

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DOMINIQUE DE ÁVILA COSSA

EMPREGO DE RNA PARA AÇOS MICROLIGADOS ENSAIADOS EM  
DILATÔMETRO BÄHR VISANDO OBTENÇÃO DE MACRO HV E Ar<sub>3</sub>.

São Paulo

2010

DOMINIQUE DE ÁVILA COSSA

EMPREGO DE RNA PARA AÇOS MICROLIGADOS ENSAIADOS EM  
DILATÔMETRO BÄHR VISANDO OBTENÇÃO DE MACRO HV E Ar3.

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Engenheira  
Metalúrgica.

São Paulo

2010

DOMINIQUE DE ÁVILA COSSA

EMPREGO DE RNA PARA AÇOS MICROLIGADOS ENSAIADOS EM  
DILATÔMETRO BÄHR VISANDO OBTENÇÃO DE MACRO HV E Ar3.

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Engenheira  
Metalúrgica.

Área de Concentração:

Engenharia Metalúrgica

Orientador: Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut

São Paulo

2010

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que tanto me auxiliaram em minha formação.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ronald Lesley Plaut e ao Engenheiro Philippe Thibeaux pela oportunidade e orientação para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas do OCAS, em especial Nancy Van Sevecotte e a engenheira Nele Van Steenberge.

Aos meus amigos, família e namorado pelo apoio e incentivo.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a criação de uma rede neural para predição e controle da macro dureza Vickers e Ar3, a partir da composição e ciclo térmico aplicado em amostras de dilatômetro, ensaiadas sob compressão em um dilatômetro Bähr. Diversos ciclos térmicos foram utilizados, para os quais encontrou-se as correspondentes dureza e Ar3. Utilizando composição e ciclo térmico como entradas e Ar3 e a dureza como saída, duas redes (uma para cada variável de saída) foram criadas, utilizando-se o programa Neuro Solutions 5.0. A partir dos resultados da rede, sua eficiência e a sensibilidade para cada variável de entrada sobre as de saída foram analisadas.

Palavras-chave: dilatômetro; Bähr; rede neural artificial; Ar3; macro dureza Vickers.

## ABSTRACT

The aim of this work was a creation of an efficient neural net to predict and control the macro hardness Vickers and Ar3 temperature from composition and thermal cycle applied on dilatometer samples. Tests of compressions in a Bähr dilatometer had been performed, and Ar3 temperature and hardness measured. By using the program Neuro Solutions 5.0, two neural nets had been created, with composition and thermal treatment as input data and Ar3 and hardness as output data. The performance and sensibility of the input to the output data had been studied.

Keywords: dilatometer, Bähr, artificial neural network, Ar3, macro hardness Vickers.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	10
1 REVISÃO DA LITERATURA .....	11
1.1 Dilatometria .....	11
1.2 Temperatura Ar3 .....	13
1.3 Regra das Alavancas .....	14
1.4 Macro Dureza Vickers .....	15
1.5 <i>Redes Neurais</i> .....	17
1.5.1 Desenvolvimento de Aplicações.....	19
2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
2.1 Material utilizado .....	22
2.2 Ensaio no dilatômetro Bähr .....	22
2.2.2 Preparação de Amostras.....	23
2.2.3 Ciclos Térmicos e Testes .....	24
2.3 Medida da temperatura Ar3.....	28
2.4 Medidas de Macro Dureza Vickers .....	29
2.4.1 Equipamento .....	29
2.4.2 Preparação de Amostras.....	29
2.4.3 Testes .....	31
2.5 Métodos para uso da Rede Neural.....	31
2.5.1 Software .....	31
2.5.2 Construção das Tabelas de dados.....	32
2.5.3 Tabelas no Neuro Solutions .....	34
2.5.4 Arquitetura da Rede .....	36
2.5.5 Treinamento e Testes .....	38
3 RESULTADOS.....	39
3.1 Ar3 como variável de saída .....	39



3.2 HV como variável de saída .....	47
4 DISCUSSÃO .....	56
4.1 Ar3 como variável de saída .....	56
4.2 HV como variável de saída .....	58
5 CONCLUSÕES .....	60
REFERÊNCIAS .....	61
APÊNDICE A.....	63
APÊNDICE B.....	66

## INTRODUÇÃO

Em um mundo onde a escassez de recursos aumenta a cada dia, é de fundamental importância que processos de produção sejam sempre otimizados. O investimento em pesquisa e desenvolvimento e a aplicação das novas tecnologias alcançadas são o principal caminho para isso.

No universo da produção de aço, exigem-se propriedades cada vez mais audaciosas, utilizando-se de recursos e meios de produção cada vez mais baratos. Duas das principais e mais significativas propriedades dos aços são a sua dureza e temperatura de transformação de fase.

A possibilidade de se prever essas propriedades a partir da composição química e tratamento térmico desses representa uma grande economia de recursos, sendo de interesse global. Entretanto, a relação entre os meios de produção (composição e tratamento térmico) e as propriedades desejadas não é clara, havendo a necessidade de pesquisas nesta área.

O presente trabalho tem como objetivo a contribuição para conhecimento destas relações, utilizando-se de testes laboratoriais (dilatometria e macro dureza Vickers) e recursos computacionais (uso de uma rede neural artificial), para a predição de dureza e temperatura de transformação de fase em aços micro ligados, a partir das suas composições e tratamentos térmicos.

# 1 REVISÃO DA LITERATURA

## 1.1 Dilatometria

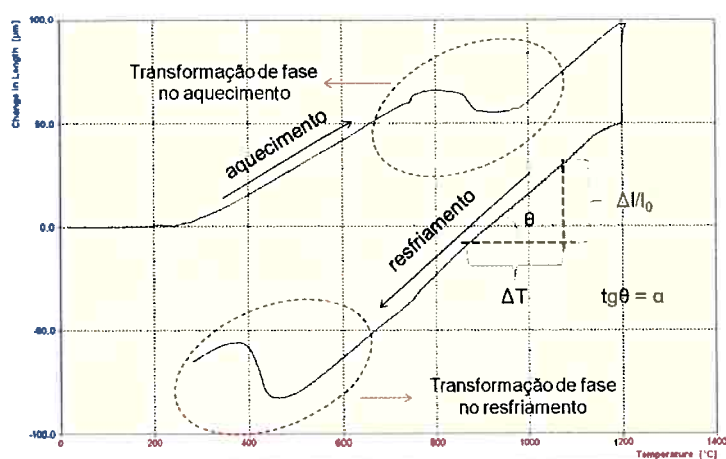
A dilatometria é uma técnica de análise que tem como princípio a quantificação das variações dimensionais que um corpo de prova sofre quando submetido a um ciclo térmico definido. Com ela é possível estudar diversos aspectos dos materiais, como coeficientes de expansão térmica, densidades, diagramas de fases, etapas de sinterização, expansão térmica linear e volumétrica, ponto de amolecimento, temperaturas de decomposição, sinterização e transição vítrea, e transição de fase.<sup>[1]</sup>

Determina-se a dilatação térmica utilizando-se um gráfico que relaciona a variação dimensional relativa com a temperatura do material ensaiado. Esta variação dimensional é detectada ou opticamente, ou por meio de um micro transformador diferencial (transdutor L.V.D.T), enquanto que, para a variação térmica, utiliza-se um termopar acoplado à amostra.

A dilatação térmica durante o aquecimento ou resfriamento da amostra é considerada linear, obedecendo à Equação 1.1, abaixo, onde  $\Delta\ell/\ell_0$  é a variação dimensional relativa,  $\alpha$  o coeficiente de dilatação térmica linear, e  $\Delta T$  a variação de temperatura.

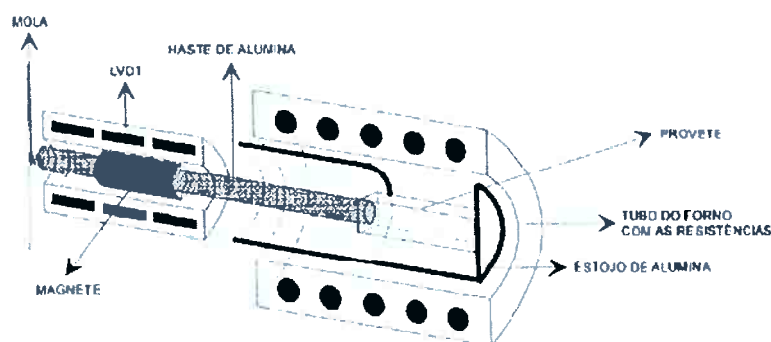
$$\frac{\Delta\ell}{\ell_0} = \alpha \cdot \Delta T \quad (1.1)$$

A linearidade da dilatação térmica no aquecimento ou resfriamento de um corpo de prova é o que permite a determinação de parâmetros da cinética de transformação de fase dos materiais, mas somente nos caso em que há apenas uma transformação durante a mudança de temperatura. Esta determinação é feita utilizando-se a regra das alavancas, como explicado posteriormente. Uma curva dilatométrica típica de um aço apresentando uma transformação de fase é mostrada na Figura 1.1.



**Figura 1.1 - Exemplo de curva dilatométrica**

Os equipamentos mais utilizados para a medição da dilatação térmica dos materiais são o dilatômetro óptico (que utiliza de dispositivos ópticos), e os dilatômetros diferenciais. Atualmente, os mais utilizados são os dilatômetros diferenciais, que se caracterizam por possuir um sistema porta amostra constituído por um tubo que suporta o corpo de prova no interior de um forno, além de um êmbolo ou haste, que tem uma extremidade em contato com o corpo de prova e transmite a variação dimensional que este experimenta durante o aquecimento, até um transdutor localizado na extremidade oposta do êmbolo. O sistema porta amostra é complementado por um sensor de temperatura (termopar) localizado junto ao corpo de prova em ensaio. Um esquema simplificado de um dilatômetro diferencial é apresentado na Figura 1.2.<sup>[2]</sup>



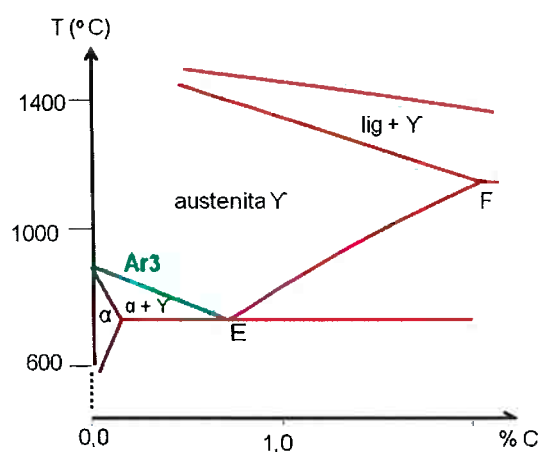
**Figura 1.2- Esquema simplificado de um dilatômetro diferencial.**

O resultado final de um ensaio dilatométrico, ou seja, a dilatação térmica, pode ser alterada pelos seguintes parâmetros: atmosfera do forno, velocidade de aquecimento, temperatura de arranque do ensaio, expansão térmica do material de

referência, tipo de termopar, elementos de aquecimento do forno, tamanho do provete, método de medição do provete e equipamento utilizado para a sua medição, modo de preparação e maquinação do provete, material do porta amostras, contato mecânico entre a amostra e a haste do dilatômetro, e frequência de calibração.<sup>[2]</sup>

## 1.2 Temperatura Ar3

Uma das transformações que ocorre na região destinada aos aços no diagrama ferro-carbono (teores de C inferiores a 2%), em um resfriamento contínuo, é a transformação da austenita (de estrutura CFC) em ferrita (CCC). Observa-se no diagrama da Figura 1.3 um campo bifásico, onde ferrita e austenita coexistem. Este campo é delimitado superiormente por uma linha verde, que corresponde às temperaturas Ar3. Assim Ar3 é a temperatura de início de transformação da austenita em ferrita, e na qual a nucleação da fase ferrita se inicia. Os fatores que podem influenciar o valor desta temperatura são o tamanho de grão austenítico, o estado de deformação da austenita, e a taxa de resfriamento.<sup>[5]</sup>



**Figura 1.3 – Diagrama de fases para o sistema ferro-carbono.**

### 1.3 Regra das Alavancas

A Regra das alavancas, ou regra da alavanca inversa, é um procedimento utilizado para encontrar a proporção entre duas fases quando em um campo bifásico de um diagrama de fases. A Figura 1.4 apresenta um diagrama de fases com fase líquida (L) e sólida (S), além de um campo bifásico (S+L).  $C_0$  é a composição global da liga,  $C_L$  a composição da fase líquida presente no material, naquela temperatura, e  $C_S$  a da fase sólida, nas mesmas condições.

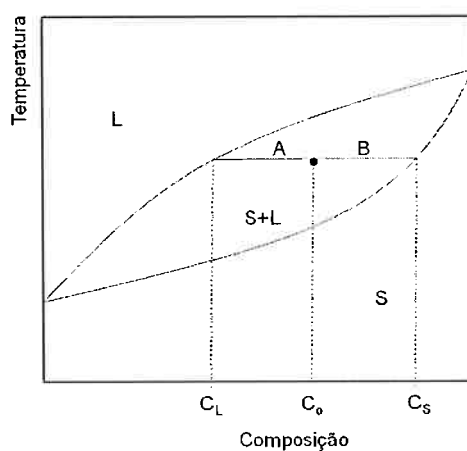


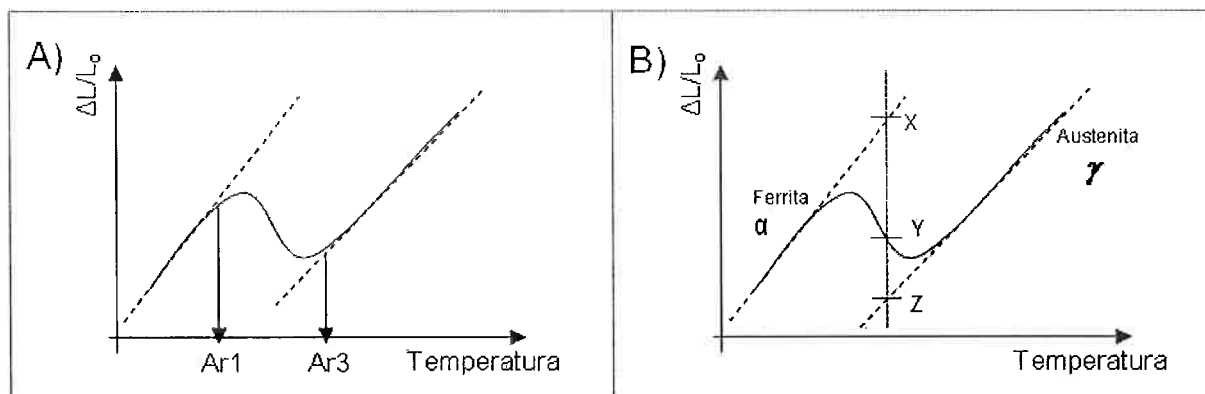
Figura 1.4 – Exemplo de utilização da regra das alavancas.

A proporção de fase líquida no exemplo acima é dada pela equação 1.2, e a da fase sólida pela 1.3, a seguir.

$$\%L = 100 \times \frac{B}{(A + B)} \quad (1.2)$$

$$\%S = 100 \times \frac{A}{(A + B)} \quad (1.3)$$

No caso de um ensaio em dilatômetro, ao invés de um diagrama de fases, tem-se um gráfico da variação dimensional relativa da amostra em função da sua temperatura. Um exemplo é apresentado na Figura 1.5, onde observa-se a curva de transformação de fase e o uso da regra das alavancas.



**Figura 1.5 – Gráficos da variação dimensional relativa em função da temperatura indicando A) temperatura de transformação de fase e B) uso da regra das alavancas.**

As temperaturas de início e término de transformação de fase, Ar3 e Ar1, respectivamente, estão localizadas na região onde a curva do dilatômetro diverge da extrapolação das linhas de contração de cada fase. Entretanto, a experiência de autores diz que essas temperaturas normalmente têm erros de aproximadamente 5°C, no caso de Ar3, e 20°C para Ar1. Esses erros se devem principalmente ao fato das curvas de contração reais não serem totalmente retilíneas, gerando erros na extrapolação.<sup>[3]</sup>

Durante a transformação austenita-ferrita, a proporção entre as duas fases pode ser calculada pelas Equações 1.4 e 1.5, utilizando-se a regra das alavancas, como no caso do diagrama de fases.

$$\% \alpha = 100 \times \frac{YZ}{XZ} \quad (1.4)$$

$$\% \gamma = 100 \times \frac{XY}{XZ} \quad (1.5)$$

#### 1.4 Macro Dureza Vickers

A dureza de um material é definida como a “medida da resistência de um material à deformação pela indentação da sua superfície ou por abrasão.”<sup>[6]</sup> Ensaio de dureza são muito utilizados por serem simples, baratos, não-destrutivos, e por permitirem estimar, com freqüência, outras propriedades mecânicas.

Há diversas técnicas populares de ensaio de dureza, como Rockwell, Brinell, Knoop e Vickers. Em todas elas, um pequeno penetrador é forçado contra a superfície do material, e um número índice de dureza é determinado com base no tamanho ou profundidade da impressão resultante.

No caso da dureza Vickers, utiliza-se um penetrador de diamante de geometria piramidal com base quadrada, sendo o ângulo entre as faces de  $136^\circ$ . Um esquema do penetrador, bem como da impressão resultante no material são mostradas na Figura 1.1.

