

DETERMINAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO NO AÇO SAE 1020 ATRAVÉS DE INFERÊNCIA NEBULOSA

Carlos A. N. Filho ¹, Luis E. M. Lima ² e Christian M. L. Santos ³.

¹ e ² Laboratório de Instrumentação Industrial, Coordenadoria de Engenharia Elétrica, Instituto Federal do Espírito Santo
Avenida Vitória, 1729 - Bairro Jucutuquara
29040-780 - Vitória - ES
¹ carlos_nascimento08@hotmail.com
² luisedu@ifes.edu.br

³ Laboratório de Ensaios Destrutivos, Coordenadoria de Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo
Avenida Vitória, 1729 - Bairro Jucutuquara
29040-780 - Vitória - ES
³ cmariani@ifes.edu.br

Resumo – Este trabalho apresenta o projeto de instrumentação eletrônica para a Máquina Universal de Ensaios Mecânicos (MUEM) WPM – ZD 20, que consiste na aquisição dos sinais equivalentes à força aplicada sobre a peça ensaiada e sua deformação, exibição da curva “tensão x deformação” em uma interface gráfica, e armazenamento dos dados coletados, em tempo de execução. Para isto foi utilizada uma placa para aquisição de sinais e um PC (*Personal Computer*). A partir das informações obtidas torna-se possível a definição de propriedades mecânicas do material, de interesse industrial, assim como, as tendências de variações destas propriedades (como a concentração de carbono na estrutura do aço) que foi obtida por inferência nebulosa.

Palavras Chave – Instrumentação, Microprocessamento, Interface Homem-Máquina, Ensaios Mecânicos, Lógica Nebulosa.

1 Introdução

No Laboratório de Ensaios Mecânicos Destrutivos da Coordenadoria de Mecânica do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) são desenvolvidas atividades de ensino para os cursos Técnico em Mecânica, Engenharia Elétrica e Engenharia Metalúrgica e de Materiais, sendo utilizada nestas atividades a Máquina Universal de Ensaios de Mecânicos modelo WPM - ZD 20, para caracterização do aço através de ensaios de tração.

O ensaio de tração basicamente consiste em tracionar um corpo de prova de seção circular até a sua ruptura. A partir do ensaio é possível obter diversos parâmetros físicos do material, entre estes:

1. Limite de Proporcionalidade: Valor máximo de tensão onde a Lei de Hooke é válida, ou seja, valor de tensão em que a deformação ainda é proporcional à carga aplicada.
2. Tensão Máxima: Valor máximo de tensão ao qual o corpo de prova é submetido.
3. Deformação na Ruptura: Deformação estabelecida sobre o corpo de prova no instante da ruptura.

O funcionamento desta máquina apresenta algumas limitações quando comparado a modelos mais modernos. A leitura da força aplicada sobre o corpo de prova é apresentada em um mostrador analógico, e a deformação em um módulo eletrônico de indicação digital. Os resultados também podem ser registrados de forma analógica em um papel milimetrado, sendo a precisão de registro no papel afetada pelo uso dos sistemas mecânicos de transmissão da força e deformação. Entretanto, vale ressaltar que esta máquina é relevante em atividades didáticas de ensaio face à sua robustez (resistência ao manuseio frequente dos estudantes), assim como sua simplicidade de operação, o que facilita ao estudante adaptação ao aprendizado referente à atividade de ensaios destrutivos. Como consequência da manutenção preventiva executada sobre esta máquina ao longo do período de utilização, há precisão quanto à calibração de força e deslocamentos medidos o suficiente para certificação de peças de uso industrial, restando melhoria na interface homem-máquina (IHM) para continuidade de uso da mesma.

Sendo assim, tem-se por objetivo dotar a máquina de tração WPM - ZD 20 de uma IHM informatizada que possibilite a observação gráfica em tempo de execução do ensaio de tração (curva “tensão x deformação”), assim como a possibilidade de armazenamento do resultado em memória digital, para viabilizar o processamento numérico sobre estes resultados. Há uma série de vantagens que podem ser obtidas desta melhoria: rapidez na obtenção dos resultados e análise gráfica, reprodução de cópias dos ensaios para alunos, professores ou empresas, envio eletrônico de arquivos digitais dos resultados dos ensaios,

facilitando o compartilhamento e divulgação do aprendizado, agilidade na elaboração de documentos e relatórios de certificação, e maior precisão dos resultados a partir do uso da instrumentação eletrônica.

A solução desenvolvida para implementar as melhorias citadas inclui, o projeto de uma placa de aquisição de sinais, para condicionar e converter os sinais analógicos provenientes de sensores instalados na máquina em sinais digitais, e a comunicação de dados entre esta placa de aquisição e um PC (*Personal Computer*).

