), para testes do tipo Izod, com a amostra na posição vertical, engastada na parte inferior. Vale ressaltar que as dimensões do corpo de prova adotado são diferentes das recomendadas pela norma, o que não impede a realização dos ensaios, uma vez que o item 8.1.2 permite modificação conforme as características do material a ser testado. Neste caso, os próprios rebaixos dos pinos foram usados como concentrador de tensão, simulando a condição que a peça estará submetida no momento do impacto aplicado pela cuíca do quick-stop.

O equipamento utilizado pode ser visto na Figura 8, e possui um sistema de medição do ângulo máximo atingido pelo pêndulo após impacto na amostra, com resolução de  $0,5^\circ$ . Dessa maneira, a resistência da amostra ao impacto é dada pela energia retirada do pêndulo após o impacto, que pode ser medida aplicando-se o princípio de conservação de energia mecânica para verificar a diferença na altura atingida pelo pêndulo. Assim, o cálculo da energia absorvida  $E$  (J), é feito pela diferença de energia potencial do pêndulo, conforme Eq. (1), no qual  $M$  é a massa total do pêndulo (Kg),  $g$  é a gravidade ( $m/s^2$ ), e  $h$  é a diferença entre a altura máxima do pêndulo (soltando o pêndulo livre, sem amostra no equipamento) e a altura atingida após impacto em cada amostra (m). O valor de  $h$  é calculado de acordo com o ângulo indicado pelo equipamento, a partir da relação geométrica da Eq. (2).

$$E = M \cdot g \cdot h \quad (1)$$

$$h = L \cdot \sin \theta \quad (2)$$

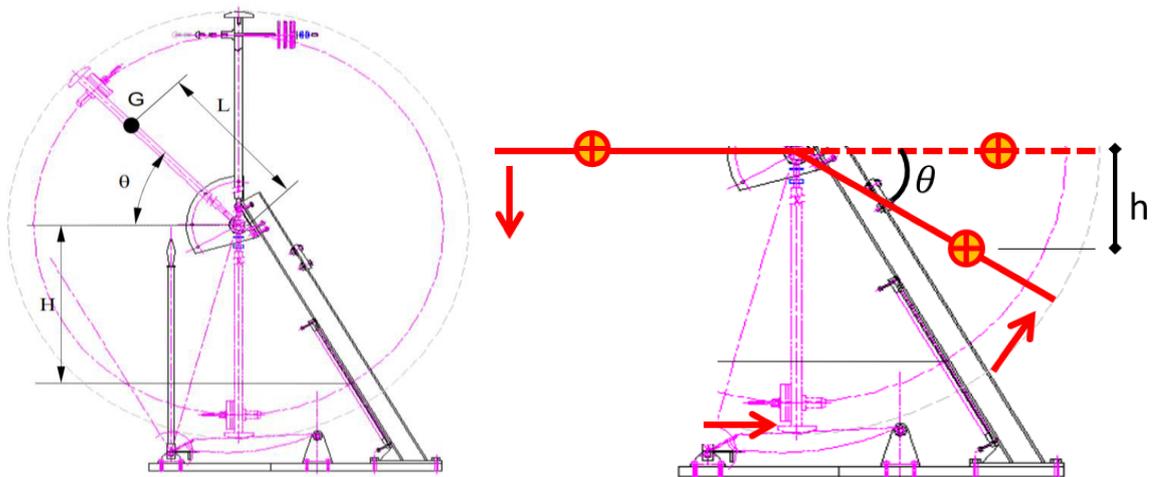


Figura 8. Desenho esquemático da máquina de ensaio de impacto com o pêndulo de centro de gravidade  $G$ , a uma distância  $L$  do centro de rotação, em diferentes posições iniciais de soltura. Após o impacto, o pêndulo subirá até menos do que sua altura inicial de soltura, devido a energia absorvida pela fratura da amostra. Adaptado de Tsuruta (2015).