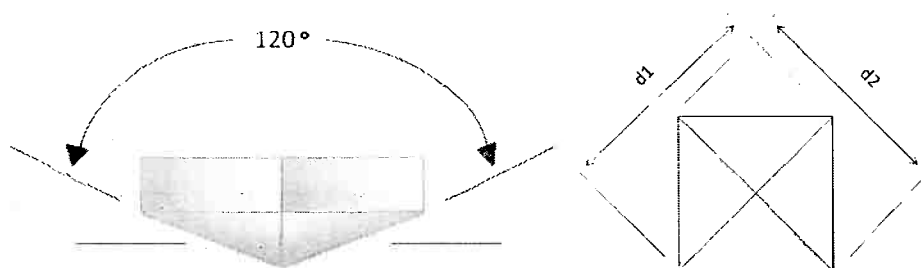


Figura 1.6 – Esquema do penetrador e impressão para dureza Vickers

O valor da dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada (F), em Kgf, pela área de impressão (A) deixada no corpo ensaiado, em  $\text{mm}^2$ , como mostra a Equação 1.6.

$$HV = \frac{F}{A} \quad (1.6)$$

Como as áreas das impressões são sempre proporcionais às cargas aplicadas, estas podem ter qualquer valor, diferentemente de outras técnicas de medição de dureza. No caso de macro dureza utiliza-se cargas entre 1 e 120 kgf, enquanto que para a micro dureza, de valores como 10 gf até 1 kgf. O tempo de aplicação da carga varia de 10 a 15 segundos, devendo-se indicar o tempo quando fora dos padrões. Por exemplo, um material com dureza de 200, que foi ensaiado com uma carga de 30 kgf a 20 segundos é escrito da seguinte forma: 200.0 HV 30/20. [7]

A impressão é visualizada com um microscópio óptico acoplado à máquina de dureza, a partir do qual é possível visualizar e, assim, medir as duas diagonais do “quadrado”. A área da impressão é calculada pela Equação 1.7, sendo a diagonal utilizada (d) a média aritmética das duas diagonais medidas.



$$A = \frac{d^2}{\sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)} \quad (1.7)$$

A fórmula para a dureza Vickers, que relaciona a força aplicada e a diagonal da impressão é obtida pela Equação 1.8, resultante da substituição de 1.7 em 1.6.

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2}$$

$$HV \cong 1,845 \frac{F}{d^2} \quad (1.8)$$

Esta técnica apresenta uma série de vantagens já mencionada, mas também é preciso tomar alguns cuidados ao usá-la, de forma a evitar erros de medida ou aplicação de carga, que alteram muito os valores reais da dureza. Erros na medida podem ocorrer, no caso de microdureza, com o encruamento superficial do material, por falta de preparação metalográfica. O uso de cargas abaixo de 300 gf também dificulta as medidas, devido à possível recuperação elástica do material. É importante também dar manutenção constante à máquina de dureza Vickers, pois qualquer erro na velocidade de aplicação de carga traz grandes diferenças nos valores de dureza.

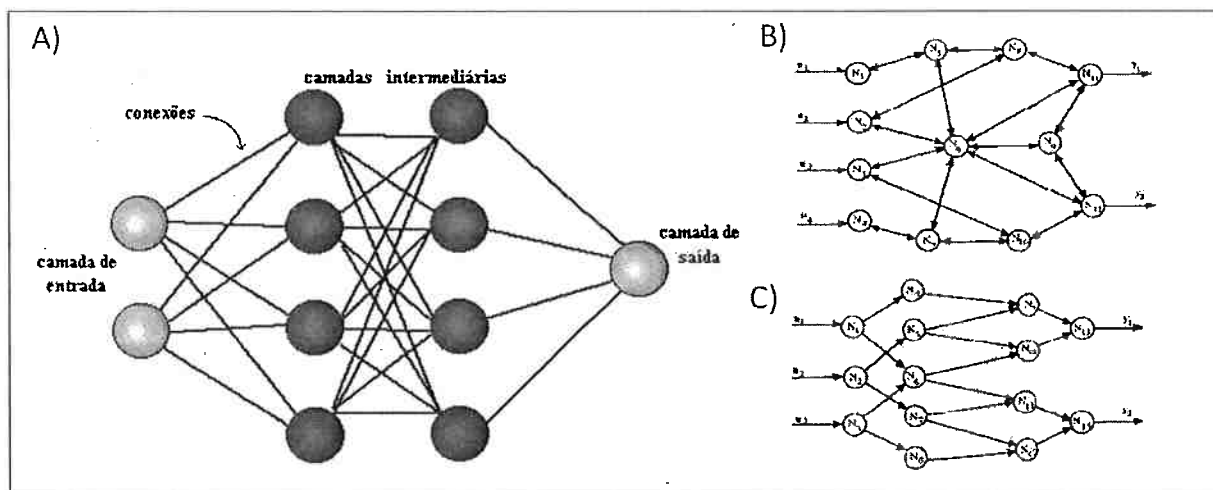
### 1.5 Redes Neurais

As redes neurais artificiais, RNAs, constituem uma forma de inteligência artificial inspirada na estrutura neural de organismos inteligentes. São utilizadas em praticamente qualquer área para solucionar problemas complexos, onde a relação entre variáveis de entrada e saída não são claras ou não podem ser encontradas pelas expressões analíticas já existentes, devido às suas limitações.

Seu funcionamento se dá pela construção de um sistema artificial de neurônios, os perceptrons, que são ligados por conexões sinápticas capazes de aprender e ganhar experiência com seus erros. Pode-se dividi-los em três grupos:

- Camada de entrada, no qual os padrões (dados de entrada) são apresentados à rede;
- Camadas intermediárias ou ocultas, onde é realizada a maior parte do processamento, através de conexões ponderadas. Estas camadas podem ser consideradas como extratoras de características;
- Camada de saída, onde o resultado final é concluído e apresentado.

A disposição dos perceptrons em uma RNA pode ser visualizado na Figura 1.7-A. Exemplos de duas formas principais de configuração de redes encontram-se nas Figuras 1.7-B e C.



**Figura 1.7 – Exemplo de A) organização de uma RNA; B) Rede neural direta; C) rede neural simétrica (caso particular de rede com ciclos).**

Cada módulo das camadas intermediárias é, na realidade, uma complexa combinação de funções matemáticas associadas a coeficientes, que encontram uma função adequada relacionando dados de entrada aos de saída. Um exemplo de equação matemática utilizada para relacionar esses dados pode ser observado nas equações 1.9 e 1.10, onde  $x_j$  são dados de entrada,  $y$  dados de saída, e  $w$  e  $\theta$  representam pesos.<sup>[8]</sup>

$$y = \sum_i w_i h_i + \theta \quad (1.9)$$

$$h_i = \tanh \left[ \sum_j w_{ij} x_j + \theta_i \right] \quad (1.10)$$

### 1.5.1 Desenvolvimento de Aplicações

Os principais procedimentos para criação e utilização de uma RNA são: coleta de dados e separação em conjunto, configuração, treinamento, teste e integração da rede. Estes passos são explicados a seguir:

- Coleta de dados e separação em conjuntos:

Estes dois passos são de suma importância para diminuir a probabilidade de erros no sistema. Os dados coletados devem ser divididos em três categorias:

- Treinamento (usados no treinamento da rede);
- Validação (que têm como objetivo a verificação da eficiência da rede quanto à sua capacidade de generalização durante o treinamento, e podendo também ser empregado como critério de parada);
- E dados de teste (utilizados para verificar o desempenho da rede sob condições reais).

Esta divisão deve ser feita após uma análise extremamente cuidadosa, de forma que os dados sejam significativos e cubram amplamente o domínio do problema, englobando operações normais ou rotineiras, exceções, e condições nos limites do domínio do problema

Antes de se dividir os dados é aconselhável randomizá-los, o que previne tendências associadas à ordem de apresentação. Caso haja necessidade, pode-se também pré-processar os dados através de normalizações, escalonamentos e conversões de formato, tornando-os mais apropriados à utilização na rede.

- Configuração da rede:

Neste passo deve-se definir a configuração da rede a ser utilizada através de três medidas:

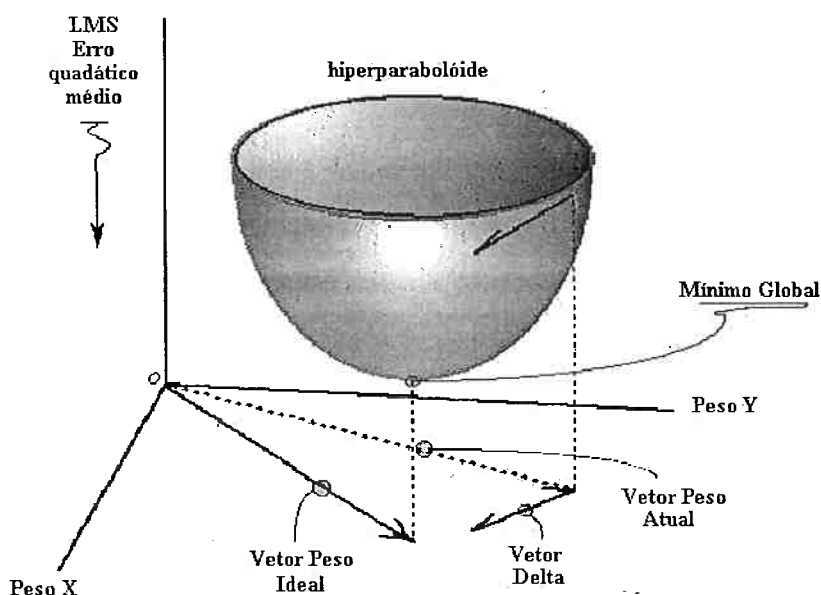
- Seleção do paradigma neural apropriado à aplicação;

- Determinação da topologia da rede a ser utilizada (número de camadas, de unidades em cada camada, etc);
- Determinação de parâmetros do algoritmo de treinamento e funções de ativação. Esta medida tem um grande impacto no desempenho do sistema resultante.

• Treinamento:

O treinamento é o passo onde são ajustados os pesos das conexões. O treinamento da rede é repetido até atingir um ponto ótimo, onde deve-se ter uma boa capacidade de generalização aliada a um erro suficientemente pequeno (menor que um erro admissível).

Para encontrar os pesos ótimos de cada conexão, as RNAs objetivam alcançar um mínimo num gráfico relacionando os pesos e os erros, conforme pode ser observado na Figura 1.8.



**Figura 1.8 – Relação entre pesos e erros utilizada pela rede neural.**

A repetição do treinamento cessa quando um critério de parada é alcançado. Normalmente este critério é um número máximo de ciclos, mas deve-se levar em consideração também a taxa de erro médio por ciclo e a capacidade de generalização da rede. É importante não deixar a rede degenerar, criando o

problema de over-training, ou seja, a especialização em um conjunto de dados de treinamento e a perda da capacidade de generalização.

- Teste:

O quinto passo consiste no teste da rede, onde as relações aprendidas nas fases de treinamento são aplicadas em dados de entrada não previamente utilizados, resultando em saídas que são comparadas aos valores que já se tem. Esta comparação é utilizada para determinar o desempenho da RNA.

A avaliação da performance da rede deve levar em consideração também outros fatores, como a análise do comportamento da rede usando entradas especiais, e análise dos pesos atuais da rede. No caso de valores de peso muito baixos, as conexões associadas podem ser consideradas insignificantes e serem eliminadas (prunning). De modo inverso, valores substantivamente maiores que os outros podem indicar um over-training da rede.<sup>[12]</sup>

- Integração:

Com a rede treinada e avaliada, pode-se integrá-la em um sistema do ambiente operacional da aplicação. Além disso, o sistema deve periodicamente monitorar sua performance e fazer a manutenção da rede quando necessário, ou indicar a necessidade de re-treinamento.<sup>[12]</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Material utilizado

Para os testes no dilatômetro utilizou-se 5 diferentes aços micro-ligados, de nomenclatura C014B, X020, X021 e X022. As composições químicas encontram-se na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição dos aços utilizados (% em peso)

	C014B	10230A	X020	X021	X022
%C	0,051	0,066	0,071	0,069	0,064
%Mn	1,7	1,6	1,7	1,6	1,6
%Si	0,27	0,28	0,41	0,29	0,29
%P	0,013	0,016	0,016	0,017	0,016
%S	0,007	0,0036	0,0029	0,0037	0,00024
%Al	0,036	0,033	0,04	0,035	0,039
%Ti	0,012	0,021	0,022	0,021	0,021
%Nb	0,095	0,068	0,075	0,071	0,068
%Cu	0,017	0,011	0,016	0,012	0,011
%Ni	0,014	0,25	0,37	0,25	0,03
%Mo	0,0071	0,0032	0,0023	0,0036	-
%Cr	0,27	0,027	0,02	0,026	-

### 2.2 Ensaio no dilatômetro Bähr

#### 2.2.1 Equipamento

Nos ensaios deste trabalho utilizou-se um Dilatômetro Bähr 805 A/D, com as características abaixo.<sup>[14]</sup>

- **Marca e Modelo:** Bähr 805 A/D;
- **Padrão:**
  - Forno de indução (taxas de aquecimento de até 4.000 K/s);
  - Arrefecimento (taxas de resfriamento de até 2.500 K/s);

- Deformação em compressão;
- Tratamento térmico em vácuo ou atmosfera protetora;
- **Opções:**
  - Baixas temperaturas (-160 / 1.150°C);
  - “Cabeças” de alta precisão;
  - “Cabeças” de compressão / tração;
  - Forno para amostras não-metálicas;
  - “Cabeças” DSC-DTA (max temp 1.350 °C – max taxa aquec. 800K/min).

Uma foto do dilatômetro e seu sistema de tratamento de dados é mostrada na Figura 2.1:



**Figura 2.1 – Vista do dilatômetro Bähr com sistema de tratamento de dados.**

### ***2.2.2 Preparação de Amostras***

Para os ensaios no dilatômetro utilizou-se amostras cilíndricas de 5 mm de diâmetro por 10 mm de comprimento. As amostras, vindas de material laminado a quente, com composições descritas anteriormente, eram lixadas lateralmente, onde soldava-se um par de termopares tipo S. A soldagem era feita com uma solda ponto, sob atmosfera de argônio. Nas laterais da amostra, pratos de molibdênio de espessura 0,5 mm de espessura e 8 mm de diâmetro eram soldados, para melhor homogeneidade térmica da amostra durante o ensaio. Após o preparo, colocava-se a amostra no local apropriado e conectava-se o termopar no aparelho. Imagens da

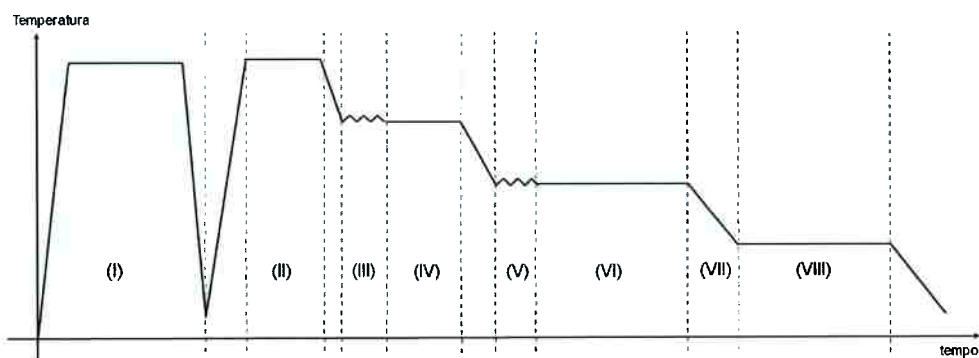
amostra preparada para o teste e recém-colocada no dilatômetro podem ser visualizadas na Figura 2.2.



**Figura 2.2 – A) Amostra do dilatômetro com par de termopares S e pratos de molibdênio, prepara para o ensaio; B) Vista de dentro do dilatômetro com amostra colocada e termopar ligado; C) Amostra no dilatômetro, antes do suporte ser retirado e amostra ficar envolvida pelo forno.**

### **2.2.3 Ciclos Térmicos e Testes**

Para os ensaios no dilatômetro, utilizou-se variações de três tipos básicos de ciclos térmicos, sendo dois deles com apenas uma deformação, e o outro com duas. Alguns parâmetros dos ciclos foram comuns a todos eles, enquanto que outros variaram. Um ciclo esquemático com destaque para as áreas com parâmetros variáveis pode ser visualizado na Figura 2.3, e a correspondentes regiões na Tabela 2.2.