Através dos dados obtidos com a IHM desenvolvida, foi possível obter as propriedades mecânicas dos materiais através de métodos gráficos computacionais como, por exemplo, o limite de proporcionalidade, utilizando o método Johnson [2]. Sabendo-se os valores das propriedades mecânicas, e que estas são obtidas de amostras de um mesmo tipo de aço que variam em torno de valores considerados padrão, foi implementada uma inferência nebulosa (com uso de Lógica *Fuzzy*), que torna possível verificar o tratamento termomecânico que o aço SAE 1020 recebeu.

A inferência nebulosa foi aplicada a três propriedades mecânicas do aço, que são o Limite de Proporcionalidade, a Tensão Máxima e a Deformação na Ruptura, definindo os antecedentes de cada regra. O consequente das regras é a razão entre a Tenacidade e a Resiliência. Sendo a Tenacidade definida como sendo o valor da área de deformação plástica da curva de “tensão x deslocamento”, e a Resiliência definida pelo valor da área de deformação elástica da curva de “tensão x deslocamento”.

A avaliação do tipo de tratamento termomecânico aplicado ao aço SAE 1020 permite que seja identificado qual dos três tratamentos foi utilizado, o normalizado, o recozido ou o laminado a frio [1].

2 Desenvolvimento do Projeto

2.1 Características construtivas e de operação da máquina

A máquina (figura 1) é do modelo WPM - ZD 20, e foi fabricada na Alemanha em 1968. Esta máquina funciona com o uso de um sistema hidráulico para obtenção da força de tração da amostra de aço ensaiada e pode fornecer cargas de até 20 toneladas-força de acordo com três escalas: 0 a 2, 0 a 10 ou 0 a 20 toneladas-força.



Figura 1 – Máquina de Tração WPM – ZD 20.

O ensaio de tração tensão-deformação é iniciado com a medição da seção e do comprimento útil do corpo de prova, em seguida, faz-se o posicionamento do corpo de prova na máquina e aplica-se uma pré-carga para o início do ensaio. Um sistema mecânico de plotagem faz o registro combinado da força aplicada pelo alongamento imposto, sendo este registro em papel milimetrado, assim é gerada a curva “força x alongamento” até que ocorra a ruptura do corpo de prova, e conseqüentemente o ensaio é finalizado. A curva “tensão x deformação” é recalculada com base nos dados obtidos pela plotagem da curva “força x alongamento”, de acordo com as expressões matemáticas (1) e (2), onde T é a tensão, F a força, A_0 área inicial da seção transversal, ϵ_r é a deformação L_0 comprimento inicial e L comprimento.

$$T = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (2)$$

2.2 Hardware Embarcado de Instrumentação

A arquitetura original da máquina de tração WPM ZD-20 não inclui instrumentação eletrônica. Para a implementação da IHM desejada foi adaptado (figura 2.1) ao sistema de medição de força um potenciômetro linear de precisão multivoltas, através do qual mede-se a força aplicada à peça ensaiada a partir da variação em graus do sistema de indicação analógica de força (figura 2.2).



Figura 2.1 – Sistema de indicação de força.



Figura 2.2 – Dispositivo de acoplamento do potenciômetro.

Quanto à alongamento sofrida pela peça, foi processado o sinal obtido do *encoder* óptico linear (figura 3) já instalado na máquina (onda quadrada com pulsos gerados por mm de deslocamento).



Figura 3 – Encoder Linear.

Foi projetada e montada uma placa de aquisição de dados (cujas arquitetura está ilustrada no diagrama de blocos da figura 4) que realiza o processamento dos sinais gerados. A tensão analógica proveniente do potenciômetro é amplificada e medida através de uma conversão A/D processada pelo microcontrolador PIC16F873A [3], convertida para valores que posteriormente são armazenados em uma memória serial externa E²PROM 24LC512. A onda quadrada oriunda do *encoder* linear também foi tratada pelo microcontrolador e a medida equivalente ao alongamento do corpo de prova, armazenada na memória externa. Detectado o fim do ensaio, através do aumento da frequência dos pulsos gerados pelo *encoder* linear em função do crescimento acelerado do alongamento, todos os dados armazenados na memória externa serão enviados através do protocolo de comunicação RS-232 para a IHM.