Conforme indicado pela norma,  $E$  corresponde a energia consumida no rompimento da amostra e na sua aceleração. Dessa forma, foi utilizado o papel milimetrado observado na Figura 9 junto com câmera slow motion de smartphone para medir a velocidade com que o pedaço fraturado da amostra é arremessado para frente. Assim, calculou-se a energia absorvida corrigida  $E_c$ , que por sua vez é usada para calcular a energia de impacto  $E_I$  ao dividir o valor pela área de seção transversal da amostra de raio  $R$  no ponto de fratura, conforme indicado na Eq. (3), obtendo finalmente o valor em  $J/mm^2$ .

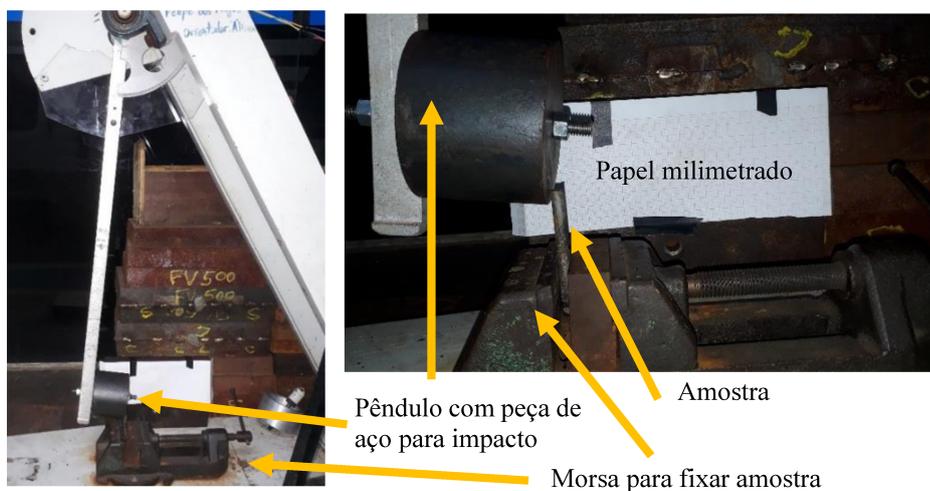


Figura 9. Equipamento usado nos testes de impacto do tipo Izod, com amostra engastada na posição vertical, e peça de aço para impacto fixada a barra do pêndulo.

$$EI = \frac{Ec}{\pi \cdot R^2} \quad (3)$$

Os valores obtidos para EI foram submetidos a análise de variância para verificação dos efeitos das variáveis Temperatura, Tempo e Meio de resfriamento na fragilidade das barras usadas como pino fusível do quick-stop. Foi utilizado o Software Statistica 12 para calcular o nível de significância e gráfico de Pareto com confiança de 95 %.

#### 4. RESULTADOS

As imagens das amostras impactadas pelo pêndulo no teste Izod podem ser averiguadas na Figura 10, onde percebe-se que as condições de têmpera A, C e E, todas resfriadas em óleo, não fragilizaram a amostra de maneira suficiente para seu rompimento. Nestes casos, a peça absorveu toda a energia do pêndulo sem romper, que equivale a aproximadamente 24,28 J, considerando que o pêndulo tem  $M = 5,81 \text{ Kg}$  e  $L = 0,471 \text{ m}$ . Já nas outras condições todas as amostras testadas se romperam, com fraturas que tem aspecto frágil, como pode ser visto pelo aspecto brilhoso da superfície de fratura, contrário ao aspecto fosco típico de fraturas dúcteis (CALLISTER, 2008).