**Figura 2.3 – Ciclo térmico esquemático com destaque para as áreas com parâmetros variáveis.**



**Tabela 2.2 – Regiões correspondentes às áreas com parâmetros variáveis da Figura 2.3.**

Área	Região
(I)	Pré-Aquecimento
(II)	Austenitização
(III)	Deformação 1
(IV)	Tempo entre deformações
(V)	Deformação 2
(VI)	Tempo após última deformação
(VII)	Resfriamento após última deformação
(VIII)	Simulação de bobinamento

Os três tipos de ciclos térmicos (A, B e C), com detalhes sobre os valores utilizados nos parâmetros podem ser visualizados na Figura 2.4. É importante ressaltar que nem todas as combinações possíveis das variáveis foram realizadas, sendo as combinações realizadas descritas na Tabela 2.4. Uma legenda para os as abreviaturas utilizadas encontram-se na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 – Abreviaturas usadas na Tabela 2.4.**

Parâmetro	Abreviatura
Pré-aquecimento	PAq
Tempo de austenitização	TA
Número de deformações	ND
Deformação 1	%D1
Temperatura da deformação 1	TD1
Deformação 2	%D2
Temperatura da deformação 2	TD2
Tempo entre deformações	TED
Tempo após última deformação	TAUD
Taxa de resfriamento	TR
Temperatura de bobinamento	TB

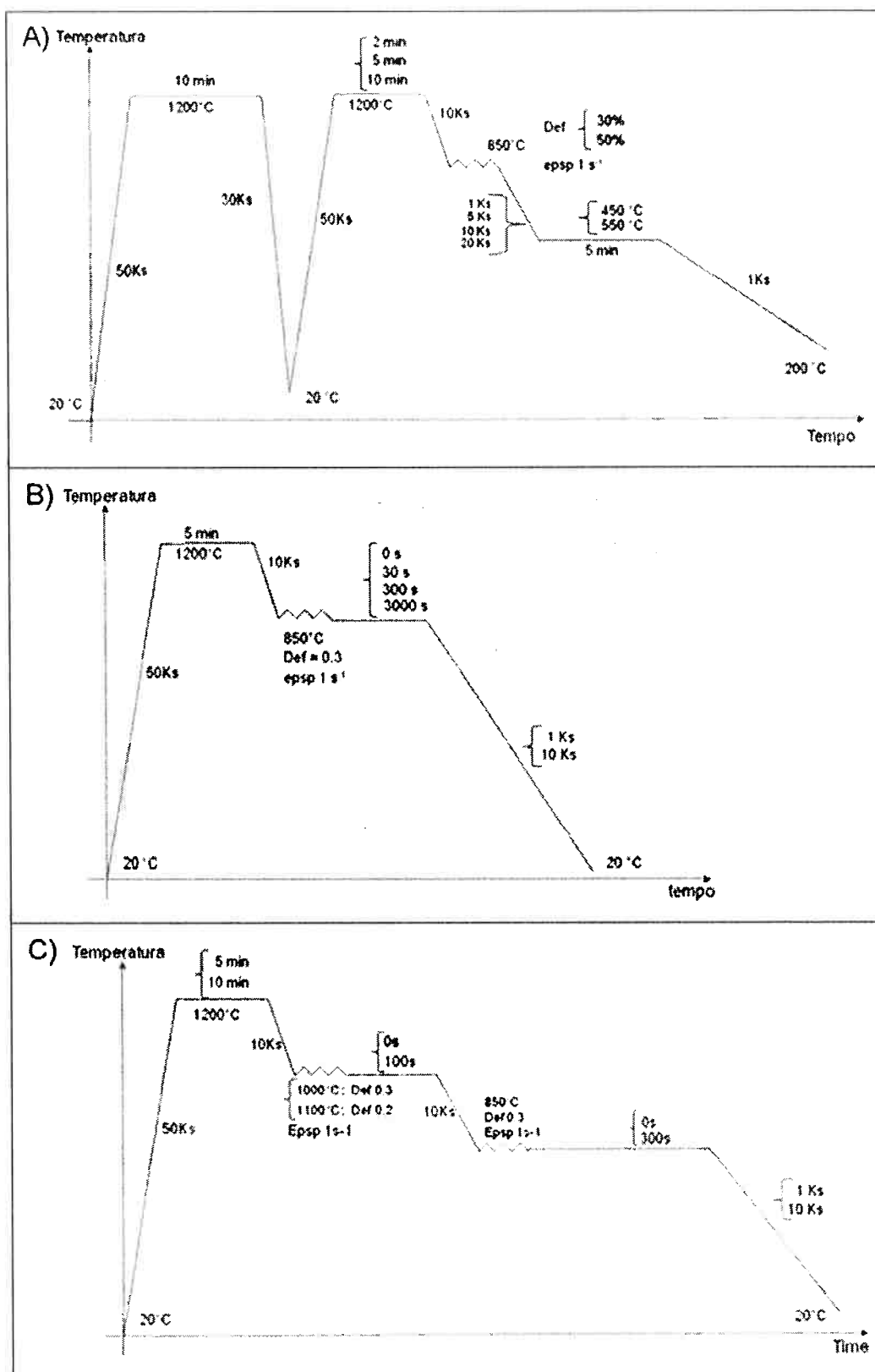


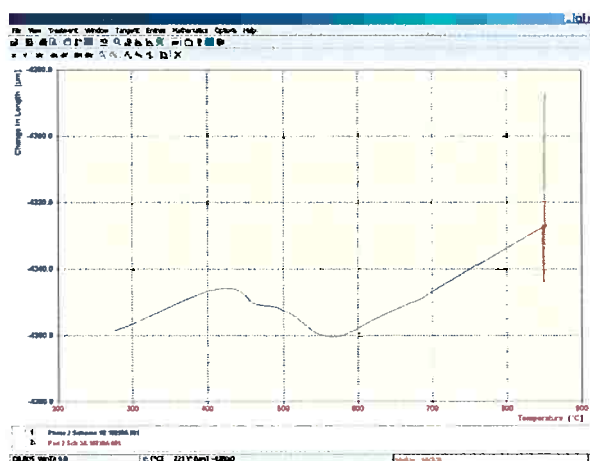
Figura 2.4 – Ciclos térmicos realizados.

Tabela 2.4 – Ciclos térmicos realizados para cada tipo de aço estudado.

Tipo	PAq	ND	D1 %	TD1 C	D2 %	TD2 C	TED s	TB C	TAUD s	TA min	TR C/s	Material				
												C014B	10230A	X020	X021	X022
A	não	1	30	850	-	-	-	450	0	2	1	X	X	X	X	
											10	X	X	X	X	
										10	1	X	X	X	X	
											10	X	X	X	X	
								550	0	2	1	X	X	X	X	
											10	X	X	X	X	
										5	10		X	X	X	
											20		X		X	
										10	1	X	X	X	X	
											5	X	X	X	X	
	Sim	1	50	850	-	-	-	550	0	2	1	X	X	X	X	
											10	X	X	X	X	
										10	1	X	X	X	X	
											10	X	X	X	X	
										2	1			X		
											10	X	X	X	X	
										5	10			X	X	
											10			X		
										10	1	X	X	X	X	
											10	X	X	X	X	
B	não	1	30	850	-	-	-	-	0	5	1			X	X	X
											10			X	X	X
										30	5			X	X	X
											10			X	X	X
										300	5			X	X	X
											10			X	X	X
										3000	5			X	X	X
											10			X	X	X
C	não	2	30	1000	30	850	0	-	0	10	1	X	X	X	X	
											10	X	X	X	X	
										5	1			X	X	X
											10			X	X	X
										300	5			X	X	X

## 2.3 Medida da temperatura Ar3

O sistema de dados acoplado ao dilatômetro Bähr fornece uma série de dados sobre o experimento ensaiado, entre eles, um gráfico da variação relativa do comprimento da amostra pela temperatura, como exemplificado pela Figura 2.3.



**Figura 2.5 – Gráfico fornecido pelo dilatômetro com curva da variação relativa do comprimento em função da temperatura para uma amostra.**

A regra das alavancas, descrita na seção 1.3 deste documento, foi utilizada para medir-se a temperatura Ar3. Entretanto, a medida não foi realizada por análise visual, e sim por meio de uma macro de Excel (Dilato Analysis Deformation).

Regiões anteriores à última deformação eram descartadas pela macro, utilizando-se apenas o resfriamento após a última deformação. As curvas de retração da ferrita e austenita eram identificadas matematicamente e, por meio da regra das alavancas, ao final era fornecida uma tabela com as porcentagens transformadas e as temperaturas correspondentes. Por não ser um método totalmente preciso, escolheu-se como Ar3 a temperatura para a qual tinha-se 10% de transformação.

Alguns ciclos térmicos foram realizados mais de uma vez. Neste caso, uma média aritmética foi feita e este valor utilizado posteriormente nos cálculos. Os valores encontrados para Ar3 e seus respectivos desvios podem ser visualizados no Apêndice A.

## 2.4 Medidas de Macro Dureza Vickers

### 2.4.1 Equipamento

Realizou-se os ensaios de macro dureza Vickers em uma máquina própria para este tipo de ensaio, de marca Zwick e modelo ZHV20. Um manual do equipamento e pode ser encontrado, para informações mais detalhadas da máquina, na referência [16].

À máquina estava acoplado um computador com o software TestXpert V12.0, que permitia a medição das diagonais das impressões deixadas nas amostras, e calculava automaticamente os valores das durezas correspondentes. Mais informações sobre o programa podem ser encontradas na referência [17]. Na Figura 2.6 observa-se o equipamento com computador acoplado.

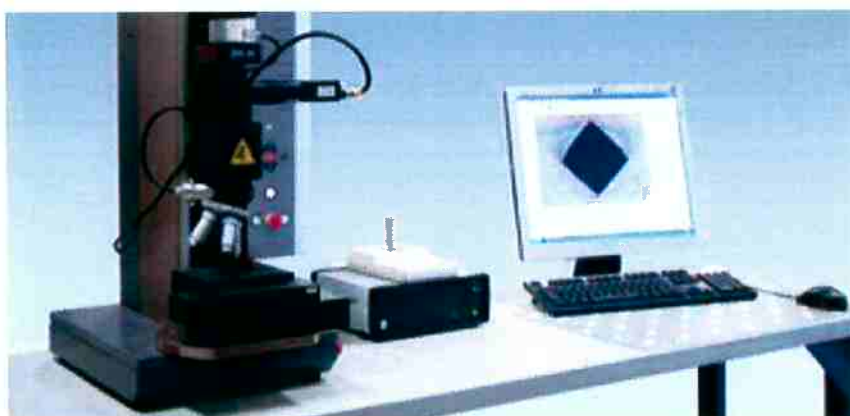
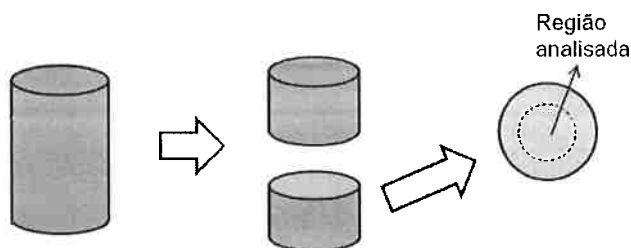


Figura 2.6 – Equipamento utilizado para ensaio de macro dureza Vickers.

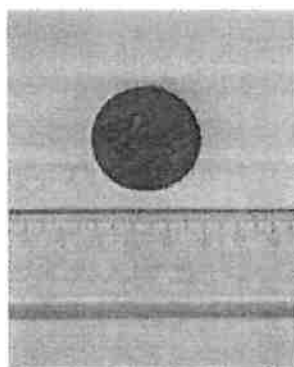
### 2.4.2 Preparação de Amostras

A região analisada nos ensaios de dureza, bem como de onde foram feitas as metalografias, foi a região mais central possível das amostras. Assim, estas foram cortadas ao meio longitudinalmente e analisadas no centro do corte trasnsversal, conforme indicado na Figura 2.7.



**Figura 2.7 – Corte da amostra e região analisada nos ensaios de dureza e metalografia.**

Após o corte, uma das metades da amostra era embutida em uma resina mistura de multifast Brown e durofast, ficando apenas a durofast em contato direto com a amostra. A polimerização consistia em um aquecimento até  $180^{\circ}\text{C}$ , temperatura que permanecia por 5 minutos enquanto aplicava-se 20kN de pressão. O posterior um resfriamento até  $20^{\circ}\text{C}$  durava 3 minutos. Uma fotografia de uma resina com amostras embutidas pode ser visualizada na Figura 2.8.



**Figura 2.8 – Amostras após o embutimento em resina**

Após, as amostras eram submetidas a um processo padrão de preparação, que consistia em dois passos de linchamento ( #80 e #220), seguidos de três passos de polimento (9, 6 e  $1\ \mu\text{m}$ ). Água era utilizada na lubrificação e lavagem de amostras nos passos de linchamento, enquanto que os passos de polimento utilizavam metanol. A secagem era realizada com ar comprimido, em todos os casos. No caso de necessidade de repetição de um experimento, as três últimas etapas do preparo eram refeitas.

### **2.4.3 Testes**

Realizou-se os testes de dureza no equipamento anteriormente citado, com uma carga de 50 kgF durante 10 segundos. Calibrou-se o equipamento sempre antes do início da utilização. O procedimento para o teste foi o padrão para o equipamento, sendo as durezas calculadas pelo software a partir das diagonais medidas.

Para cada amostra realizou-se três indenções, tomando-se o cuidado para que todas ficassem na área indicada anteriormente, onde as propriedades eram homogêneas. Os valores de dureza utilizados posteriormente são a média aritmética das indenções pra cada tipo de ensaio, lembrando que alguns ensaios foram repetidos mais de uma vez. As médias e desvios padrão podem ser encontrados no Apêndice A.

## **2.5 Métodos para uso da Rede Neural**

### **2.5.1 Software**

No desenvolvimento da rede neural deste trabalho, utilizou-se uma demonstração para Excel do programa Neuro Solutions, versão 5.07. O programa pertence à Neuro Dimension Inc., e pode ser encontrado e baixado na referência [13].

O Neuro Solutions 5.07 é um software de uso relativamente simples, que possibilita a criação de diferentes arquiteturas de rede neural, aplicáveis em qualquer tipo de assunto. Por ser uma versão de demonstração, esta é limitada, podendo-se ter no máximo 30 variáveis de entrada e 3 variáveis de saída.

### 2.5.2 Construção das Tabelas de dados

Para utilizar o programa Neuro Solutions 5.07, a tabela com os dados de entrada (composição e ciclo térmico) e saída (macro dureza Vickers e temperatura Ar3) teve que ser reescrita. Dessa forma, alguns erros de lógica do software eram evitados.

O primeiro passo foi deixar todos os dados em formato de número no Excel, sendo que a divisão para números quebrados fosse a vírgula, e não o ponto.

No caso da composição, os valores foram multiplicados (cada elemento) por um valor, fazendo com que os valores iniciais passassem a ser dezenas, e não mais milésimos ou centésimos. Os valores pelos quais as porcentagens dos elementos foram multiplicadas e os valores de composição finais podem ser vistos na Tabela 2.6.

**Tabela 2.5 –Ajuste da composição para uso do Neuro Solutions.**

Elemento	%	"Nova" composição usada no software				
		C014B	10230A	X020	X021	X022
C	1.000	51	66	71	69	64
Mn	10	17	16	17	16	16
Si	100	27	28	41	29	29
P	1.000	13	16	16	17	16
Si	10.000	70	36	29	37	2.4
Al	1.000	36	33	40	35	39
Ti	1.000	12	21	22	21	21
Nb	1.000	95	68	75	71	68
Cu	1.000	17	11	16	12	11
Ni	100	1.4	25	37	25	3
Mo	10.000	71	32	23	36	0
Cr	100	27	2.7	2	2.6	0

Nos dados relativos aos ciclos térmicos, parâmetros iguais em todos eles (por exemplo, todos apresentam a mesma temperatura de austenitização, de 1200°C) não foram considerados nas tabelas. Assim, utilizaram-se apenas as variantes: pré-aquecimento, número de deformações, porcentagem da última



deformação, tempo o qual a temperatura foi mantida após a última deformação, tempo de austenitização, e taxa de resfriamento após a última deformação.

Os dados para a primeira deformação, no caso de duas, não foram considerados pois a primeira deformação ocorre a 1000 ou 1100°C, temperatura na qual há recristalização.

O **pré-aquecimento (PAq)**, foi um aspecto considerado como 0 ou 1 (houve ou não pré-aquecimento), dando-se o valor 1 para os casos com PAq e 0 para casos onde não houve. O **número de deformações (ND)** também recebeu apenas dois valores: 1 para uma deformação no ciclo térmico, e 2 no caso de duas. O valor para **porcentagem da última deformação (%D)** foi registrado em porcentagem, sendo 30 ou 50.

O **tempo ao qual a temperatura foi mantida após a última deformação (TAUD)** variou de 0 a 3000 segundos. Como era uma escala muito grande para o software, foi adotada uma escala de 0 a 1 no lugar, sendo 3000s=1. Dessa forma, os valores possíveis para TAUD passaram a ser 0; 0,01; 0,1; e 1.

Também não houve mudanças nos aspectos **tempo de austenitização (TA)** e **taxa de resfriamento após a última deformação (TR)**, pois ambos se tratavam de valores inteiros e em uma escala pequena. Os aspectos considerados e seus valores podem ser visualizados na Tabela 2.7. Cada ciclo térmico corresponde a uma combinação desses possíveis valores.

**Tabela 2.6 – Possíveis valores para os variantes dos ciclos térmicos**

Variável	Valores Possíveis
PAq	0; 1
ND	1; 2
%D	30; 50
TAUD	0; 0,01; 0,1; 1
TA	2; 5; 10
TR	1; 5; 10; 20

Os valores de saída, **macro dureza Vickers (HV)** e a **temperatura Ar3 (Ar3)** não foram alterados, sendo apenas arredondados para que fossem valores inteiros, sem casas decimais, de forma a evitar a perda da generalização da rede.

Construiu-se uma tabela para a saída HV e outra para Ar3, de modo que cada saída fosse trabalhada separadamente e, dessa forma, as relações entre as entradas e cada saída fossem mais precisas. Utilizaram-se todos os valores de HV encontrados experimentalmente. Entretanto, para Ar3 excluiu-se os valores com desvio maiores que 25°.

As duas tabelas editadas, para HV e Ar3, utilizadas no programa Neuro Solutions podem ser visualizadas no Apêndice B. Um resumo com os nomes e siglas dados às variáveis é encontrado na Tabela 2.8:

**Tabela 2.7 – Nomes e abreviaturas atribuídos às variáveis**

Variável	Sigla
1.000x %C	C
10x %Mn	Mn
100x %Si	Si
1.000x %P	P
10.000x %Si	Si
1.000x %Al	Al
1.000x %Ti	Ti
1.000x %Nb	Nb
1.000x %Cu	Cu
100x %Ni	Ni
10.000x %Mo	Mo
100x %Cr	Cr
Pré-aquecimento	PAq
Número de deformações	ND
% da última deformação	%D
Tempo na temperatura após última deformação	TAUD
Tempo de austenitização	TA
Taxa de resfriamento	TR
Macro dureza Vickers	HV
Temperatura Ar3	Ar3

### **2.5.3 Tabelas no Neuro Solutions**

Os dados das novas tabelas foram copiados três vezes de forma a obter-se um número maior de dados para tratamento e ter-se em todas as divisões de dados (treinamento, validação e teste), uma amostra razoável de cada valor de variável.

