

EFEITO DO TRATAMENTO CRIOGÊNICO NA TAXA DE DESGASTE E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO FERRAMENTA H13

Renata Neves Penha, rnp@usp.br¹

Sandra dos Santos Vales, sandra.vales@usp.br¹

João Carmo Vendramim, vendramim@isoflama.com.br²

Lauralice de Campos Franceschini Canale, lfcanale@sc.usp.br¹

¹Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, São Carlos – SP, 13566-590

²Isoflama Ind. e Com. de Equip. Ltda, Rua 1, 799, Distr. Ind. João Narezzi, Indaiatuba – SP, 13347-402

Resumo: *O tratamento criogênico tem por objetivo transformar a austenita retida e melhorar a resistência ao desgaste dos aços ferramenta. Sabe-se que a criogenia pode ser realizada antes ou depois do revenido, de forma que o objetivo deste trabalho é investigar se a seqüência de tratamento térmico influencia nas propriedades finais obtidas. Nas amostras de aço H13, que passaram por diferentes ciclos de tratamento térmico, foram realizados testes de desgaste do tipo pino contra lixa, de impacto e de dureza. A análise de variância permite quantificar qual a influência de cada fator do processo e de suas interações em determinada propriedade. Assim, será estabelecido se o tempo de criogenia, a seqüência de tratamento térmico ou o tempo de envelhecimento ao ar após a têmpera podem influenciar na taxa de desgaste e nas propriedades mecânicas finais do aço ferramenta AISI H13.*

Palavras-chave: *tratamento térmico, desgaste, propriedades mecânicas, ANOVA, AISI H13*

1. INTRODUÇÃO

Os dispositivos para processos de conformação de materiais em alta temperatura, tais como matrizes, moldes e punções são feitos de aços ferramenta para trabalho a quente (Roberts, Krauss e Kennedy, 1998). Este grupo de aço geralmente contém teor médio de carbono (0,35 a 0,45%) e está dividido em três subgrupos: aços ligados ao cromo, ao tungstênio e ao molibdênio. O aço H13 é um aço ligado ao cromo e é utilizado principalmente em ferramentas para forjamento, extrusão, moldes para injeção de plásticos e fundição. Dentre as principais vantagens deste aço destacam-se a facilidade de conformação e usinagem, boa soldabilidade, coeficiente de expansão térmica relativamente baixo, condutividade térmica aceitável e uma resistência a oxidação e a corrosão acima da média (ASM International, 1990).

Segundo Molinari et al. (2001), o tratamento sub-zero é largamente utilizado nos componentes e peças de alta precisão, uma vez que ele propicia a transformação da austenita retida. O intervalo entre -60 e -80°C é onde se localiza a temperatura ótima de tratamento, variando de acordo com o material e os parâmetros de têmpera. O tratamento criogênico, por sua vez, é feito entre -125 e -196°C atingindo um melhoramento superior àquele obtido pelo tratamento subzero convencional para determinadas propriedades. Pellizzari et al. (2001) ressaltam ainda que o tratamento criogênico dos aços ferramenta é uma solução tecnológica para a obtenção de componentes de elevada resistência e tenacidade. A principal razão é a transformação completa da austenita retida somada a formação de pequenos carbonetos dispersos na estrutura de martensita revenida.

Segundo Molinari et al. (2001) o maior melhoramento nas propriedades de desgaste é obtido se o tratamento criogênico é feito entre a têmpera e o revenido. No entanto os mesmos autores relatam que se a criogenia for realizada após o tratamento térmico convencional também há uma melhora substancial das propriedades finais. Sendo esta uma solução mais flexível que a anterior do ponto de vista do processo de produção, de modo que se objetiva determinar a influência da seqüência de tratamento nas propriedades finais, utilizando para isto a técnica estatística de análise de variância com dois fatores.