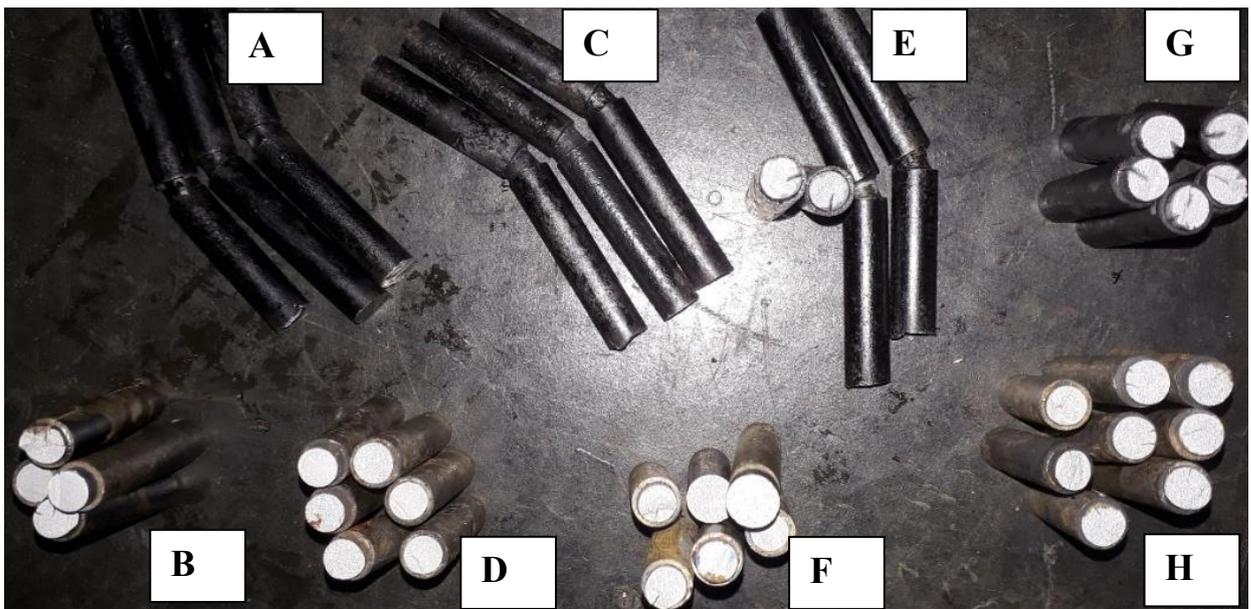


Figura 10. Aspecto da fratura para as amostras testadas, com condições A até D acima e E até H abaixo, da esquerda para direita.

A análise do gráfico da Figura 11 corrobora a observação de que a têmpera em óleo, embora comum para peças de aço (CHIAVERINI, 2003), não é adequada aos pinos do quick-stop, pois nessa condição a têmpera não tem severidade alta suficiente para permitir a fratura frágil da peça quando impactada pela cuíca. Observa-se também que as condições D, E e F apresentam alto desvio padrão, o que indica uma grande variação nas propriedades dos materiais testados. É possível que esse efeito seja causado por uma grande variabilidade nas condições metalúrgicas do material antes da têmpera. Os pinos de comprimento 135 mm foram cortadas de barras longas de 12 m, e é provável que tanto o teor de elementos de liga (tais como Si, Mn e C) como o tamanho médio dos grãos variem bastante entre as barrinhas, explicando tal comportamento.