Após serem quadruplicados, os dados foram randomizados, evitando-se vícios causados pela ordem dos dados.

Em cada tabela foram, então, selecionadas as colunas de dados de entrada (composição e ciclo térmico) e de saída (HV para uma tabela e Ar3 para a outra). Um exemplo dessa seleção é mostrado na Figura 2.9, a seguir.

The screenshot shows the Neuro Solutions software interface. At the top, there are tabs for 'Dados', 'Entradas', 'Saída', 'Fórmula', 'Dados', 'Resumo', 'Gráfico', and 'Ajuda'. Below the tabs, there is a table with columns labeled 'entradas' and 'saída'. The table contains numerical data for various samples, with the 'saída' column highlighted in red.

Figura 2.9 – Exemplo de marcação de colunas de entrada e saída.

A próxima divisão foi a de linhas de treinamento, de validação e de teste. Procurou-se usar uma proporção próxima a  $\frac{3}{4}$  de linhas de treinamento,  $\frac{1}{8}$  de linhas de validação e  $\frac{1}{8}$  de linhas de teste. Cada conjunto de linhas recebia uma cor automática, conforme visualizado na Figura 2.10.

The screenshot shows the Neuro Solutions software interface with a data table. The table is divided into three sections: 'treinamento' (training), 'validação' (validation), and 'teste' (test). Each section is highlighted with a different color: training is blue, validation is red, and test is green. The table contains numerical data for various samples, with the 'saída' column highlighted in red.

Figura 2.10 - Exemplo de marcação das linhas no Neuro Solutions.

Com as tabelas prontas para utilização, passou-se para a arquitetura da rede a ser utilizada.

#### 2.5.4 Arquitetura da Rede

O Neuro Solutions 5.07 oferece uma série de possibilidades para arquitetura de uma rede. Alguns modelos foram testados para HV e também para Ar3. Os testes foram analisados pelo seu erro, pela sensibilidade dos dados de entrada e pela variação dos dados de saída a partir de cada entrada. A partir daí escolheu-se uma melhor rede neural para a saída HV e também pra a saída Ar3 que, coincidentemente, tiveram a mesma arquitetura.

No caso de Ar3 obteve-se um bom valor de  $r$  (0,989977), e também uma boa adequação da sensibilidade das variáveis de entrada com o que foi observado experimentalmente. Já para HV, o valor de  $r$  foi 0,906968, o que não é tão elevado, mas foi o valor mais alto de  $r$  para o qual a sensibilidade das variáveis de entrada fazia sentido. A arquitetura da rede pode ser visualizada na Tabela 2.8.

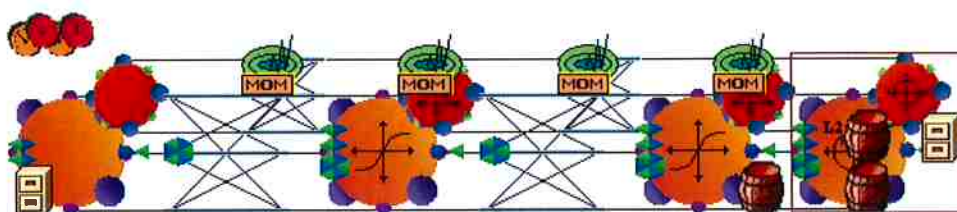
**Tabela 2.8 – Arquitetura da rede neural utilizada para Ar3 e HV.**

Neural Model	Multilayer Perceptron
Input PEs	18
Output PEs	1
Exemplars	298
Hidden Layers	1
Hidden Layer #1	Processing Elements: 4 Transfer : TanhAxon Learning Rule: Momentum Step Size: 1.000000 Momentum: 0,700000
Output Layer	Processing Elements: 1 Transfer : TanhAxon Learning Rule: Momentum Step Size: 1.000000 Momentum: 0,700000
Supervised Learning Control	Maximum Epochs: 1000 Termination Threshold: 0 Increase Cross Val. Set

	Weight Update: Batch
Probe Configuration	Input: BarChart
	Output : DataWriter
	Desired: DataWriter
	Error: DataGraph

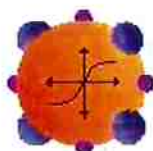
---

O modelo de rede neural escolhido, Multilayer Perceptron (MLP) utiliza o mecanismo de feedforward, e “treina” os dados com retro propagação. Um esquema deste modelo com uma camada oculta, conforme utilizado para HV e Ar3, pode ser visualizado na Figura 2.11.



**Figura 2.11 – Modelo de arquitetura Multilayer Perceptron com uma camada oculta.**

Nesta única camada oculta das redes utilizadas, havia 4 elementos, o que tornava a transferência de 18 variáveis de entrada, para 4 elementos da camada oculta e, finalmente, resultando em 1 de saída. A função de transferência utilizada, tanto na entrada de dados como na saída foi a TanhAxon, que funciona aplicando uma função de tendência e outra de tangente hiperbólica em cada neurônio da camada. Assim, o valor do peso de cada neurônio da camada aumenta, variando entre -1 e 1. A Figura 2.12 mostra o símbolo dessa função de transferência, encontrado na rede multilayer perceptron utilizada.



**Figura 2.12 – Símbolo da função TanhAxon.**

O método de aprendizado utilizado foi o Momentum (MDM), e tem como objetivo achar o ponto mínimo da matriz Hessiana, relacionando os pesos com os erros, ou seja, frear o algoritmo no local de mínimo. A forma deste método de encontrar o mínimo é seguindo o caminho onde o gradiente da curva de pesos em

função do erro decresce, utilizando um valor de inércia  $\rho$ . Quanto maior  $\rho$ , menos a mudança do valor do gradiente afeta a mudança nos pesos. O valor do método de aprendizado foi de 0,7 para HV e Ar3.

### ***2.5.5 Treinamento e Testes***

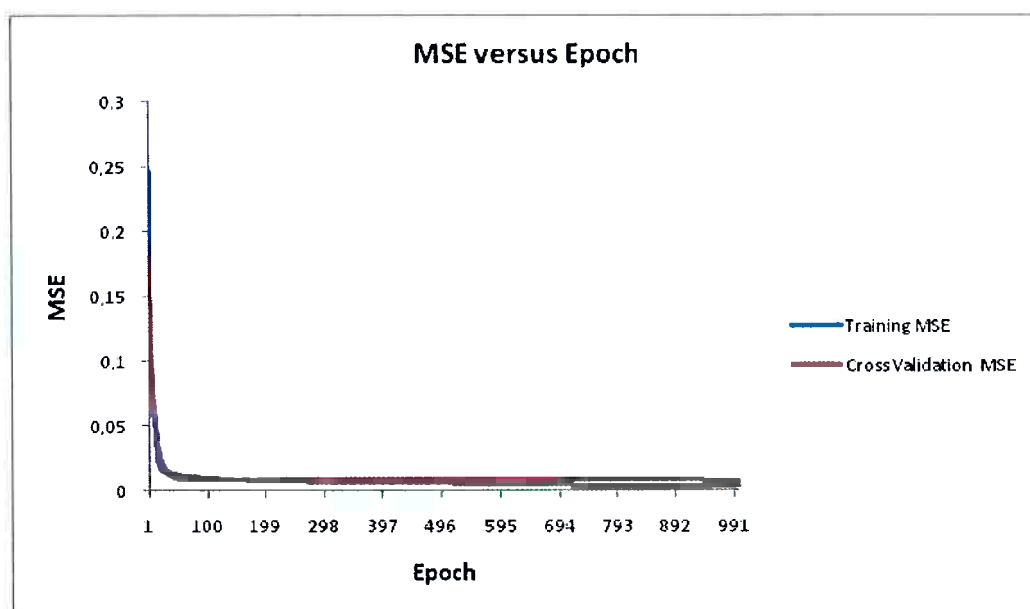
Antes de realizarem-se os testes nas redes, um treinamento destas foi feito, com o objetivo de verificar se não ocorria um super-treinamento da rede. Para o treinamento utilizou-se 1000 iterações, partindo-se de pesos iniciais randômicos e com os dados de validação.

Para o teste da rede, bem como o teste de sensibilidade, utilizou-se também 1000 iterações, com método de regressão para os testes, e a rede escolhendo os pesos mais adequados. No teste de sensibilidade os pesos também foram escolhidos pela rede, sendo o desvio padrão 1 e 50 steps per Side. Os resultados do treinamento e testes podem ser visualizados no item 3 deste documento.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Ar3 como variável de saída

A rede utilizada para Ar3 foi treinada com 1000 iterações, sem excesso de treinamento e, pelas curvas de treinamento e validação foi possível observar um resultado satisfatório, ou seja, as duas curvas apresentaram uma boa aderência durante o processo. As curvas podem ser observadas na Figura 3.1.

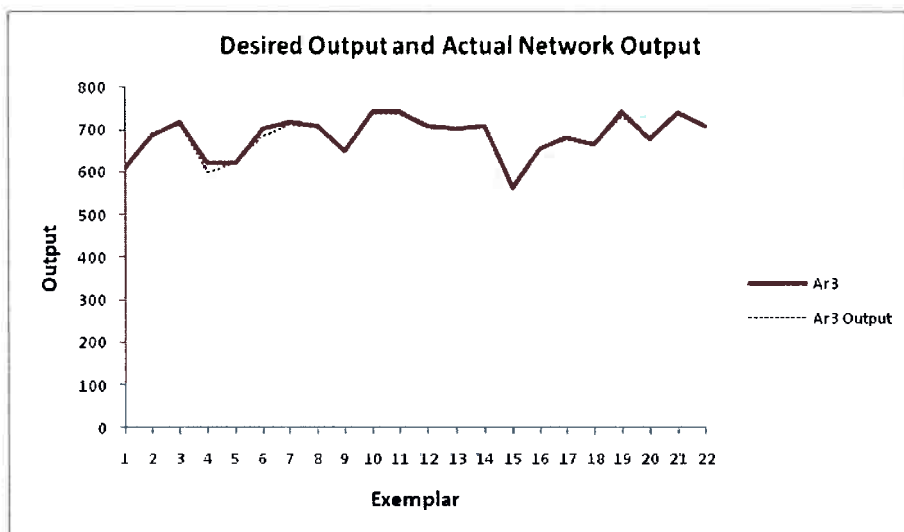


**Figura 3.1 – Curvas de treino e validação para Ar3.**

O teste da rede resulta em um gráfico comparando os dois valores de saída da parte de testes, o experimental e o gerado pela rede. Este pode ser visualizado na Figura 3.2, enquanto que os valores do índice de confiabilidade, também gerados pela RNA, encontram-se na Tabela 3.1.

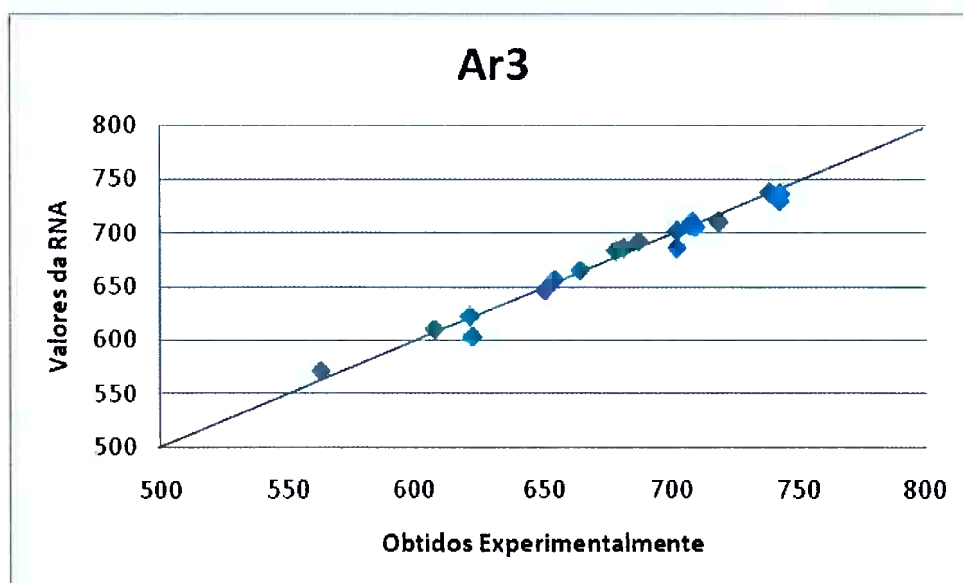
**Tabela 3.1 – Valores dos índices de confiabilidade obtidos para Ar3.**

<i>Performance</i>	<i>Ar3</i>
MSE	50,95812778
NMSE	0,022855901
MAE	5,256747539
Min Abs Error	0,016407877
Max Abs Error	18,86309616
r	0,989977142



**Figura 3.2 – Gráfico de comparação dos valores experimentais e obtidos pela RNA para Ar3.**

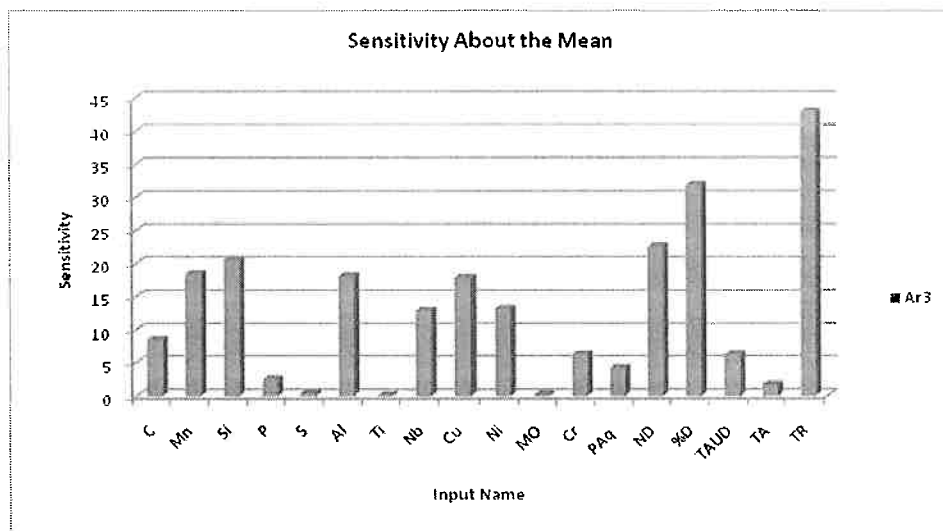
Observa-se, pela Figura 3.2 que a diferença entre os valores calculados pela rede e os obtidos experimentalmente são bem baixos, o que pode ser visualizado também na Figura 3.3. Os pontos obtidos estão muito próximos da linha diagonal da tabela, o que mostra uma boa adequação da rede.



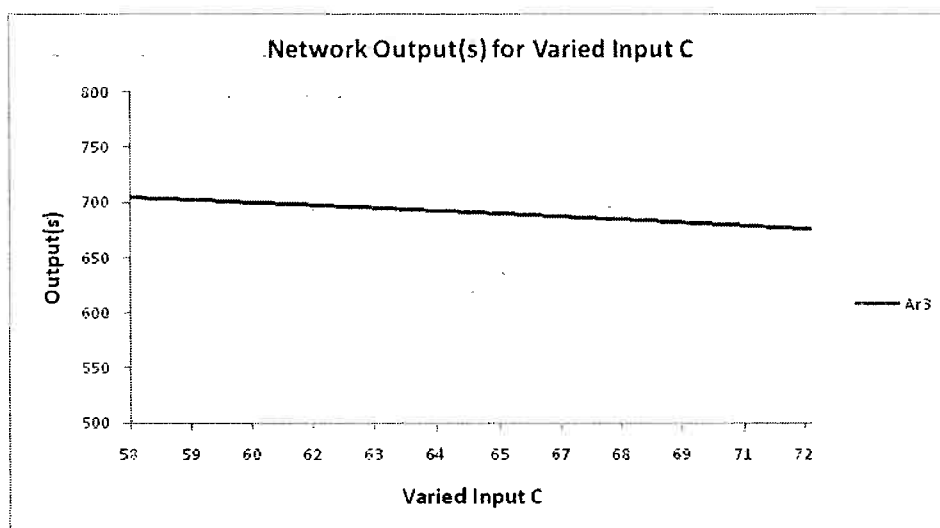
**Figura 3.3 – Valores de Ar3 obtidos pela RNA versus os valores obtidos experimentalmente.**

O segundo teste realizado fornece o gráfico de sensibilidade das variáveis de entrada sobre a variável de saída, no caso Ar3. Também é apresentadas, para cada variável de entrada, sua influência em Ar3. Os gráficos para estes testes podem ser visualizados nas Figuras de 3.4 a 3.22.