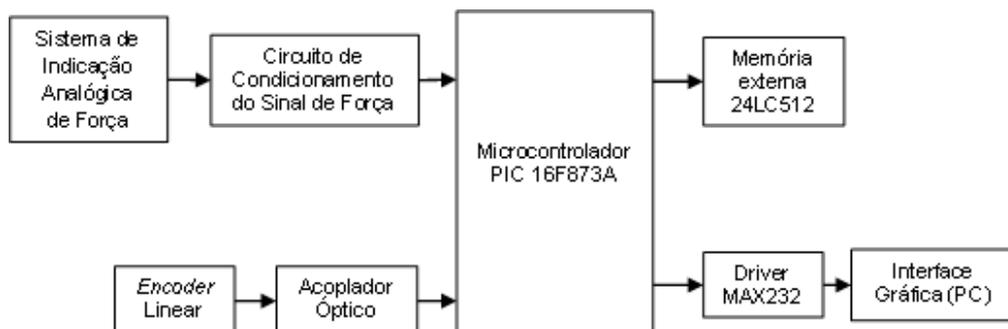


Figura 4 – Diagrama de Blocos da placa de aquisição de dados.

2.3 Interface Homem Máquina

A interface gráfica (figura 5) foi criada em no NI LabWindows™/CVI [4] ambiente de desenvolvimento de interface. Além do traçado da curva “tensão x deformação”, e o resultado obtido através desta interface permite a extração das propriedades mecânicas do ensaio de tração mecânica.

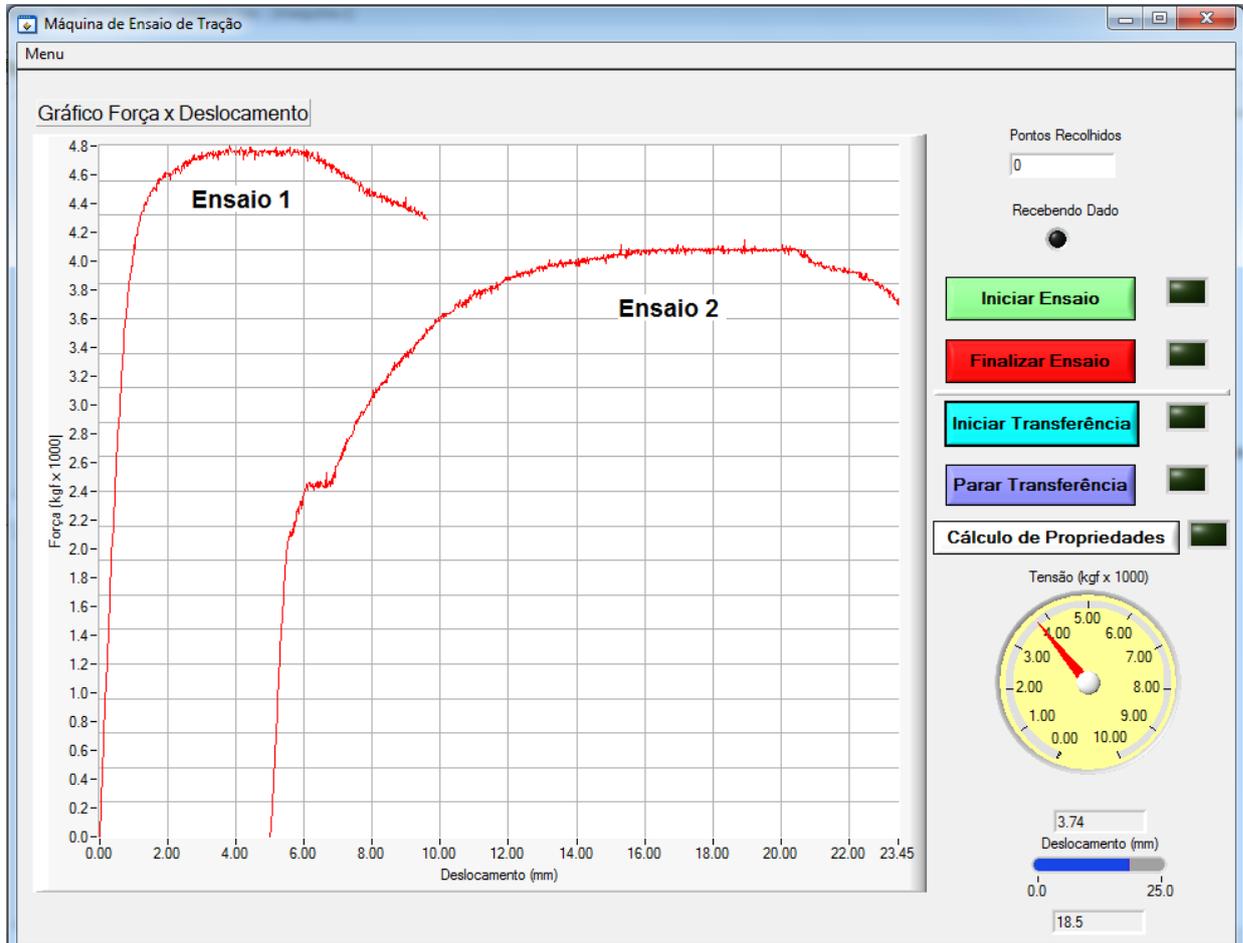


Figura 5 – Interface gráfica no computador.