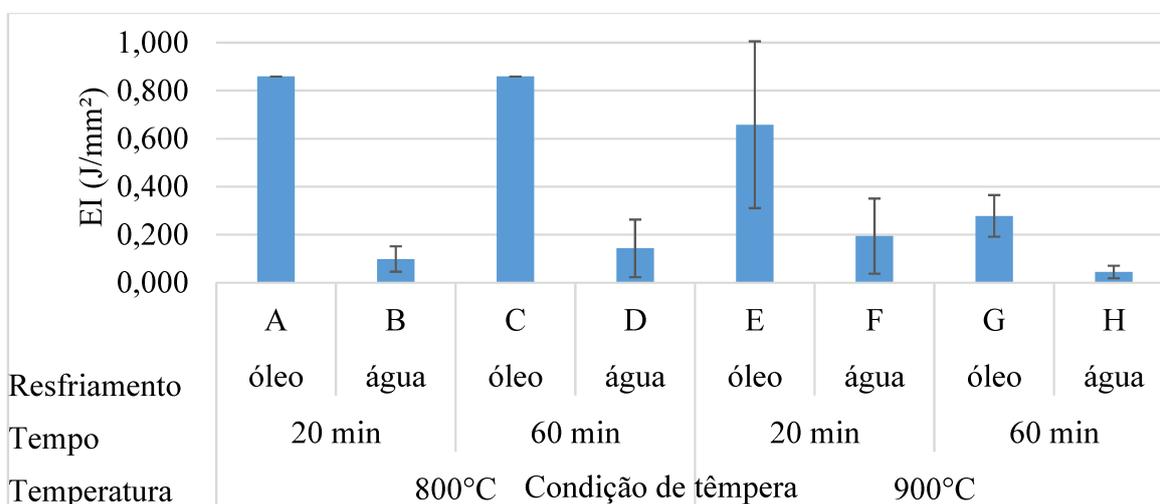


Figura 11. Energia de impacto (EI) absorvida pelas amostras nos testes Izod, de acordo com a condição de têmpera. Barras de erro iguais aos desvios padrão observados nos testes.

O resultado da análise de variância pode ser verificado na Figura 12, que mostra o nível de significância para as três variáveis avaliadas e seus efeitos combinados. Junto com o gráfico de Pareto da Figura 13, esses dados indicam que o fator mais importante para a têmpera foi o meio de resfriamento (3), seguido da temperatura de aquecimento (1) e dos efeitos combinados entre (1) e (3), e (1) e (2), enquanto o tempo (2) de têmpera e o efeito combinado de (2) com (3) foram os únicos fatores não estatisticamente significativos para nível de confiança de 95 %, pois apresentaram p-value maior do que 0,05.

ANOVA; Var.:EI (J/mm <sup>2</sup> ); R-sqr=,8744; Adj:,83007 (dados 2**(3-0) design; MS Residual=,0208658 DV: EI (J/mm <sup>2</sup> )					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Temperatura	0,230814	1	0,230814	11,06185	0,004000
(2)Tempo	0,088143	1	0,088143	4,22427	0,055547
(3)Resfriamento	1,771630	1	1,771630	84,90602	0,000000
1 by 2	0,123423	1	0,123423	5,91507	0,026355
1 by 3	0,227092	1	0,227092	10,88347	0,004239
2 by 3	0,028367	1	0,028367	1,35949	0,259724
Error	0,354718	17	0,020866		
Total SS	2,824186	23			

Figura 12. Análise de variância com nível de significância para o efeito na EI das variáveis de têmpera e suas combinações.

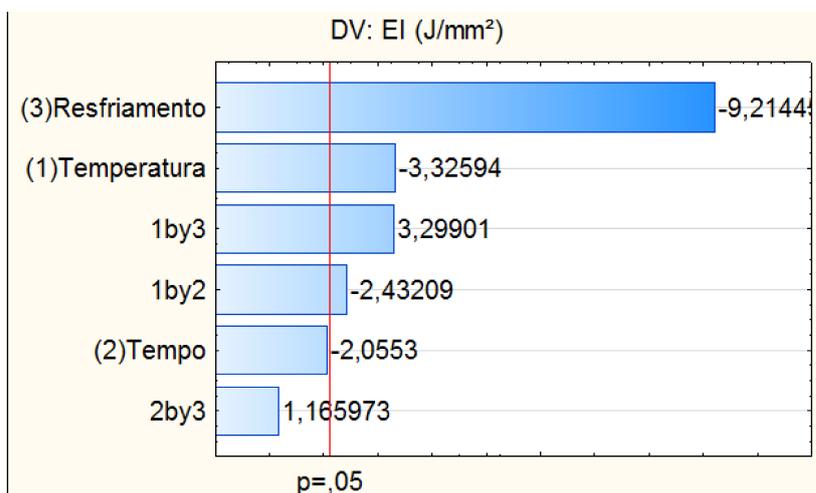


Figura 13. Gráfico de Pareto indicando os fatores mais importantes para a têmpera do material, considerando a energia de impacto da amostra.