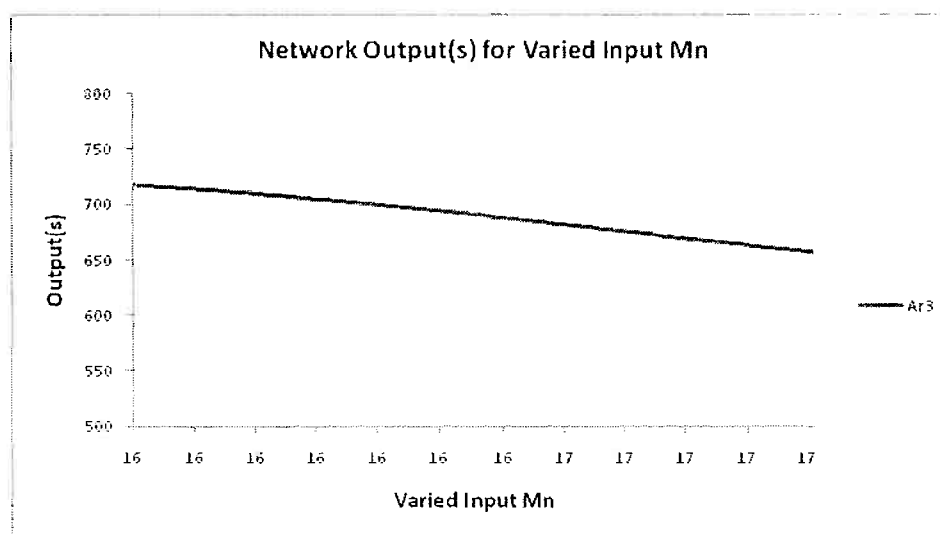




**Figura 3.4 – Sensibilidade de cada variável na obtenção de Ar3 pela RNA.**



**Figura 3.5 – Efeito da quantidade de carbono em Ar3.**



**Figura 3.6 – Efeito da quantidade de Mn em Ar3.**

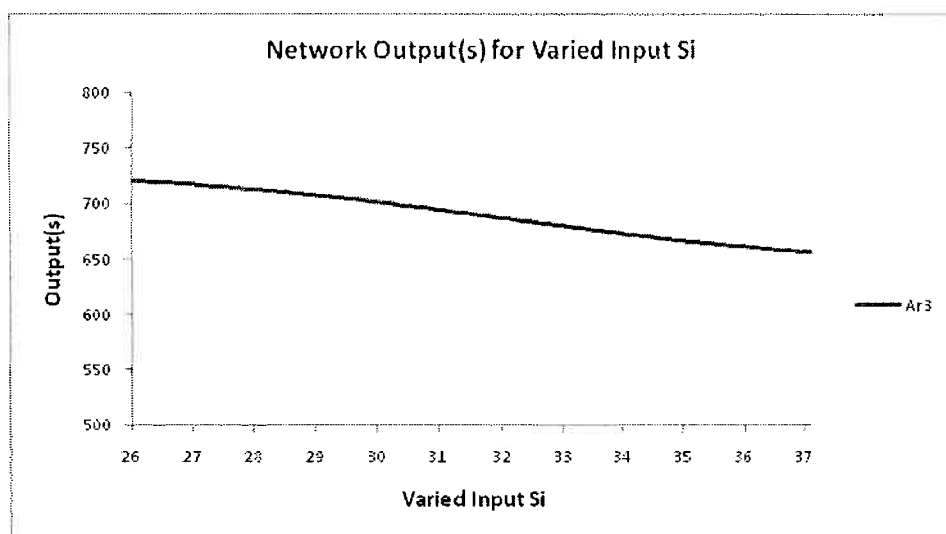


Figura 3.7 – Efeito da quantidade de Si em Ar3.

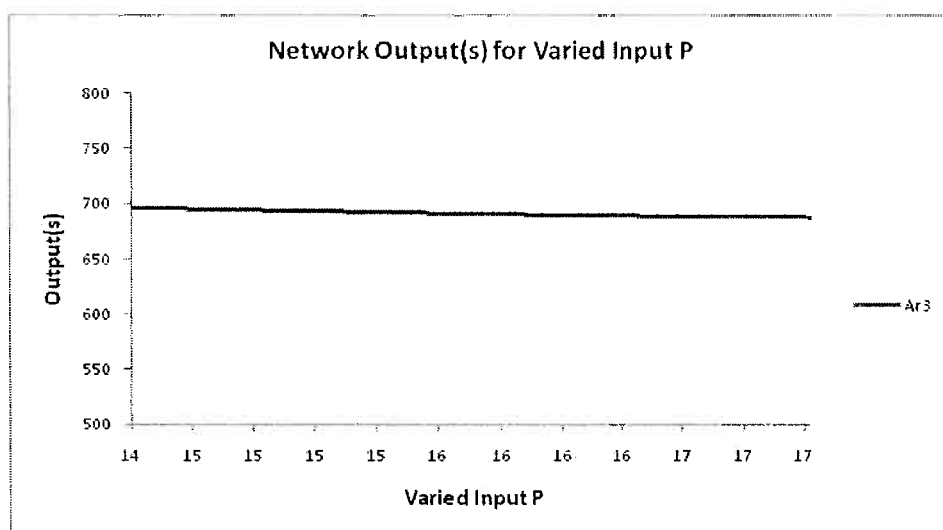


Figura 3.8 – Efeito da quantidade de P em Ar3.

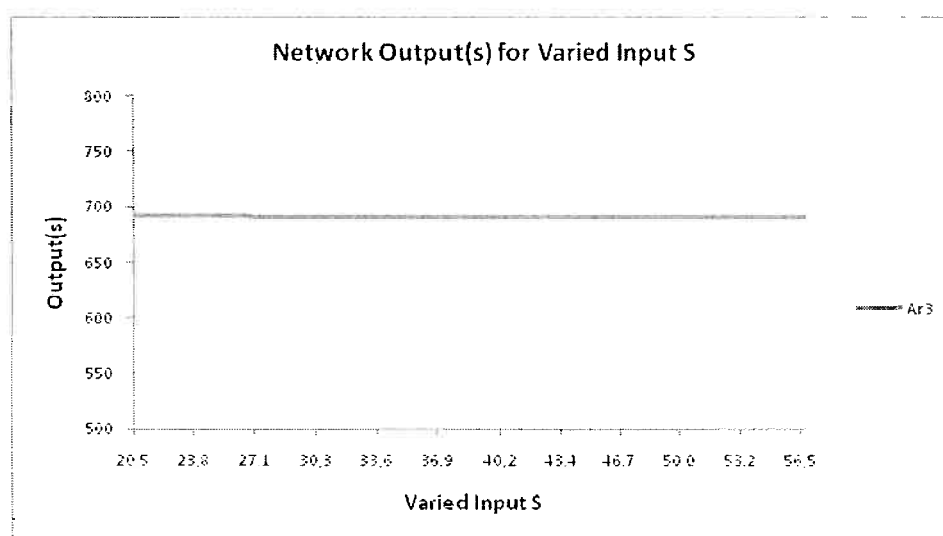


Figura 3.9 – Efeito da quantidade de S em Ar3.

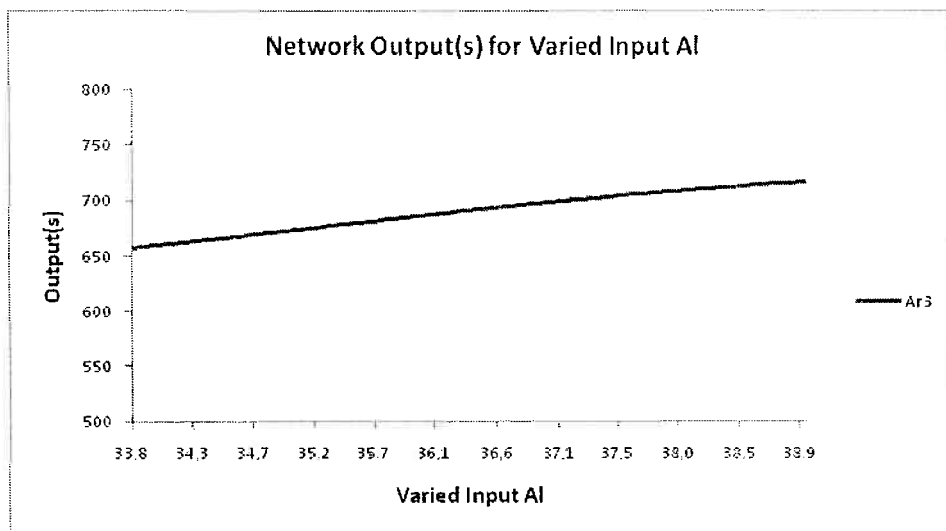


Figura 3.10 – Efeito da quantidade de AI em Ar3.

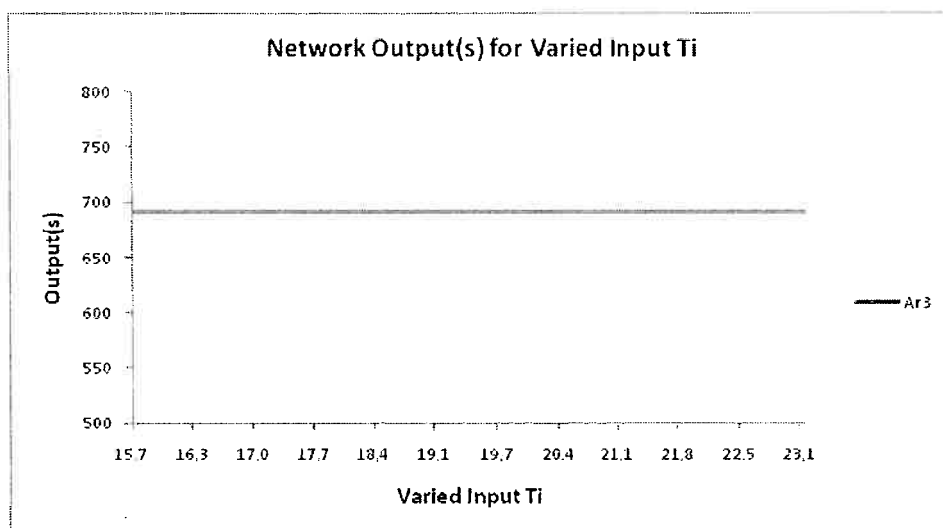


Figura 3.11 – Efeito da quantidade de Ti em Ar3.

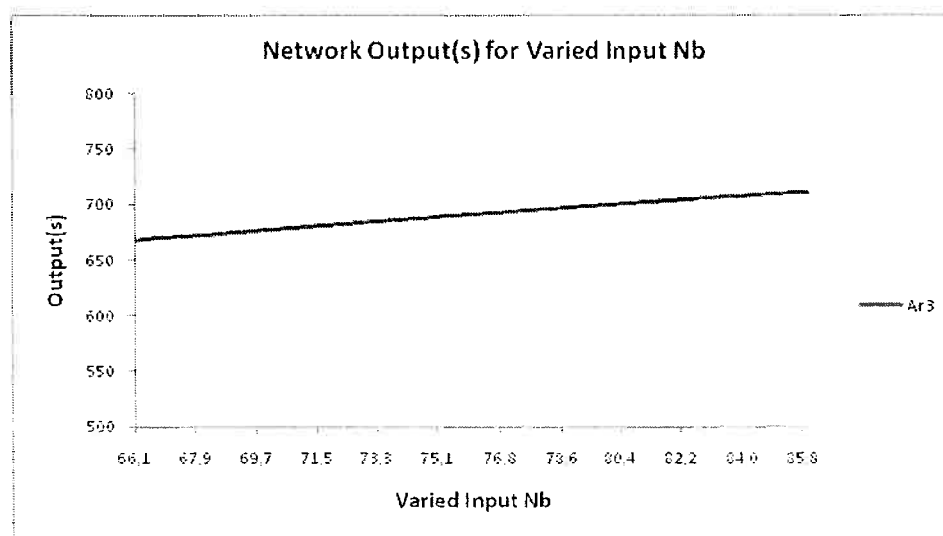


Figura 3.12 – Efeito da quantidade de Nb em Ar3.

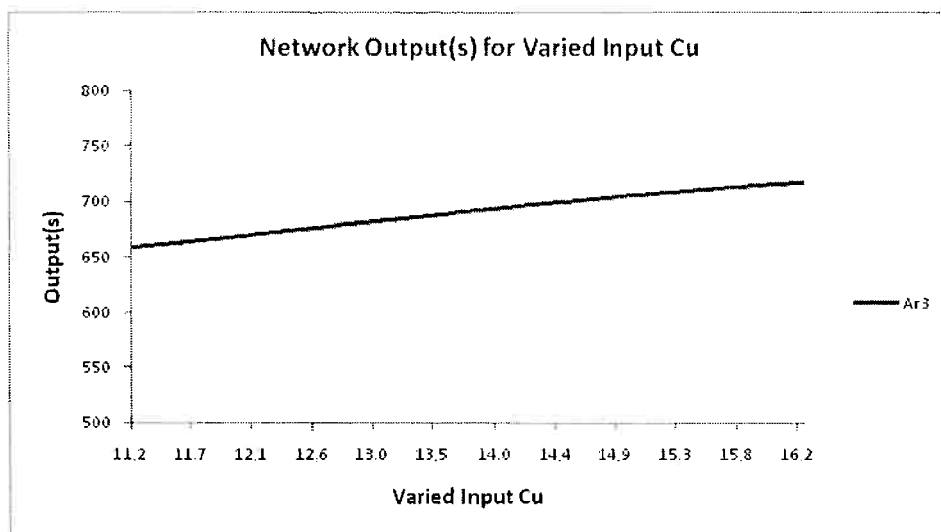


Figura 3.13 – Efeito da quantidade de Cu em Ar3.

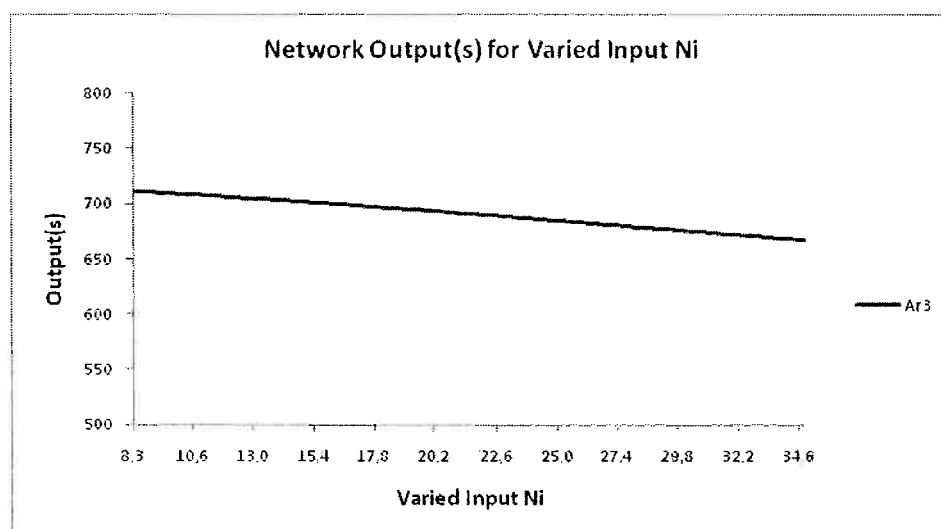


Figura 3.14 – Efeito da quantidade de Ni em Ar3.

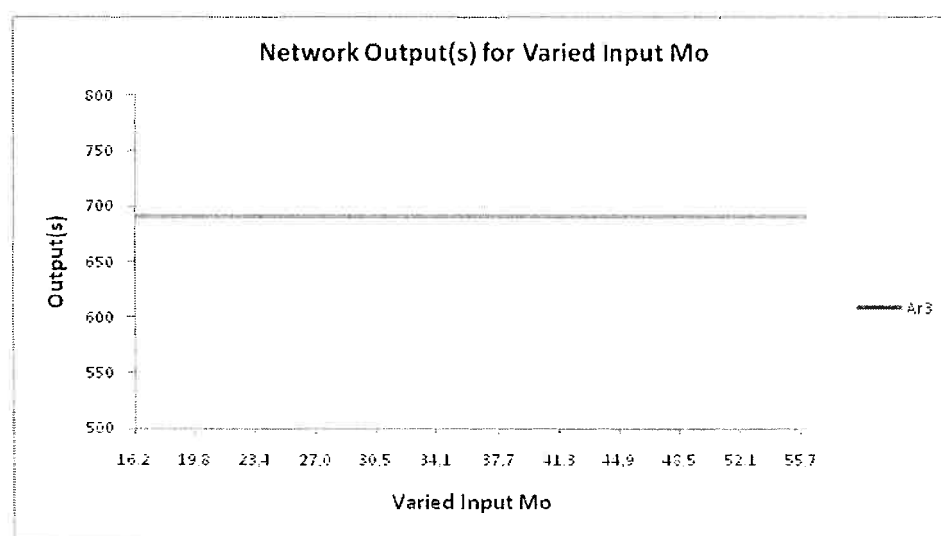


Figura 3.15 – Efeito da quantidade de Mo em Ar3.

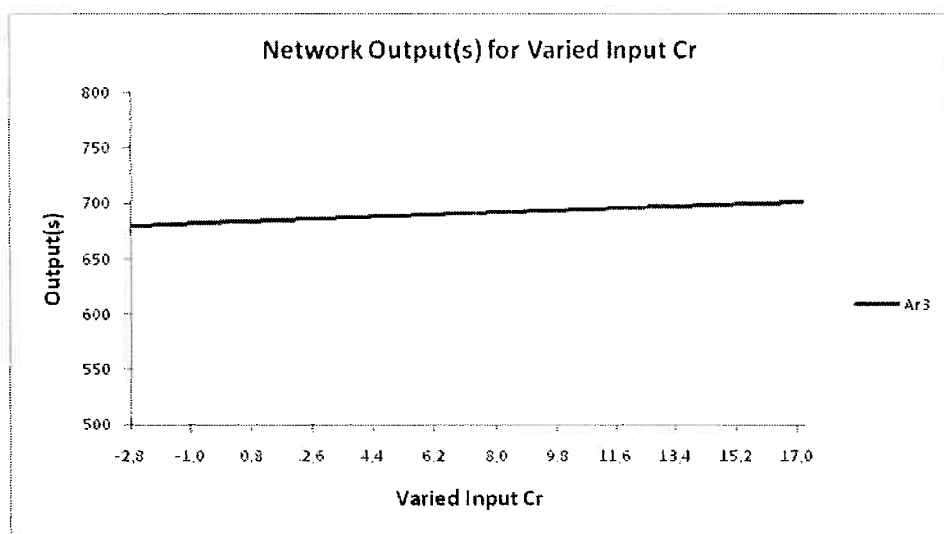


Figura 3.16 – Efeito da quantidade de Cr em Ar3.