A interface permite o controle quanto ao início e término, ou interrupção, do ensaio, além do controle sobre a comunicação serial RS-232 entre o sistema embarcado e o PC.

Com o ensaio finalizado é possível gerar arquivos no formato de planilha eletrônica para que os dados do ensaio sejam melhor analisados por estudantes e professores, possibilitando assim a difusão de informações do laboratório de ensaios mecânicos destrutivos.

2.4 Método gráfico de obtenção do limite de proporcionalidade – Limite de Johnson

Os ensaios mecânicos de tração são realizados com o objetivo de obter as propriedades mecânicas dos materiais como, por exemplo, a limite de proporcionalidade (σ_p). O valor do limite de proporcionalidade é muito importante nos estudos dos materiais, pois define o valor de tensão máxima no qual a tensão e a deformação ainda serão proporcionais, esta região é chamada de deformação elástica do material.

A rigor, a determinação do limite elástico, para se conhecer o final de zona elástica do material, é feita por carregamentos e descarregamentos sucessivos do corpo de prova até que seja alcançada uma carga onde se pode observar com precisão uma deformação permanente. Este processo é muito trabalhoso e não faz parte dos ensaios de rotina, pois vai depender essencialmente da precisão do extensômetro e da máquina usados [2]. Porém, devido à importância de se conhecer o limite elástico, em 1939 um cientista chamado Johnson propôs um método para determinar um limite elástico aparente, que ficou conhecido como limite Johnson.

O limite de Johnson é obtido de forma rápida, já que se baseia em retas auxiliares são utilizadas em interseção com a curva “tensão x deformação”. Então foi inserida na interface gráfica uma rotina, que realiza o cálculo automático da limite de proporcionalidade através do método de Johnson. Através do fluxograma da figura 6, é possível verificar a aplicação deste método.