Como explicado por Chiaverini (2003), o fator mais importante para obtenção da estrutura martensítica mais frágil durante a têmpera é o tempo de resfriamento na curva TTT, como pode ser visto no gráfico da Figura 14. Dessa maneira, devido aos maiores coeficientes de convecção e calor específico da água (300-6000 W/m<sup>2</sup>.K, 1 Kcal/g.°C) em relação ao óleo (60-1800 W/m<sup>2</sup>.K, 0,4 Kcal/g.°C), a água leva ao resfriamento muito mais rápido das amostras, fazendo com que o material permaneça majoritariamente na região de transformação martensítica do gráfico (DASSAULT SYSTEMES, 2023). Já o óleo, devido ao resfriamento lento, desloca a curva para direita e resulta numa estrutura menos frágil, que tem menos martensita e mais perlita.

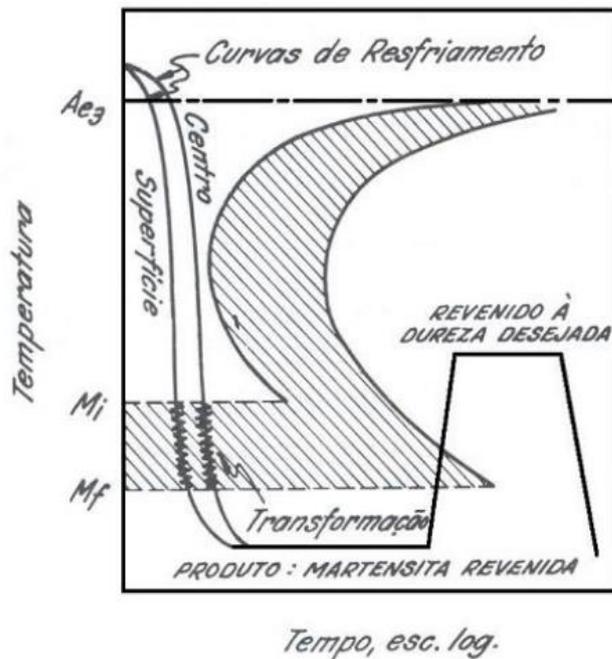


Figura 14. Exemplo de curva TTT para aços carbono. Adaptado de Oliveira e Denti (2007).

No caso da temperatura, a têmpera depende da dissolução do carbono na estrutura cristalina, e esse fenômeno é facilitado quando o material está na forma de austenita, o que ocorre acima de aproximadamente 787°C para o aço 1045 (Callister, 2008). Assim, em 900 °C a difusão do carbono é maior, e proporciona maior quantidade de martensita após a têmpera, conforme indicado no gráfico das médias da Figura 15. Embora o tempo também seja um fator importante para a difusão do carbono, com maior fragilidade para têmperas mais longas, como visto na Figura 15, esse fator não foi estatisticamente significativo. É provável que apesar de o tempo favorecer a formação de martensita, devido ao tamanho reduzido das amostras, as duas condições de tempo sejam suficientes para obter-se boa homogeneização de temperatura nos pinos e difusão suficiente do carbono para fragilização das peças.