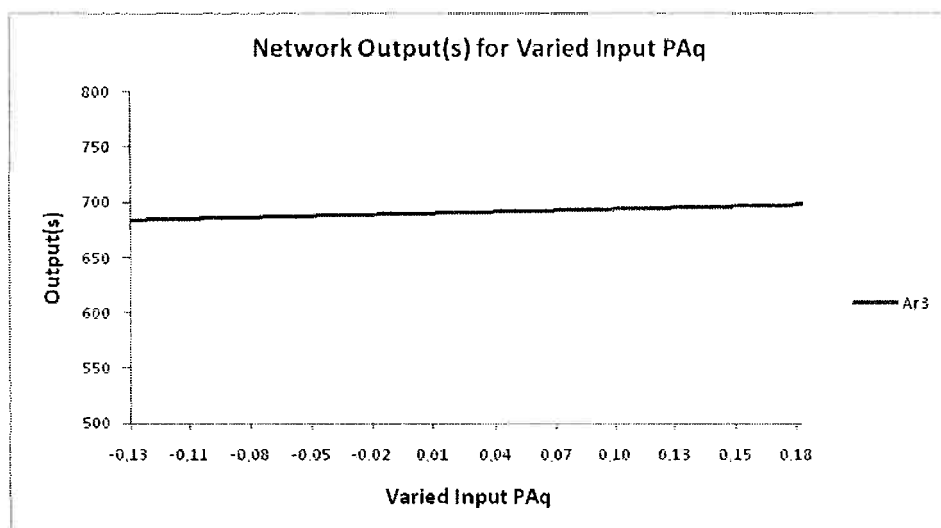


Figura 3.17 – Efeito do Pré-aquecimento em Ar3.

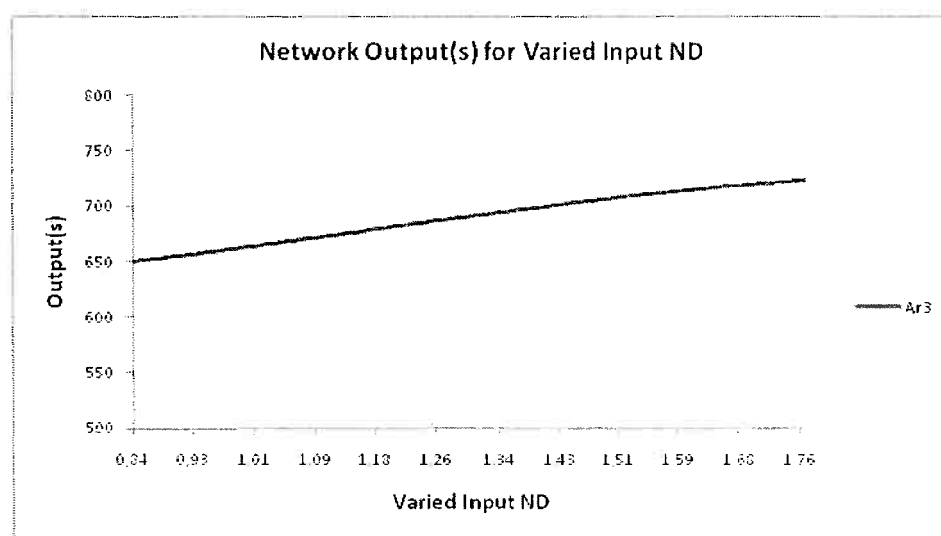


Figura 3.18 – Efeito do número de deformações em Ar3.

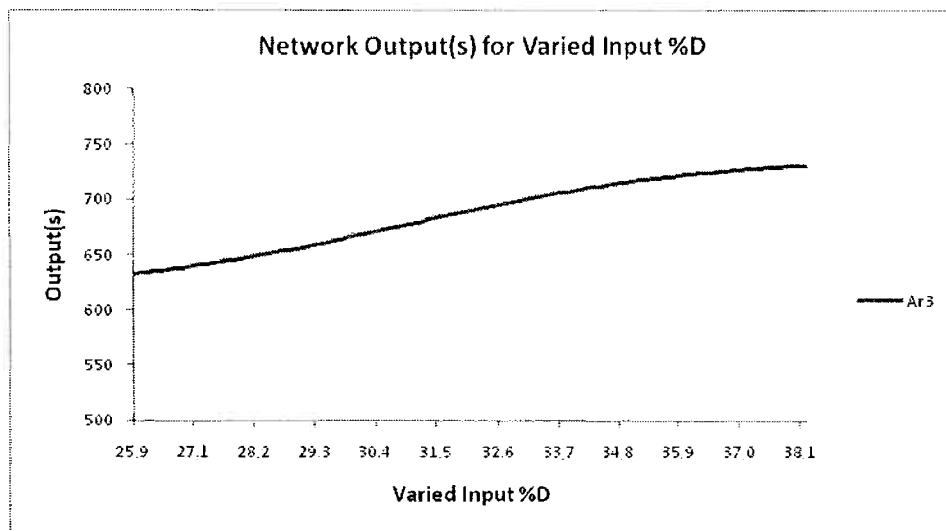


Figura 3.19 – Efeito da porcentagem da última deformação em Ar3.

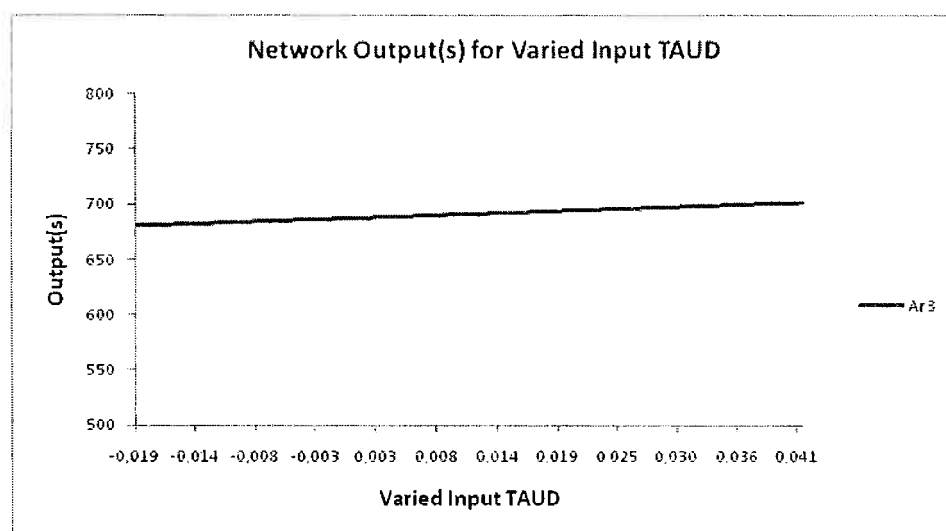


Figura 3.20 - Efeito do tempo após a última deformação, na temperatura de deformação, em Ar3.

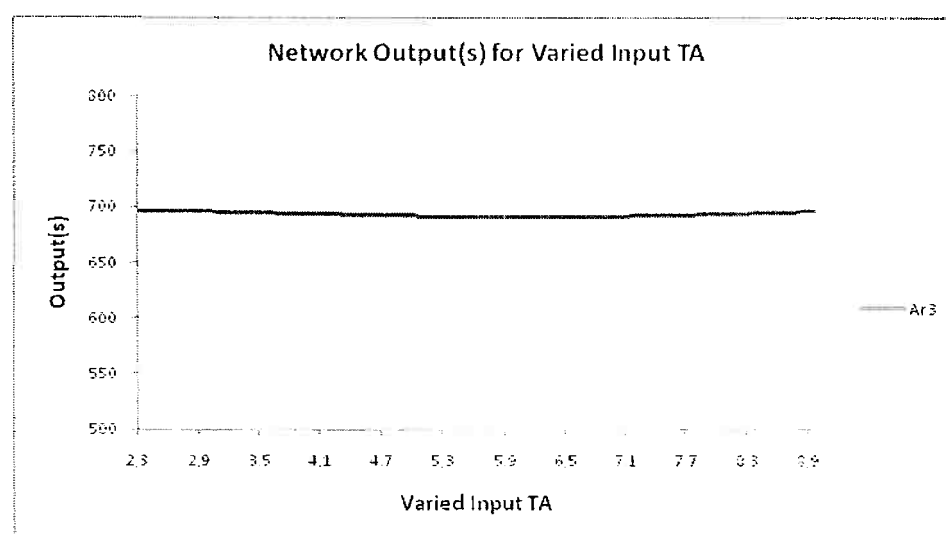
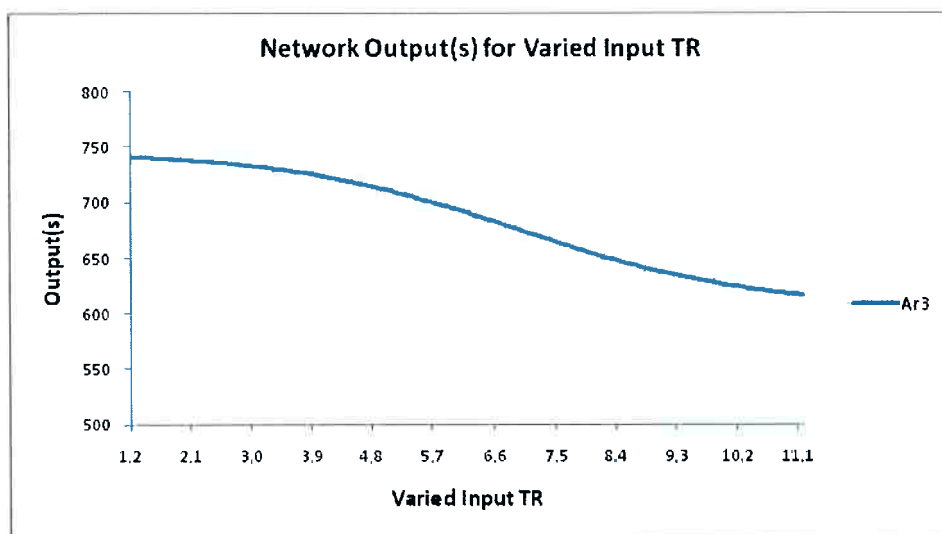


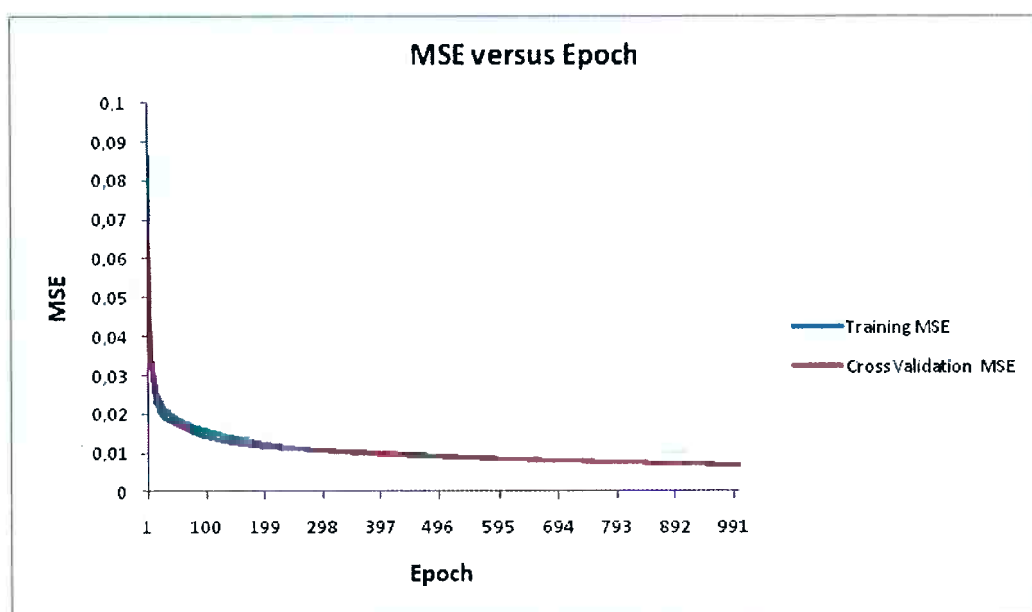
Figura 3.21 – Efeito to tempo de austenitização em Ar3.



**Figura 3.22 – Efeito da taxa de resfriamento em Ar3.**

### 3.2 HV como variável de saída

Assim como para Ar3, a rede utilizada para HV foi treinada com 1000 iterações, sem excesso de treinamento e, pelas curvas de treinamento e validação foi possível observar um resultado satisfatório, ou seja, as duas curvas apresentaram uma boa aderência durante o processo. As curvas podem ser observadas na Figura 3.23.



**Figura 3.23 – Curvas de treino e validação para HV.**

O gráfico comparando as variáveis de saída experimentais obtidas experimentalmente pode ser observado nas Figuras 3.24 e 3.25, enquanto que o valor do índice de confiabilidade encontra-se na Tabela 3.2. Pode-se observar que os resultados não são tão próximos como em Ar3, mas ainda assim os desvios são baixos.

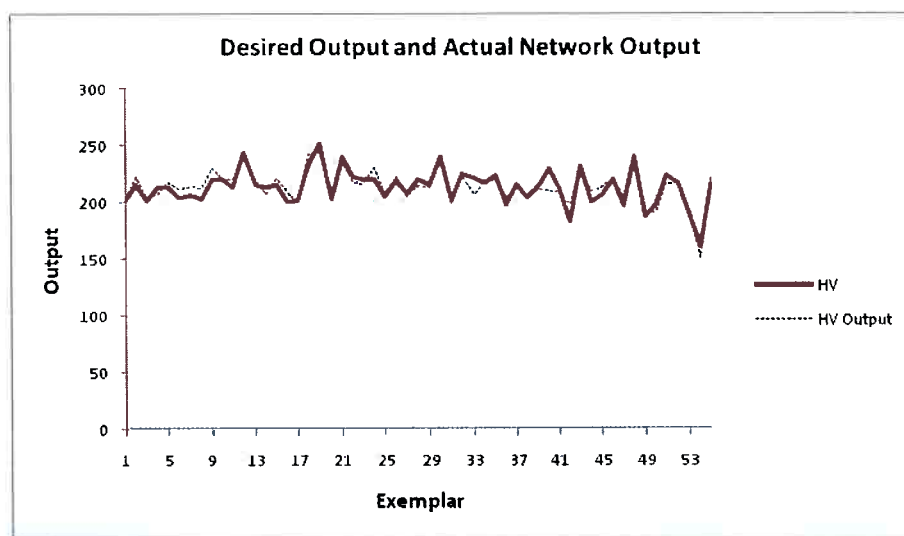


Figura 3.24 – Gráfico de comparação dos valores experimentais e obtidos pela RNA para HV.

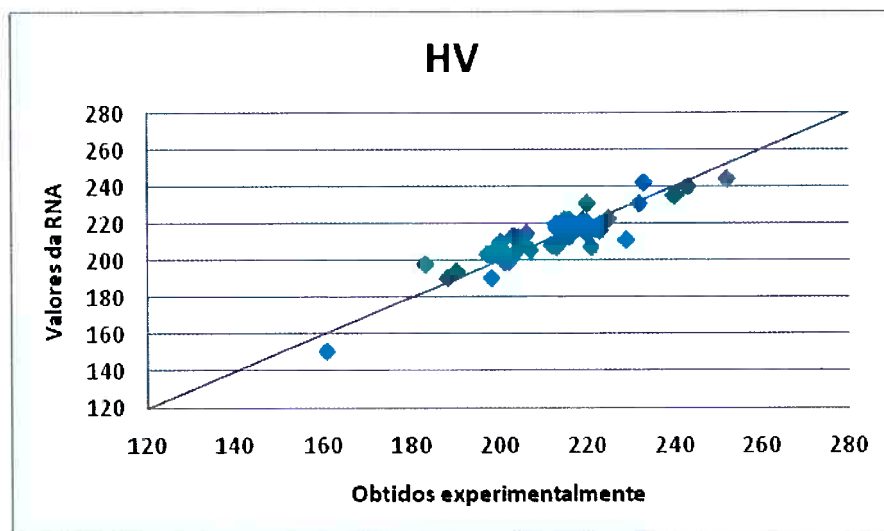


Figura 3.25 - Valores de HV obtidos pela RNA versus os valores obtidos experimentalmente.

Tabela 3.2 - dos índices de confiabilidade obtidos para HV.

<i>Performance</i>	<i>HV</i>
MSE	44,26532518
NMSE	0,181153636
MAE	5,489864853
Min Abs Error	0,13195742
Max Abs Error	17,95642809
r	0,906968096



Os resultados do teste de sensibilidade (sensibilidade das variáveis e seus efeitos sobre HV) pode ser visualizado da Figura de 3.26 a 3.44.