A análise de variância (ANOVA) é similar à regressão no sentido de que é usada para investigar e modelar o relacionamento entre uma variável resposta e uma ou mais variáveis preditoras. Contudo, a análise de variância difere da regressão em dois pontos: as variáveis independentes são qualitativas, e nenhuma suposição é feita sobre a natureza do relacionamento (isto é, o modelo não inclui coeficientes para as variáveis). A ANOVA testa a igualdade de médias populacionais com uma hipótese nula mais geral de comparação de mais de duas médias, versus a desigualdade das mesmas. (Montgomery, 2009)

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Tratamento Térmico

Amostras do aço H13, cuja composição química pode ser observada na Tab. (1), foram austenitizadas a 1040°C e seguiram para a têmpera a vácuo a 5 bar de N₂. Para o estudo da influência da sequência de tratamento, os corpos de prova permaneceram por 1h, 24h ou 48h no banho criogênico, que foi realizado antes ou após o revenimento a 540°C durante duas horas. Para avaliar se um período de descanso entre a têmpera e o restante de tratamento poderia alterar as propriedades finais foram testadas duas condições, nas quais os corpos de prova permaneceram ao ar durante 24 h antes de continuar o processo. Para cada condição foram ensaiados três corpos de prova e a Fig. (1) mostra os processos investigados. Para o estudo da influência da sequência de tratamento foram utilizadas as condições C1 a C6 e para o estudo da influência do tempo de descanso foram utilizadas as condições C2, C5, C7 e C8.

Tabela 1. Composição química do aço AISI H13

%C	%Mn	%Si	%Cr	%V	%Mo
0,39	0,82	0,80	5,58	0,96	1,54

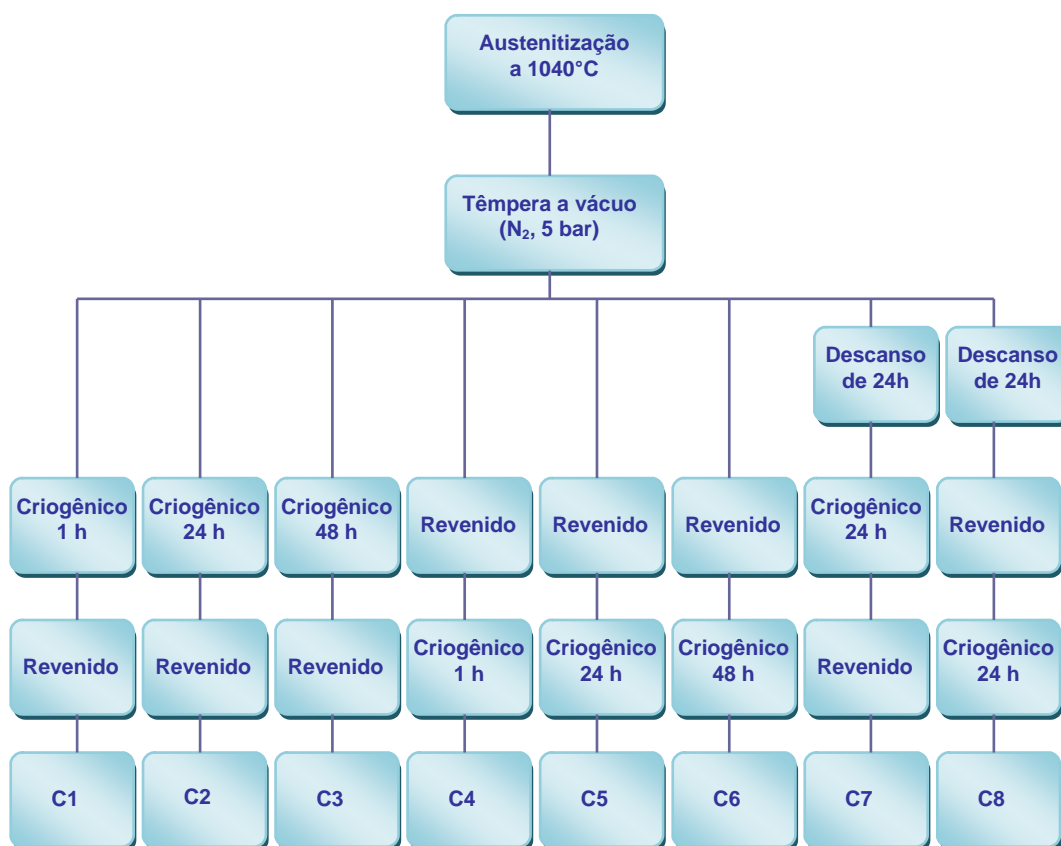


Figura 1. Ciclos de tratamento térmico

2.2. Testes Mecânicos

Os testes de impacto instrumentado Charpy-V entalhado seguiram a norma ASTM E23 (2007) e foram realizados em equipamento Instron Wolpert PW30, com velocidade inicial de 5,53m/s e 300J de impacto. A Fig. (2) traz as dimensões do corpo de prova utilizado. Na superfície destes corpos de prova também foram realizadas medidas de dureza na escala Rockwell C.