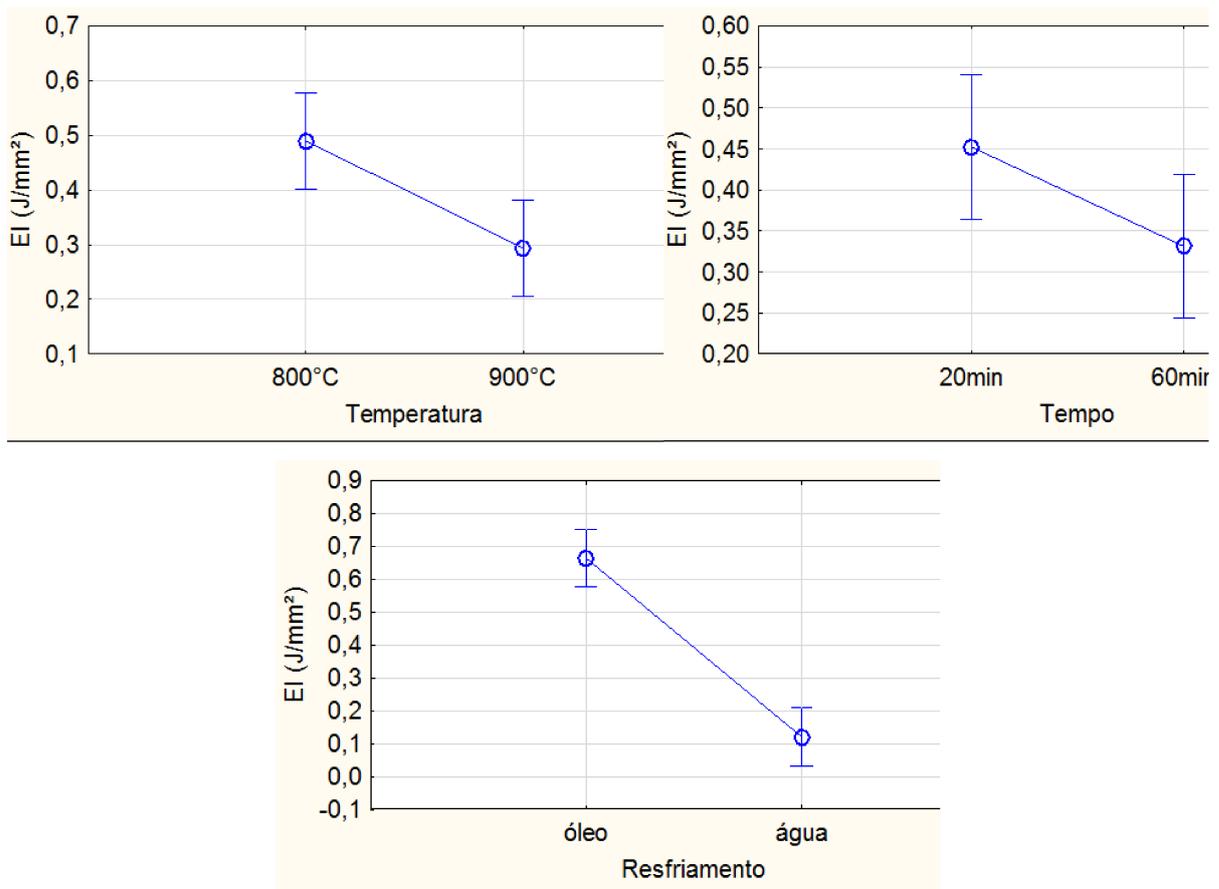


Figura 15. Médias marginais para energia de impacto das diferentes variáveis de têmpera das amostras.

## 5. CONCLUSÕES

Os experimentos de têmpera e testes de impacto foram conduzidos para avaliação dos efeitos da temperatura e tempo de austenitização, bem como o meio de resfriamento, na energia de impacto absorvida pelos pinos fusível do quick-stop durante a fratura por impacto. Foi utilizado um planejamento experimental do tipo fatorial completo  $2^3$ , com análise de variância para revelar as variáveis mais significativas. A partir disso, considerando a metodologia proposta e os resultados obtidos, pode-se destacar as seguintes conclusões:

- O meio de resfriamento teve o efeito mais significativo na energia de impacto das barras. As têmperas em óleo têm severidade muito baixa, levando a estruturas cristalinas que nem sempre fraturam sob impacto, sendo, portanto, inadequadas para a produção de pinos para o quick-stop.