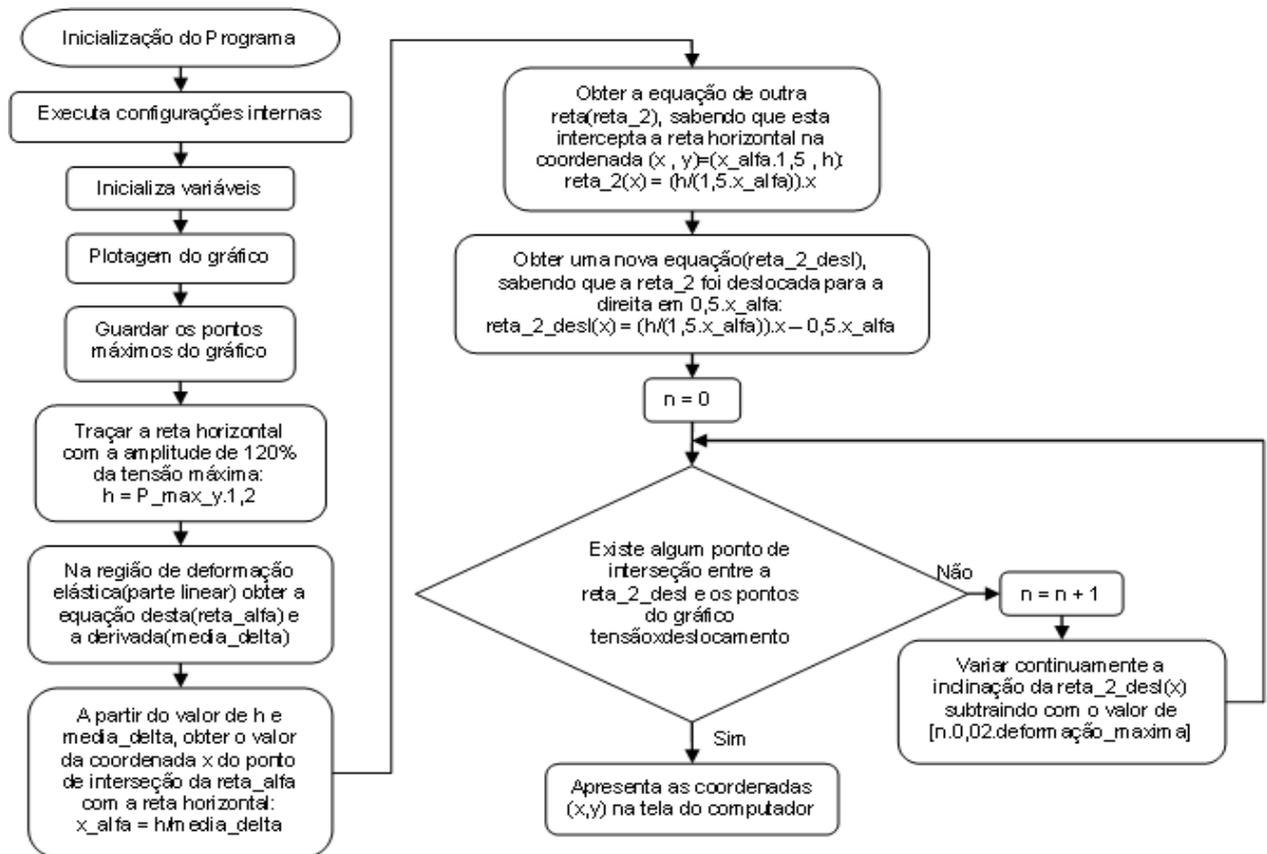


Figura 6 – Fluxograma do método Limite de Johnson.

2.5 Classificação do Tipo de Tratamento Térmico Sofrido pelo Material

A partir de três propriedades mecânicas do aço SAE 1020 (objeto de estudo neste artigo), é possível identificar o tipo de tratamento termomecânico sofrido por este aço. Considerando que a aplicação da lógica nebulosa como elemento importante na automação de processos e permitindo assim criar sistemas classificadores, foi desenvolvido um sistema nebuloso para processar as informações recebidas da placa de aquisição de sinais para classificação do tipo de tratamento no material [5].

Neste trabalho a inferência nebulosa foi processada no MATLAB [6] *ToolBoxes Fuzzy Logic*, sendo inicialmente implementadas com quatro funções de pertinência de entrada: Módulo de Elasticidade (E), Limite de Proporcionalidade (σ_p), Tensão Máxima (σ_{MAX}) e Deformação na Ruptura (ϵ_r). Porém foi verificado em *Metals Handbook* [7] que o comportamento do Módulo de Elasticidade (E) não se altera significativamente, para o propósito deste trabalho, sendo assim esta propriedade não atuará como variável linguística de entrada. O sistema também é composto de três conjuntos nebulosos com valores menor, igual e maior para as três variáveis linguísticas de entrada. Esta inferência inclui também a variável linguística de saída que é definida com a razão da tenacidade com a resiliência, cuja função de pertinência também é subdividida em três conjuntos nebulosos para os valores menor, igual e maior [8].

Os conjuntos nebulosos mais utilizados são aqueles que possuem uma função de pertinência regular, ou seja, sem mudanças bruscas, que mostram claramente a passagem progressiva da não-satisfação para a satisfação da propriedade à qual eles estão associados [8]. Na figura 7 são ilustradas as funções de pertinência de entrada e saída.