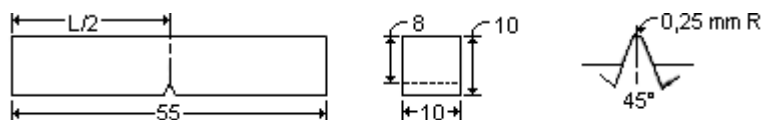


Figura 2. Corpo de prova utilizado no teste de impacto (ASTM E23, 2007).

2.3. Ensaio de abrasão

Os ensaios de abrasão foram realizados em um abrasômetro do tipo pino contra lixa, seguindo as diretrizes das normas da ASTM G99 – 95 (2007) e da ASTM G132 – 96 (2007). Os pinos foram confeccionados a partir dos corpos de prova de impacto. Por esta razão apresentavam seção transversal quadrática com 10 mm de cada lado e 15 mm de altura, como mostra a Fig. (3). O desenho esquemático de um sistema similar ao utilizado pode ser observado na Fig. (4). Foi utilizada uma velocidade rotacional fixa de 53 rpm, sob carga de peso morto de 1,5 N. Para cada condição foram realizados três testes, sobre lixas com granulometria #600. O percurso em espiral resultou em uma distância final percorrida de 25 m para cada lixa. A cada 200 voltas o corpo de prova era limpo e pesado a uma precisão de 0,1 mg, então a lixa era trocada e o procedimento repetido até completar o número máximo de 2000 revoluções.



Figura 3. Pino, utilizado no teste de abrasão, extraído do corpo de prova do teste de impacto.

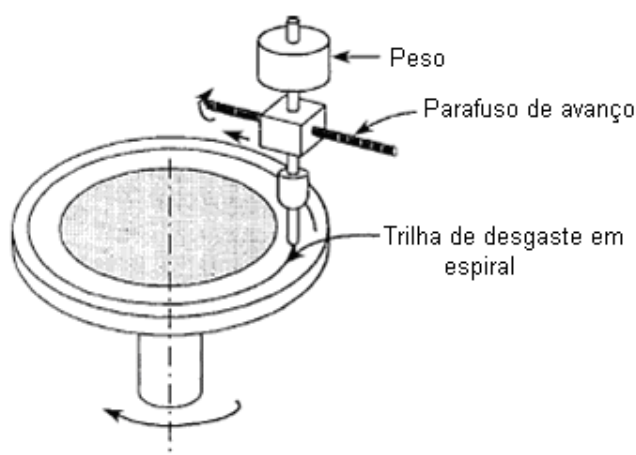


Figura 4. Configuração do abrasômetro do tipo pino sobre lixa (ASTM G132, 2007).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Fig. (5) é possível observar a massa perdida acumulada pela distância percorrida em cada condição. Nesta figura também se nota que a melhor condição corresponde ao banho criogênico de 24 horas após o revenimento e a pior ao banho criogênico de 1 hora antes do revenido. As taxas de desgaste correspondem à inclinação das curvas apresentadas na figura anterior e seus valores médios podem ser observados na Fig. (6).