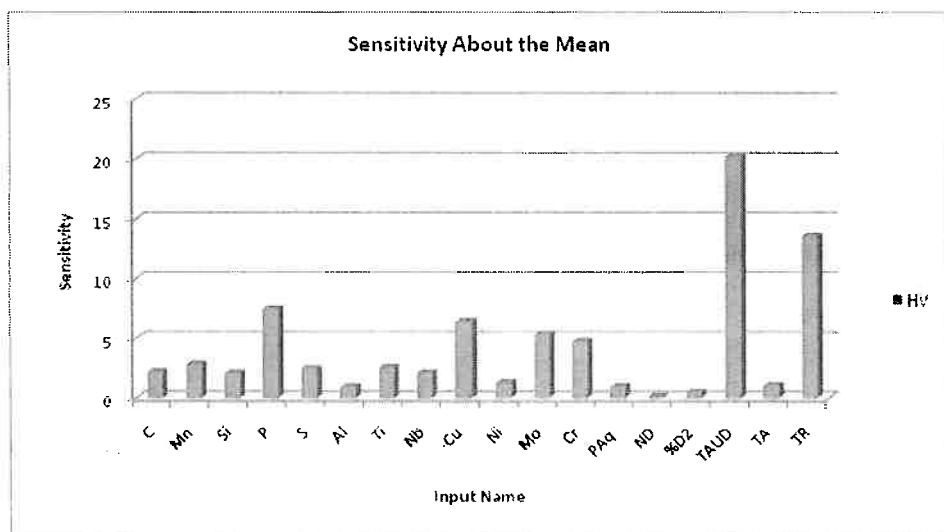


Figura 3.26 – Sensibilidade de cada variável na obtenção de HV pela RNA.

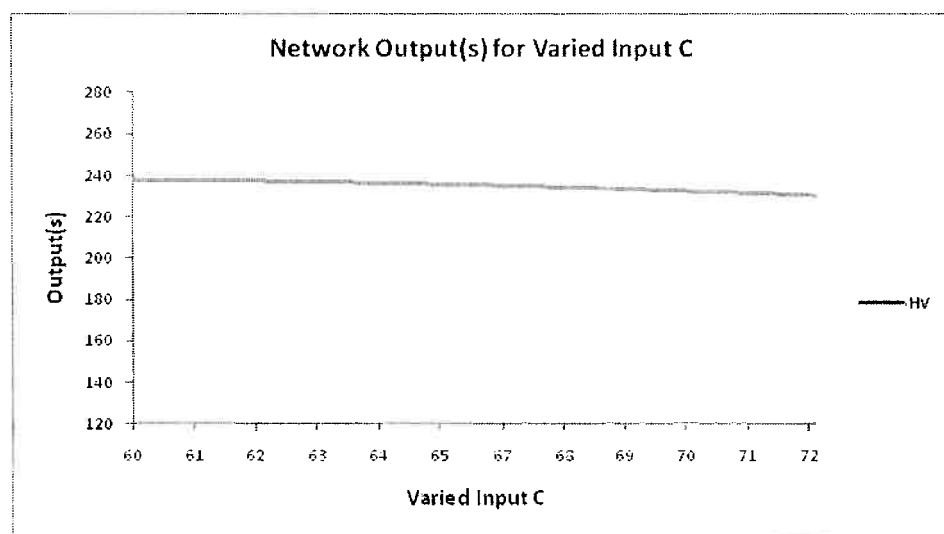


Figura 3.27 – Efeito da quantidade de carbono em HV.

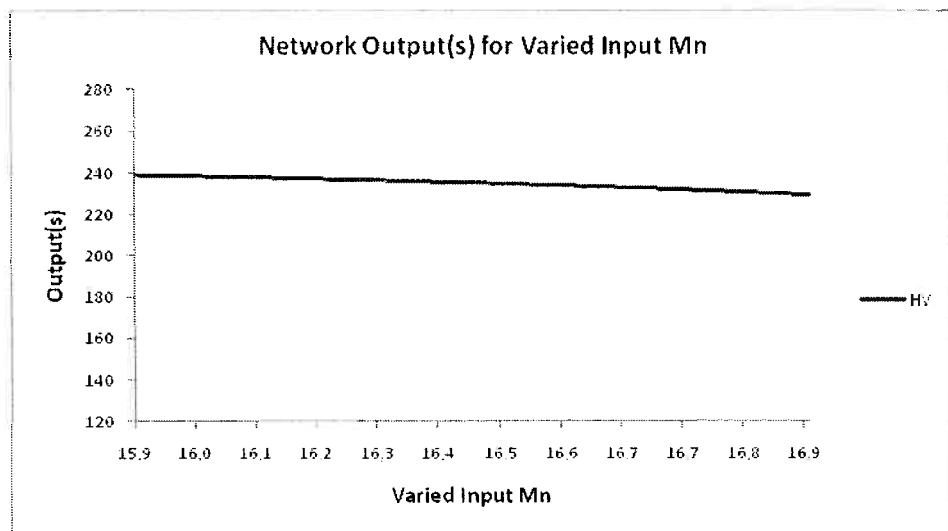


Figura 3.28 – Efeito da quantidade de Mn em HV.

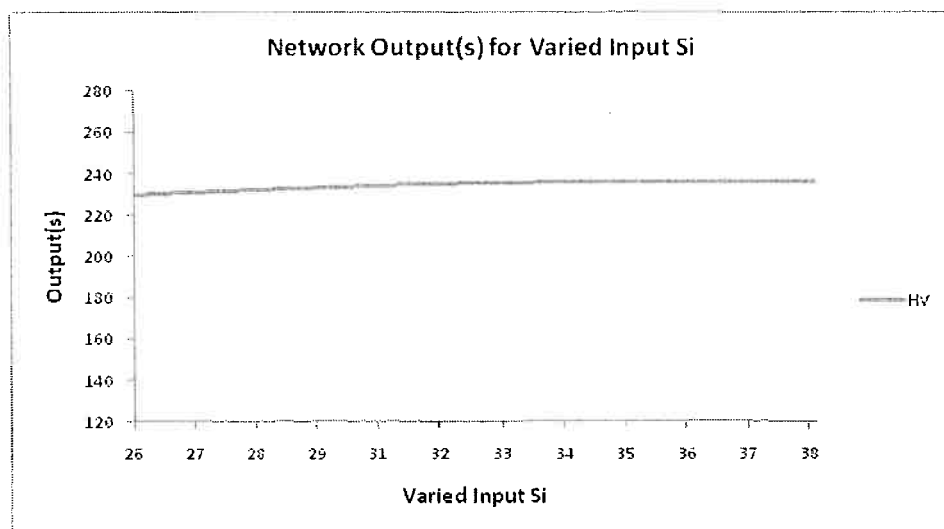


Figura 3.29 – Efeito da quantidade de Si em HV.

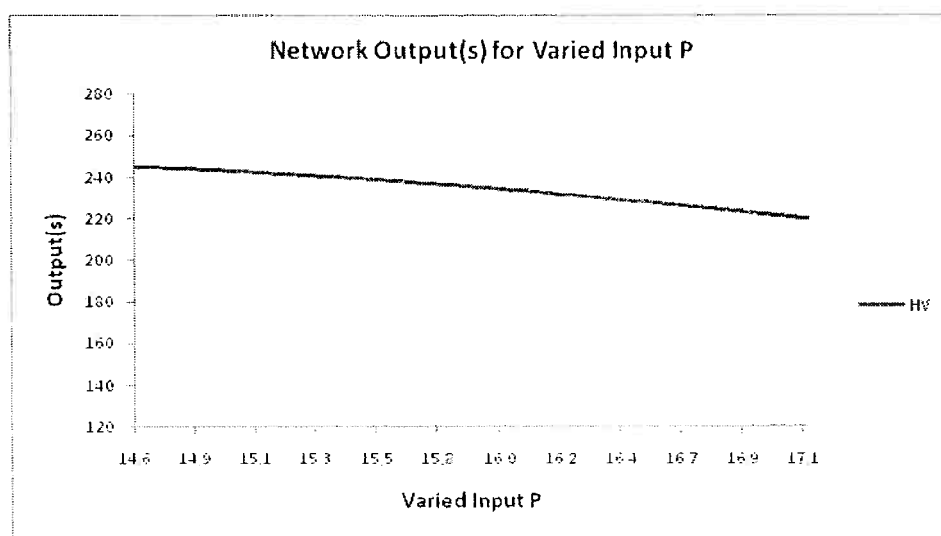


Figura 3.30 – Efeito da quantidade de P em HV.

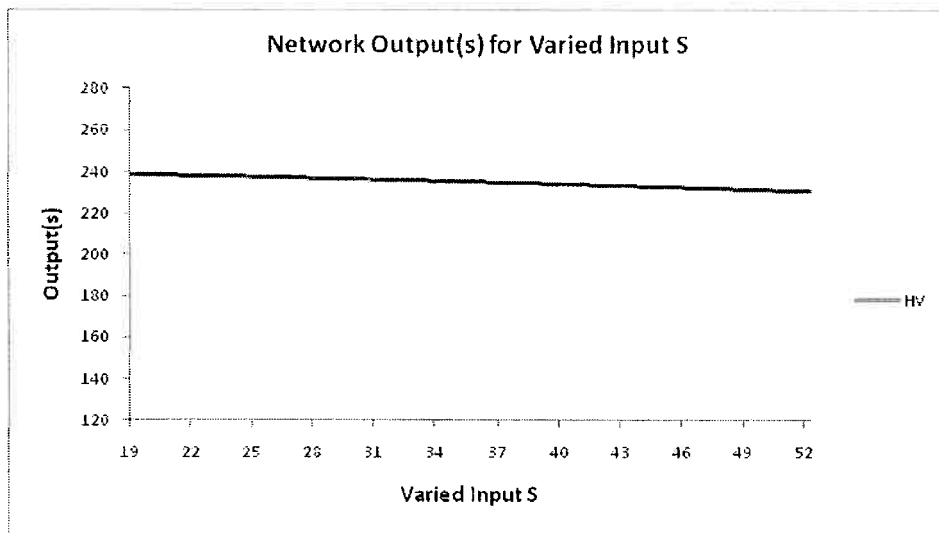


Figura 3.31 – Efeito da quantidade de S em HV.

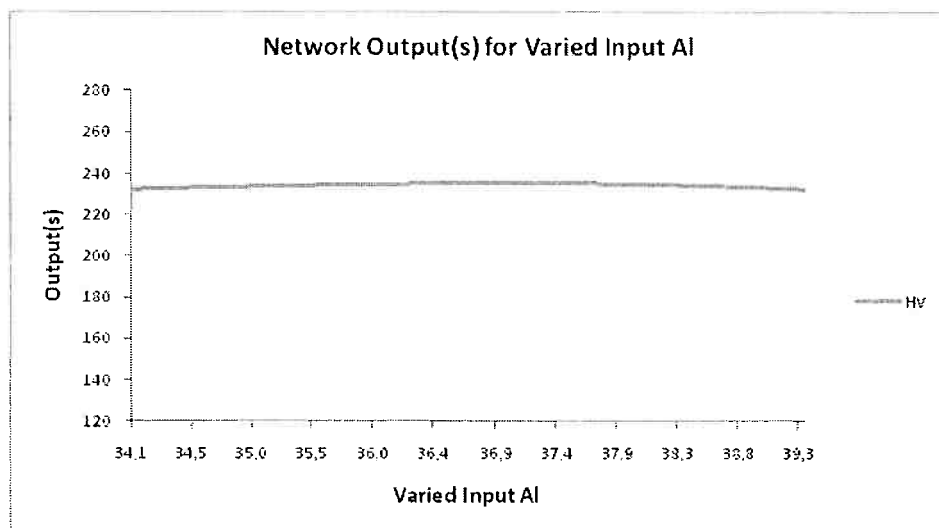


Figura 3.32 – Efeito da quantidade de Al em HV.

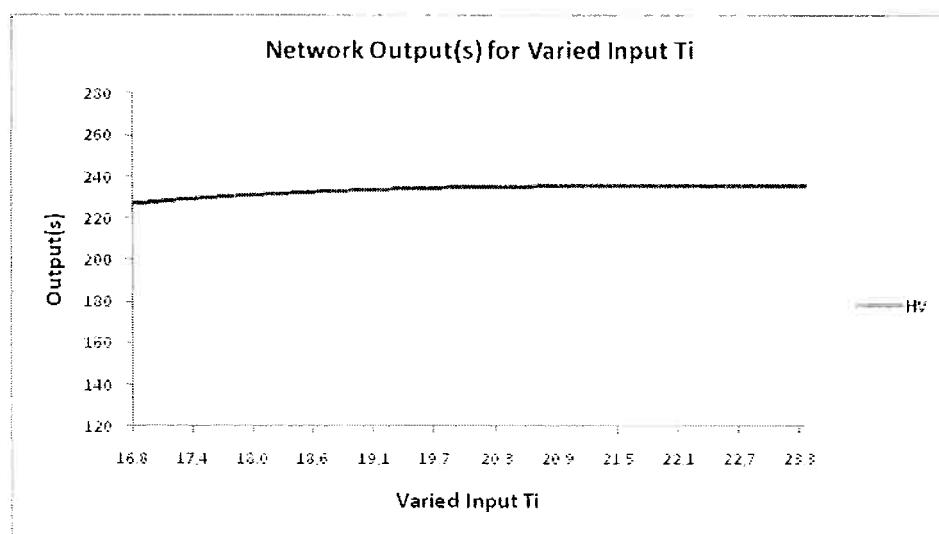


Figura 3.33 – Efeito da quantidade de Ti em HV.

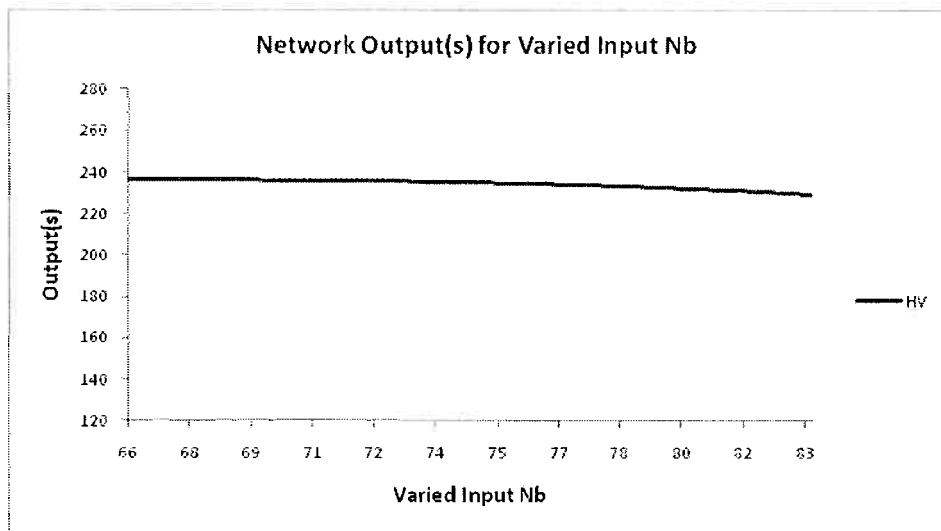


Figura 3.34 – Efeito da quantidade de Nb em HV.

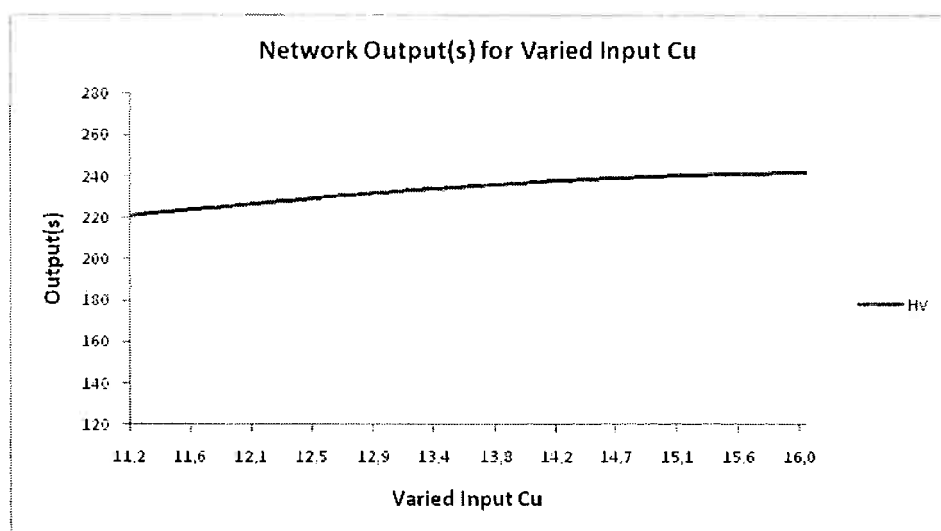


Figura 3.35 – Efeito da quantidade de Cu em HV.

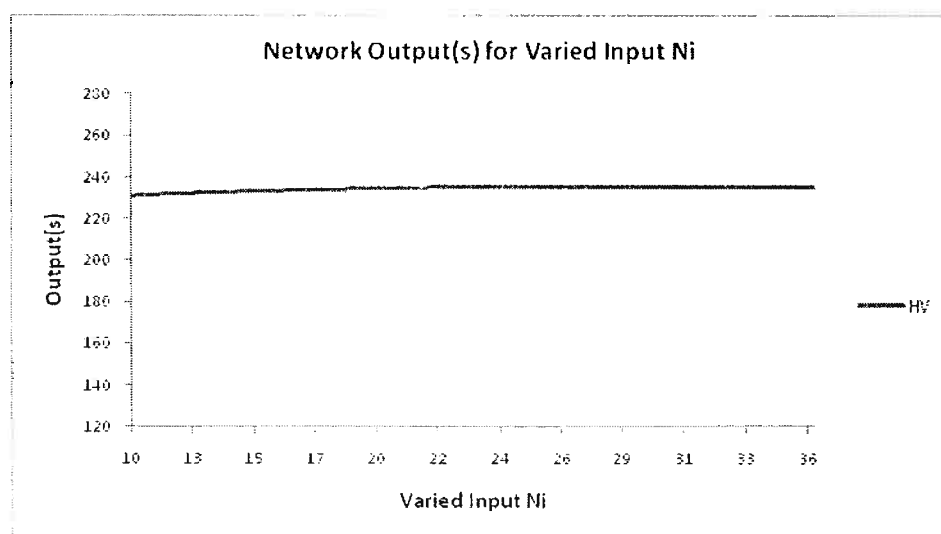


Figura 3.36 – Efeito da quantidade de Ni em HV.