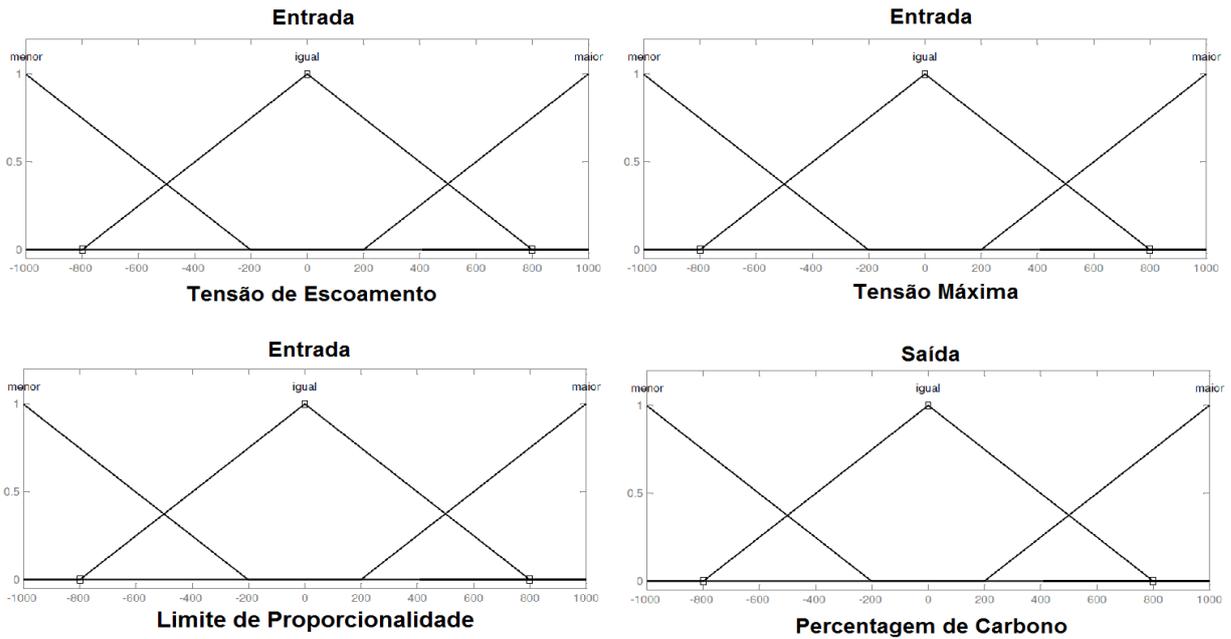


Figura 7 – Funções de Pertinência.

As funções de pertinência de todas as três variáveis linguísticas de entrada e da variável linguística de saída são semelhantes, e estão descritas nas equações 3, 4, 5 e 6:

$$\text{De } -1000 \text{ a } -200: \quad \mu_{\text{menor}} = -(1/800) \times x - 1/4 \quad (3)$$

$$\text{De } -800 \text{ a } 0: \quad \mu_{\text{média}} = (1/800) \times x + 1 \quad (4)$$

$$\text{De } 0 \text{ a } 800: \quad \mu_{\text{média}} = -(1/800) \times x + 1 \quad (5)$$

$$\text{De } 200 \text{ a } 1000: \quad \mu_{\text{maior}} = (1/800) \times x - 1/4 \quad (6)$$

A quantidade de regras geradas é dada pela combinação dos números de conjuntos de entrada ($n = 9$) e do número de entradas ($p = 3$), que é calculado a partir das relações 7, 8 e 9:

$$N^{\circ} \text{ de regras} = C(n, p) - 3 \times C(6, p) + 3 \times C(p, p) \quad (7)$$

Sendo:

$$C(n, p) = \frac{n!}{p!(n-p)!} \quad (8)$$

Logo:

$$N^{\circ} \text{ de regras} = C(9, 3) - 3 \times C(6, 3) + 3 \times C(3, 3) = 27 \text{ regras} \quad (9)$$

Porém a combinação das 27 regras possíveis foi avaliada sob o âmbito das possibilidades físicas reais, e apenas 13 destas regras foram escolhidas para o banco de regras (tabela 1), pois, estas satisfazem ao comportamento padrão para cada tipo de tratamento termomecânico no aço, sendo:

1. Se o tratamento térmico-mecânico é o laminado a frio, o aço terá um alto Limite de Proporcionalidade (σ_p), alta Tensão Máxima (σ_{MAX}) e baixa Deformação na Ruptura (ϵ_r) em relação ao normalizado;
2. Se o tratamento térmico-mecânico é o normalizado, o aço terá um comportamento considerado no projeto padrão, já que este tipo tratamento é a referência em relação aos outros dois tipos de tratamentos;
3. Se o tratamento térmico-mecânico é o recozido, o aço terá um baixo Limite de Proporcionalidade (σ_p), baixa Tensão Máxima (σ_{MAX}) e alta Deformação na Ruptura (ϵ_r) em relação ao normalizado.

Para realizar a inferência nebulosa, foi utilizado o método máx-min de Mamdani [9]. A seguir um exemplo de regra utilizado:

SE a limite de proporcionalidade é menor **E** tensão máxima é menor **E** deformação na ruptura é maior **ENTÃO** a razão entre a tenacidade e resiliência é maior.

Tomando como referência o “modus ponens generalizado”, podemos representar a regra acima através da equação 10:

$$\mu_{maior}(T/R) = \min\{\mu_{menor}(\sigma_P), \mu_{menor}(\sigma_{MAX}), \mu_{maior}(\epsilon_r)\} \quad (10)$$

Onde:

$\mu_{maior}(T/R)$: Grau de pertinência da variável razão Tenacidade sobre Resiliência para o conjunto “maior”;

$\mu_{menor}(\sigma_P)$: Grau de pertinência da variável limite de proporcionalidade para o conjunto “menor”;

$\mu_{menor}(\sigma_{MAX})$: Grau de pertinência da variável tensão máxima para o conjunto “menor”.

$\mu_{maior}(\epsilon_r)$: Grau de pertinência da variável deformação na ruptura para o conjunto “maior”.