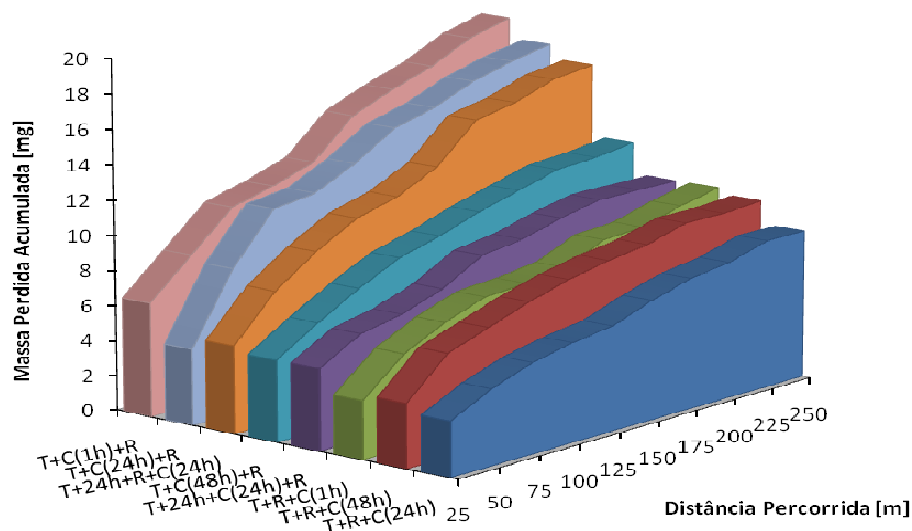


Figura 5. Volume perdido acumulado em função da distância percorrida para cada condição estudada.

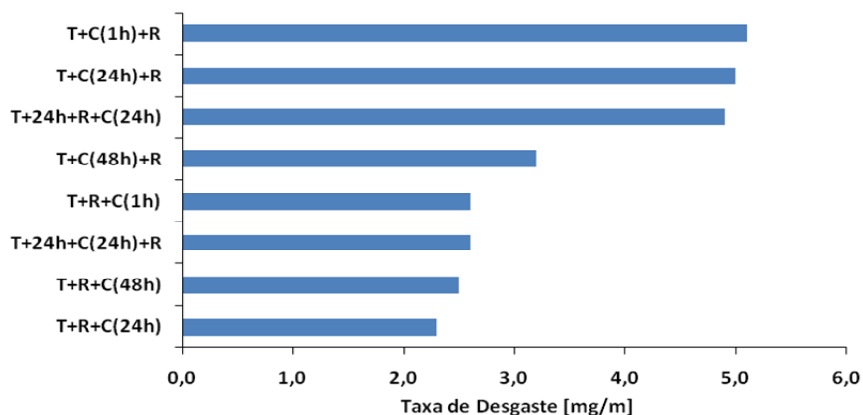


Figura 6. Taxa de desgaste para cada condição

Os resultados obtidos nos testes mecânicos: dureza e energia de impacto (E); estão resumidos na Tab. (2). Como é possível observar na Tab. (2), não há variação significativa da dureza, independentemente do tratamento aplicado. A energia e a tenacidade, por sua vez, sofrem variações importantes quando se modifica o processo de tratamento térmico. Na Fig. (7) mostra os valores médios da energia de forma ordenada, onde é possível observar que para esta propriedade a melhor condição é aquela que corresponde ao banho criogênico de 1h realizado antes do revenido, e a pior ao banho criogênico de 48h realizado antes do revenido.

Tabela 2. Resultados dos testes mecânicos

Condição	Dureza [HRC]	E [kJ/m ²]
T+C(1h)+R	53,1	82,5
T+C(24h)+R	53,3	70,0
T+C(48h)+R	51,1	65,9
T+24h+C(24h)+R	52,8	72,5
T+R+24h+C(24h)	52,0	71,6
T+R+C(1h)	53,3	70,6
T+R+C(24h)	52,0	68,0
T+R+C(48h)	52,0	76,8

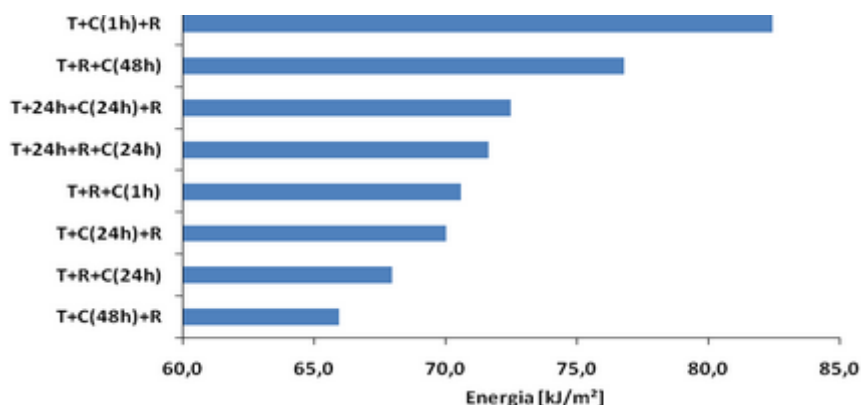


Figura 7. Energia de impacto para cada condição estudada.