- A temperatura do forno para austenitização teve efeito significativo, com valores maiores favorecendo a difusão do carbono na estrutura cristalina e produzindo pinos mais frágeis, sendo mais adequados a utilização no quick-stop.
- Os maiores tempos de têmpera provocaram maior redução da energia de impacto na média, porém, de forma não estatisticamente significativa, provavelmente pelo fato de que os dois níveis utilizados produzem difusão suficiente do carbono na estrutura para geração de martensita no resfriamento rápido.
- A condição de têmpera mais adequada para a produção dos pinos foi a H, com as peças por 60 min no forno 900 °C e resfriamento em água. Neste caso, além de obter-se a menor energia de impacto, houve também menor desvio padrão, gerando melhor uniformidade dos pinos fusíveis.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM E23-2018. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials

CALLISTER JR, W. D. (2008). *Ciências e Engenharia de Materiais: Uma introdução*: Editora LTC. Rio de Janeiro.

CAMPOS, F. A. R., OKADA, K. F. A., DA SILVA, L. R. R., MACHADO, A. R. E OTAGURO. H. (2020). “Quantification of uncertainty in temperature measurements with thermocouple and Arduino® compatible hardware”. *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering- ENCIT 2020*. doi://10.26678/ABCM.ENCIT2020.CIT20-0792

CHERN, G. L. (2005). “Development of a new and simple quick-stop device for the study on chip formation”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 45, n. 7-8, p. 789-794.

CHIAVERINI, Vicente (2003). *Tratamento Térmicos das Ligas Metálicas*. 1. edição. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

DA SILVA JUNIOR, R. P., BIAZOTTO, G. C., VATAVUK, J. E CALICCHIO L. (2016). “Têmpera de aço SAE 1045 utilizando diferentes meios de resfriamento”. Contribuição técnica ao *71º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 16º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas*, Rio de Janeiro, Brasil.

DASSAULT SYSTEMES (2023). Ajuda do Solidworks: Coeficiente de calor de convecção.<<https://help.solidworks.com/2011/portuguese->

brazilian/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection\_Topics/Convection\_Heat\_Coefficient.htm>

FERRARESI, D. (1977). *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 751 p.

GGD METALS (2023). Tratamento térmico aço GGD 1045 <<https://www.ggdmets.com.br/wp-content/uploads/2015/07/A%C3%87O-1045.pdf>>.

GREEN MECHANIC (2023). Difference Between Izod and Charpy Test. <<https://www.green-mechanic.com/2014/04/difference-between-izod-and-charpy.html>>.

LUIZ, Nelis Evangelista (2007). “Usinabilidade do aço de corte-fácil baixo carbono ao chumbo ABNT 12L14 com diferentes níveis de elementos químicos residuais (cromo, níquel e cobre)”. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

MACHADO, Á. R., COELHO, R. T., ABRÃO, A. M., & DA SILVA, M. B. (2011). *Teoria da usinagem dos materiais*. Editora Blucher.

OLIVEIRA C. S., DENTI G. B. (2007). Avaliação da tenacidade ao impacto da região revenida pelo passe duplo em soldagem SMAW do aço AISI 1045. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

SOUSA, Marcelo do Nascimento (2013). “Influência das propriedades mecânicas das ligas de alumínio na usinabilidade foco no grau de recalque, na dimensão da zona de fluxo e na microdureza dos cavacos”. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TSURUTA, Karina Mayumi (2015). “Investigação numérica e experimental de dispositivos piezelétricos combinando geração de energia e atenuação de vibrações”. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. DOI <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2015.103>.