Tabela 1 – Banco de regras para inferência nebulosa.

Entrada			Saída	Inferência das Regras
Tensão Máxima	Limite de Proporcionalidade	Deformação na Ruptura	Razão T/R	
Menor	Menor	Média	Maior	$\mu_{maior}(T/R) = \min\{\mu_{menor}(\sigma_{MAX}), \mu_{menor}(\sigma_P), \mu_{média}(\epsilon_r)\}$
Menor	Menor	Maior	Maior	$\mu_{maior}(T/R) = \min\{\mu_{menor}(\sigma_{MAX}), \mu_{menor}(\sigma_P), \mu_{maior}(\epsilon_r)\}$
Menor	Média	Menor	Média	$\mu_{média}(T/R) = \min\{\mu_{menor}(\sigma_{MAX}), \mu_{média}(\sigma_P), \mu_{menor}(\epsilon_r)\}$
Menor	Média	Média	Média	$\mu_{média}(T/R) = \min\{\mu_{menor}(\sigma_{MAX}), \mu_{média}(\sigma_P), \mu_{média}(\epsilon_r)\}$
Menor	Média	Maior	Maior	$\mu_{maior}(T/R) = \min\{\mu_{menor}(\sigma_{MAX}), \mu_{média}(\sigma_P), \mu_{maior}(\epsilon_r)\}$
Média	Média	Menor	Média	$\mu_{média}(T/R) = \min\{\mu_{média}(\sigma_{MAX}), \mu_{média}(\sigma_P), \mu_{menor}(\epsilon_r)\}$
Média	Média	Média	Média	$\mu_{média}(T/R) = \min\{\mu_{média}(\sigma_{MAX}), \mu_{média}(\sigma_P), \mu_{média}(\epsilon_r)\}$
Média	Média	Maior	Média	$\mu_{média}(T/R) = \min\{\mu_{média}(\sigma_{MAX}), \mu_{média}(\sigma_P), \mu_{maior}(\epsilon_r)\}$
Média	Maior	Menor	Menor	$\mu_{menor}(T/R) = \min\{\mu_{média}(\sigma_{MAX}), \mu_{maior}(\sigma_P), \mu_{menor}(\epsilon_r)\}$
Média	Maior	Média	Média	$\mu_{média}(T/R) = \min\{\mu_{média}(\sigma_{MAX}), \mu_{maior}(\sigma_P), \mu_{média}(\epsilon_r)\}$
Maior	Média	Média	Média	$\mu_{média}(T/R) = \min\{\mu_{maior}(\sigma_{MAX}), \mu_{média}(\sigma_P), \mu_{média}(\epsilon_r)\}$
Maior	Maior	Menor	Menor	$\mu_{menor}(T/R) = \min\{\mu_{maior}(\sigma_{MAX}), \mu_{maior}(\sigma_P), \mu_{menor}(\epsilon_r)\}$
Maior	Maior	Média	Menor	$\mu_{menor}(T/R) = \min\{\mu_{maior}(\sigma_{MAX}), \mu_{maior}(\sigma_P), \mu_{menor}(\epsilon_r)\}$

A partir da definição das regras, e os valores de entrada (Limite de Proporcionalidade, Tensão Máxima e Deformação na Ruptura) fuzzificados, a inferência nebulosa processa o operador mín sobre as pertinências de cada antecedente (conforme já foi descrito acima) para definição da pertinência do consequente de cada regra, e o operador máx para a definição da pertinência resultante dos consequentes inferidos (disparados), em cada conjunto nebuloso da função de pertinência de saída.

A pertinência da saída (Razão da Tenacidade/Resiliência) das regras inferidas:

$$\mu_{menor}(T/R) = \text{máx}\{\mu_{menor-disparada}(T/R)\}$$

$$\mu_{média}(T/R) = \text{máx}\{\mu_{média-disparada}(T/R)\}$$

$$\mu_{maior}(T/R) = \text{máx}\{\mu_{maior-disparada}(T/R)\}$$

Onde $\mu_{maior-disparada}(T/R)$ refere-se ao grau pertinência disparado para cada valor (menor, igual e maior) do conjunto nebuloso. No processo de defuzzificação foi escolhido o método do centro de área [10].