Para avaliar o efeito do tempo de criogenia e da ordem de tratamento, isto é, se o banho criogênico ocorreu antes ou depois do revenido, na taxa de desgaste e nas propriedades mecânicas foi realizado um teste de ANOVA com dois fatores, cujo resumo pode ser observado na Tab. (3). Se o valor-p obtido for menor que o nível de significância de $\alpha=0,05$ indica que o fator analisado de fato influencia na propriedade final. No caso da taxa de desgaste fica evidente que apenas ordem de tratamento influencia seu resultado final. O tempo de criogenia não influencia as propriedades tribológicas, nem mesmo quando combinado à ordem de tratamento. Porém, para as propriedades mecânicas o tempo no

banho criogênico é um fator determinante. Nestes casos a sequência de tratamento só passa a influenciar o resultado final quando combinado com o tempo de tratamento criogênico.

Tabela 3. ANOVA de dois fatores para avaliar a sequência de tratamento e tempo de criogenia na taxa de desgaste, energia e dureza

	Taxa de Desgaste	Energia	Dureza
	Valor-p	Valor-p	Valor-p
Sequência de tratamento	0,001	0,655	0,802
Tempo no banho criogênico	0,163	0,041	0,000
Interação sequência de tratamento*tempo no banho criogênico	0,156	0,004	0,004

A Fig. 7 mostra os intervalos de confiança obtidos para o tempo de banho criogênico e para a ordem de tratamento na análise de variância da taxa de desgaste. A Fig. (7a) mostra que para o banho criogênico de 48h a taxa de desgaste tende a ser menor se comparada aos outros tempos, mas devido ao desvio padrão não é possível concluir que haja uma influência. A Fig. (7b) mostra os intervalos de confiança para a sequência de tratamento térmico, onde fica evidente que a taxa de desgaste é menor quando o banho criogênico foi realizado após o revenido, resultado semelhante ao obtido por Molinari et al. (2001). Neste caso os intervalos de confiança não se sobrepõem e por esta razão a ordem de tratamento influencia na taxa de desgaste.

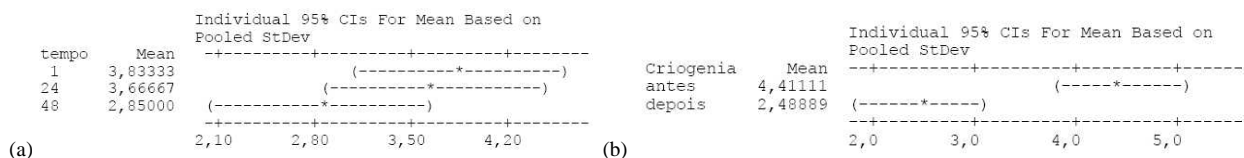


Figura 7. Intervalo de confiança calculado do teste de ANOVA para análise da influência do (a) tempo de criogenia e (b) ordem de tratamento na a taxa de desgaste.

A Tab. (4) traz o resumo dos resultados da análise de variância realizada para avaliar se o tempo de espera após a têmpera influenciaria no resultado final. Para um nível de significância de 0,05 é possível concluir que apenas a dureza é influenciada pelo tempo de descanso. Observa-se que a dureza diminui com o envelhecimento em temperatura ambiente por 24 horas. Este efeito poderia ser atribuído à estabilização da austenita e à diminuição dos solutos, mas estes fatores não foram quantificados neste trabalho. Já a combinação tempo de envelhecimento e sequência de tratamento influenciam na dureza e a taxa de desgaste.

Tabela 4. ANOVA para avaliar o efeito do tempo de descanso na taxa de desgaste, energia e dureza

	Taxa de Desgaste	Energia	Dureza
	Valor-p	Valor-p	Valor-p
Tempo de espera	0,061	0,339	0,032
Interação tempo de espera*sequência de tratamento	0,001	0,854	0,001

A Fig. (8) mostra os intervalos de confiança obtidos para o tempo de descanso e para a ordem de tratamento na análise de variância da dureza. A Fig. (8a) mostra que quando não é realizado o envelhecimento por 24 horas, a dureza tende a ser maior. Este fato pode estar relacionado ao fato de que este envelhecimento ao ar após a têmpera pode estabilizar a austenita e, portanto produzir um nível inferior de dureza, no entanto a quantidade de austenita retida não foi quantificada e, portanto não é possível fazer tal afirmação. Já a Fig. (8b) mostra os intervalos de confiança para a sequência de tratamento térmico, onde fica evidente que a dureza não sofre nenhuma modificação e a criogenia for realizada antes ou depois do revenido.

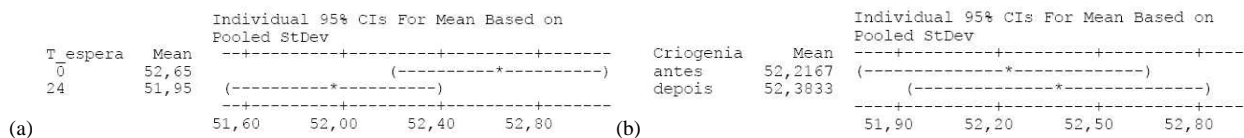


Figura 8. Intervalo de confiança calculado do teste de ANOVA para análise da influência do (a) tempo de envelhecimento e (b) ordem de tratamento na dureza.

4. CONCLUSÕES

O tratamento criogênico altera as propriedades finais do de trabalho à quente H13. É possível concluir que se a criogenia for realizada após o revenimento se obtém menores taxas de desgaste.

Já o tempo de criogenia não provoca grandes variações nas propriedades tribológicas, mas é uma variável de processo determinante para as propriedades mecânicas. Quanto menor o tempo no banho criogênico maior o nível de dureza alcançada.

Em relação ao período de descanso após a têmpera, pode-se concluir que ele provoca uma discreta diminuição na dureza, mas não provoca nenhuma alteração nem na taxa de desgaste, nem na energia necessária para romper o corpo de prova.

Este trabalho exemplifica o grande potencial em se utilizar a análise de variância para comparar processos de tratamento térmico.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Isoflama Ind. e Com. de Equip. Ltda e à FAPESP.

6. REFERÊNCIAS

- ASM Metals Handbook, 1990, “Properties and selection irons steels and high performance alloys”, Vol.1, ASM International, Materials Park, Ohio.
- American Society for Testing Materials, 2007, E23 –07a: standard methods for notched bar impact testing of metallic materials. USA: ASTM International.
- American Society for Testing Materials, 2007, EG99-04: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. USA: ASTM International.
- American Society for Testing Materials, 2007, EG132-96: Standard Test Method for Pin Abrasion Testing, USA: ASTM International.
- Molinari, A., et al., 2001, “Effect of deep cryogenic treatment on mechanical properties of tool steels”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, pp. 350-355.
- Montgomery, D. C., 1991, “Design and Analysis of Experiments”, Third Edition, John Wiley & Sons.
- Pellizzari, M., et al., 2001, “Effetto del trattamento criogenico sulle proprietà microstrutturali dell'accio AISI H13”, La Metallurgia Italiana, Vol. 1., pp. 21-27.
- Roberts, G., Krauss, G., Kennedy, R., 1998, “Tool Steels”, ASM International, Materials Park, Ohio.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Effect of cryogenics treatment on wear rate and mechanical properties of H13 tool steel

Renata Neves Penha, rnp@usp.br¹

Sandra dos Santos Vales, sandra.vales@usp.br¹

João Carmo Vendramim, vendramim@isoflama.com.br²

Lauralice de Campos Franceschini Canale, lfcanale@sc.usp.br¹

¹Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, São Carlos – SP, 13566-590

²Isoflama Ind. e Com. de Equip. Ltda, Rua 1, 799, Distr. Ind. João Narezzi, Indaiatuba – SP, 13347-402

Abstract. *The cryogenic treatment aims to transform the retained austenite and to improve the wear resistance of tool steels. It is known that cryogenics can happen after or before tempering, in this way the aim of this work is to establish if the heat treatment sequence influences on obtained final properties. In H13 steel samples, which had passed by different heat treatment sequences, it was performed wear, impact and hardness tests. Analysis of variance permits to quantify the influence of each process factor and its interactions in determinate properties. In this way, it will be established if the bath cryogenics time, the sequence of heat treatment or aging time after quenching may influence final wear rate and mechanical properties of AISI H13 steel.*

Keywords: *heat treatment, wear, mechanical properties, ANOVA, AISI H13.*