3 Resultados

Foram realizados vários ensaios de tração em corpos de provas do aço SAE 1020 submetidos a diferentes tratamentos térmicos nas seguintes condições: um laminado a frio e o outro recozido. Os ensaios foram registrados na tela de um PC e os gráficos pela IHM da figura 5: o ensaio 1 corresponde a um corpo de prova que recebeu o tratamento mecânico estirado a frio e o ensaio 2 a um corpo de prova recozido. Foi constatado que o emprego desta IHM nas aulas de Ciências e Tecnologia dos

Materiais deu origem a excelentes resultados pedagógicos, quanto à facilidade para explanação do assunto, e também quanto à versatilidade para o processamento dos resultados e verificação da validade dos mesmos no uso por estudantes. Outra atribuição a se considerar é a classificação do teor de carbono dos aços adquiridos pelo IFES, material este adquirido para fins didáticos e que em alguns casos apresenta não conformidade com a compra. O processo de classificação do aço desenvolvido neste trabalho classifica o corpo de prova de forma rápida, prática e com baixos custos.

Além do mais, através da IHM foi possível de forma ágil: analisar os resultados de acordo com o traçado da curva da curva “tensão x deformação” por tração, bem como permite a catalogação digital dos resultados dos ensaios, realizar a informatização do Método de Jhonson (um método manual passível de erros) e finalmente a classificação do aço por um método computacional de inteligência artificial (Lógica *Fuzzy*).

Com o objetivo de avaliar à lógica nebulosa que foi desenvolvida foi um programa em linguagem C que gera valores randômicos para as três variáveis linguísticas dentro de intervalo pré-definidos em *Metals Handbook* [7], os valores gerados estão dispostos na tabela 2.

Tabela 2 – Tabela de análise dos resultados da inferência nebulosa.

Valores gerados randomicamente			Resultado da Inferência Nebulosa (T/R)	Classificação do Tratamento
σ_P (Mpa)	σ_{MAT} (Mpa)	ϵ_r (%)		
284,17	408,66	31,41	29,71	NORMALIZADO
305,54	367,26	36,17	47,27	RECOZIDO
271,35	394,87	28,55	30,43	NORMALIZADO
302,68	364,18	35,53	47,61	RECOZIDO
340,44	469,16	17,28	12,86	LAMINADO A FRIO
347,89	477,17	18,94	19,38	LAMINADO A FRIO

Os resultados da tabela 2 mostram que, por exemplo, para um corpo de prova com valores de limite de proporcionalidade o igual a 284,17MPa, tensão máxima igual a 408,66MPa e deformação na ruptura igual a 31,41%, vai apontar para um corpo de prova de aço SAE 1020 tratado térmico-mecânico normalizado segundo a razão de tenacidade e resiliência igual a 29,70. Estes resultados foram avaliados por um especialista em ciências dos materiais tendo avaliação positiva do resultado.

4 Conclusão

A automação realizada na Máquina Universal de Ensaio Mecânicos (MUEM) WPM – ZD 20 trouxe maior confiabilidade aos resultados dos ensaios após a implementação da instrumentação eletrônica. Também facilitou a obtenção das propriedades dos materiais através de métodos gráficos, e viabilizando a gravação dos resultados do ensaio em planilha eletrônica o que facilita a difusão de informações. A classificação do tratamento térmico ao qual o corpo de prova foi submetido, feita através da inferência nebulosa, deu origem a resultados muito satisfatórios, sendo este método caracterizado por seu baixo custo e alta velocidade de processamento.

Como proposta para trabalho futuro há ainda a possibilidade de aperfeiçoamento e enriquecimento de recursos na IHM, e sintonia de novas funções de pertinência que viabilizem o ensaio de outros tipos de aço.

5 Referências Bibliográficas

- [1] CALLISTER, W. D. Ciências e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª edição LTC, São Paulo, 2002.
- [2] SOUZA, S. A. de Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. 4ª edição Edgard Blücher, São Paulo, 1974.
- [3] MICROCHIP TECHNOLOGY. PIC16F87X Datasheet: 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers. 2001.
- [4] NATIONAL INSTRUMENTS. LabWindows/CVI: User Manual. 1998.
- [5] BILOBROVEC, M.; KOVALESC, J. L.; MARÇAL, R. F. M. Implementação de um Sistema de Controle Inteligente Utilizando Lógica Fuzzy. In: Simpósio de Engenharia de Produção, 11., 2004, Bauru. Anais... Bauru, 2004.
- [6] MATWORKS. Matlab: User Manual. 2010.
- [7] Metals Handbook - Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys. Tenth Edition, Volume 1, ASM INTERNATIONAL, 1990.
- [8] CAMPOS, M. M.; SAITO, K. Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de Processos. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2004. 235 p.
- [9] Averill Law, Simulation Modeling and Analysis, 4ª Edition, **McGraw-Hill**, (2006).
- [10] PATEL, A. V. Simplest Fuzzy PI Controllers under Various Defuzzification Methods. International Journal of Computational Cognition, Vol. 3, NO. 1, Março 2005.