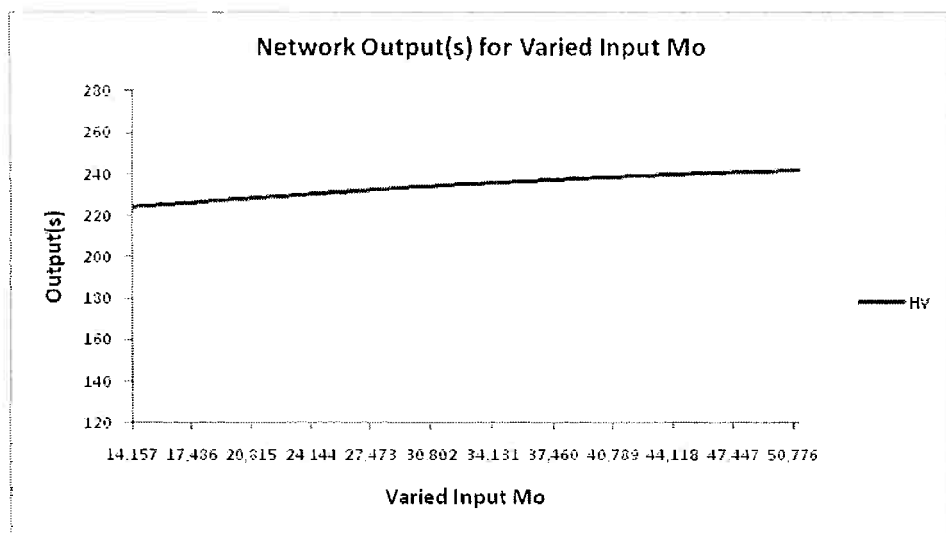


Figura 3.37 – Efeito da quantidade de Mo em HV.

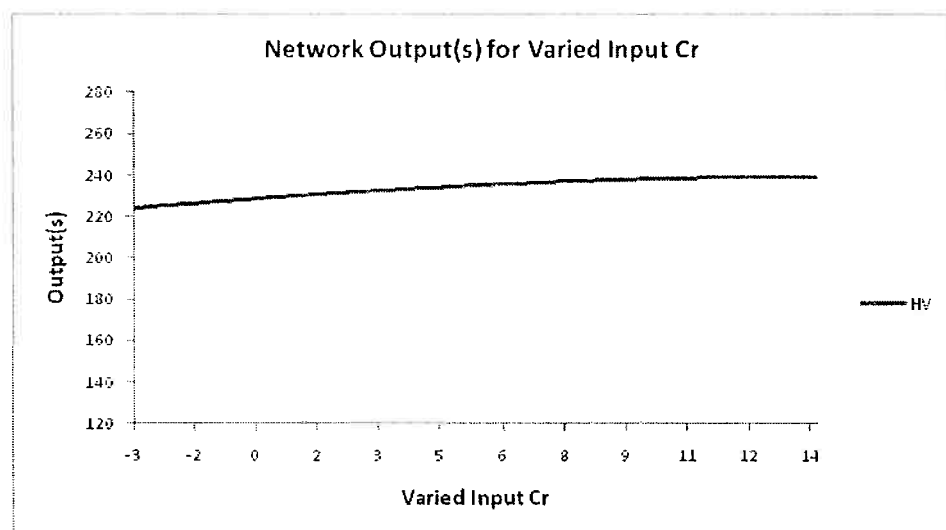


Figura 3.38 – Efeito da quantidade de Cr em HV.

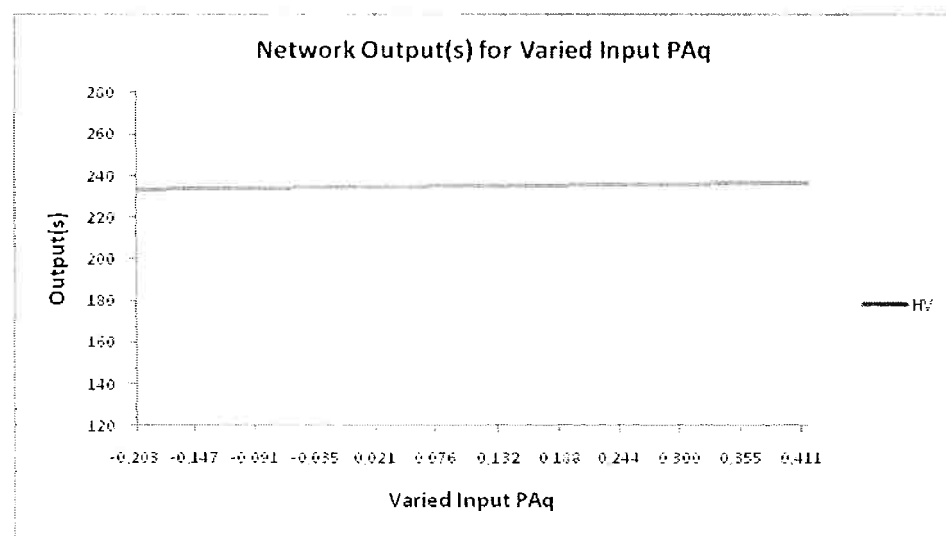


Figura 3.39 – Efeito do Pré-aquecimento em HV.

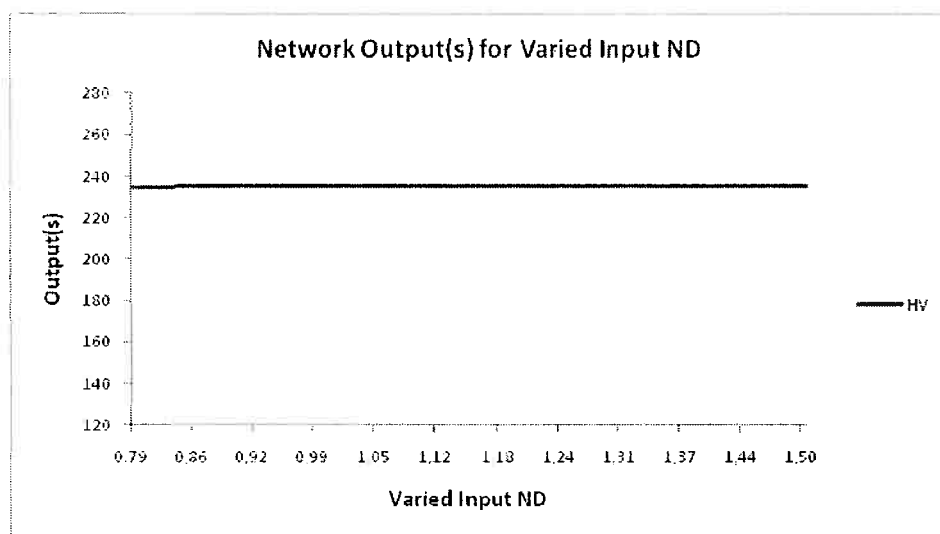


Figura 3.40 – Efeito do número de deformações em HV.

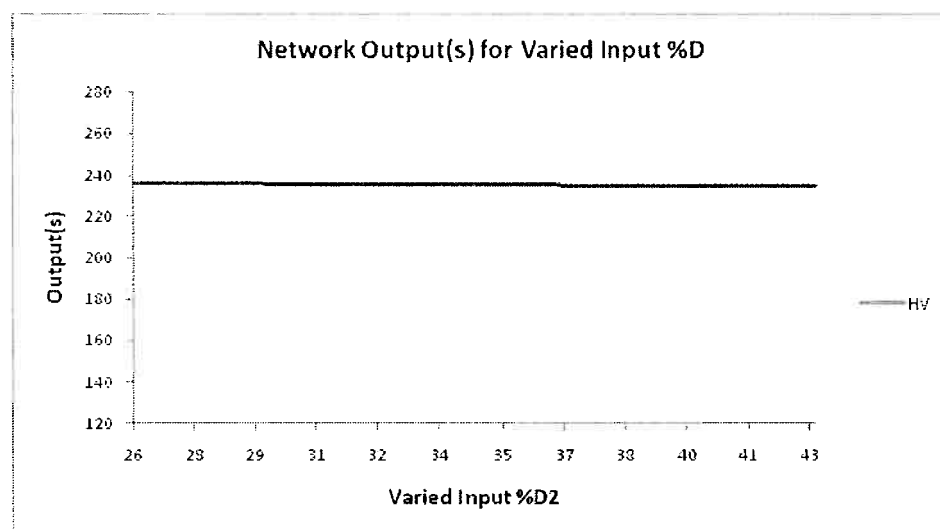


Figura 3.41 – Efeito da porcentagem da última deformação em HV.

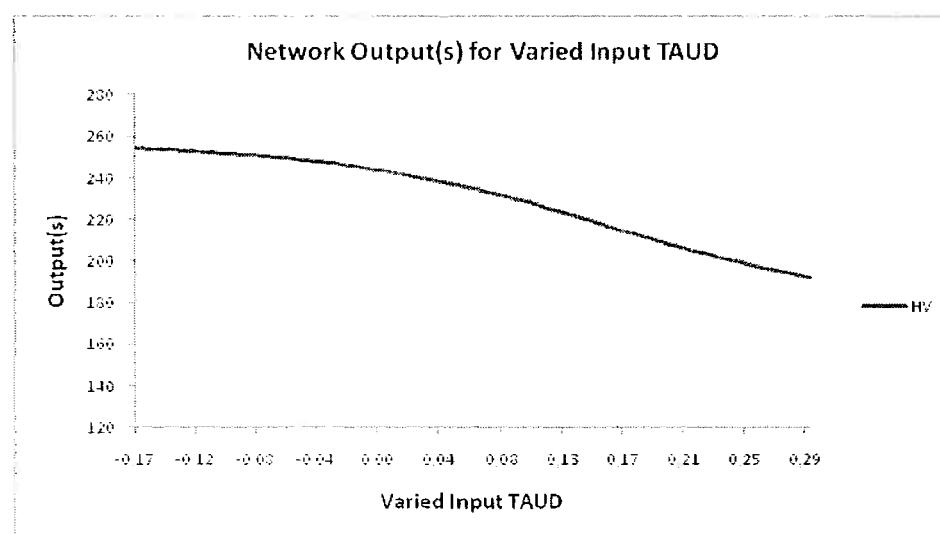


Figura 3.42 - Efeito do tempo após a última deformação, na temperatura de deformação, em HV.

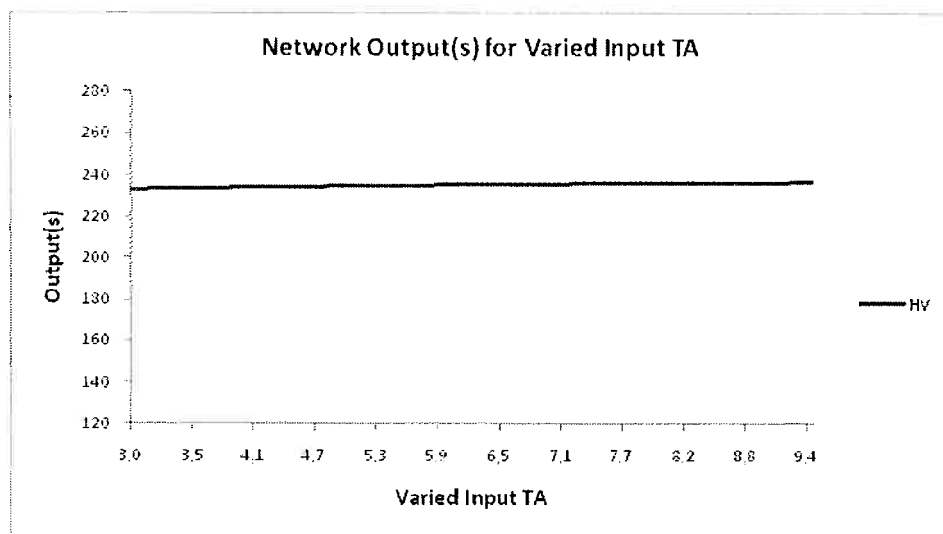


Figura 3.43 – Efeito to tempo de austenitização em HV.

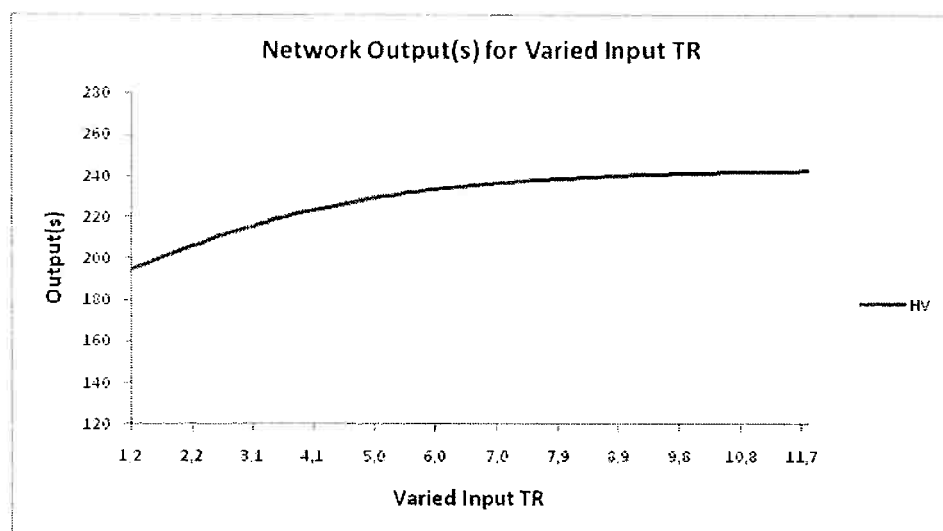


Figura 3.44 – Efeito da taxa de resfriamento em HV.

## 4 DISCUSSÃO

A partir dos gráficos de treinamento, teste da rede neural e teste de sensibilidade, foi feita uma análise dos resultados, para as saídas Ar3 e HV. Para ambos os casos, observou-se um bom treinamento das redes, que não tiveram uma super-sensibilidade quanto aos dados, ou seja, não perderam sua capacidade de generalização. Além disso, os valores encontrados foram coerentes com a realidade, com altos valores do índice de confiabilidade  $r$ , como foi observado no capítulo anterior deste documento. Resta, porém, analisar a sensibilidade das variáveis de entrada.

### 4.1 Ar3 como variável de saída

Existem dois tipos de variáveis de entrada testadas: as que se referem à composição química do material, e as que são referentes ao tratamento térmico dado a este. No caso de Ar3 como saída, observou-se que as variáveis de tratamento térmico mais importantes eram, nesta ordem, a taxa de resfriamento (TR), a deformação aplicada (%D) e o número de deformações (ND), sendo as outras deste tipo (PAq, TAUD e TA) consideradas pouco influentes no valor de Ar3 encontrado.

Isto faz sentido segundo os conceitos metalúrgicos, pois Ar3 é a temperatura de início de transformação de austenita para ferrita. Esta transformação é governada principalmente por difusão<sup>[18]</sup>, o que torna a taxa de resfriamento e, assim, o tempo de difusão, o fator mais influente. Quanto maior a taxa de resfriamento, menos tempo há para a difusão e mais tarde se inicia a transformação, o que diminui a temperatura Ar3. Entretanto, observa-se no Gráfico 3.22, uma tendência de estabilização da curva para valores abaixo de 2 e acima de 11. Isso pode ser explicado pelo fato de que, abaixo de 2K/s, há tempo mais que suficiente para a difusão e transformação de fase, estando-se no estado de equilíbrio. Quando se eleva a taxa de resfriamento, Ar3 tende ao valor do “nariz” da curva TTT, sendo que,



acima desta taxa, a transformação se torna de austenita para martensita diretamente.

A %D e o ND são fatores importantes porque, quanto maior a deformação aplicada, mais energia há no material, o que torna a transformação mais fácil, ou seja, aumenta  $A_{r3}$ . Essa tendência é observada tanto para %D (Gráfico 3.19) quanto para ND (Gráfico 3.18). Entretanto, uma linha contínua não faz sentido fisicamente para o número de deformações, uma vez que estes correspondem a valores discretos. Assim, o gráfico é útil para se saber a tendência dos valores, mas não deve ser usado diretamente para interpolação.

Ao contrário do esperado, não se observou influência do tempo do pré-aquecimento (PAq) e do tempo de austenitização (TA) sobre  $A_{r3}$ . Esses dois fatores deveriam contribuir para a dissolução de precipitados e, assim, o aumento dos grãos de austenita, criando menos contornos de grão, o que geraria menos pontos de nucleação para a transformação, diminuindo  $A_{r3}$ . O TAUD também não apresentou efeito sobre  $A_{r3}$ , sendo o esperado que, com um maior tempo na temperatura de transformação e após esta, mais energia fosse dada ao material e, assim,  $A_{r3}$  fosse elevada. Atribui-se estas irregularidades ao fato de a RNA utilizar-se de equações matemáticas, que não são presas a conceitos físicos da metalurgia.

Para as variáveis relacionadas à composição química, os fatores mais influentes foram as quantidades de Si, Mn, Al, Cu, Ni e Nb, enquanto que variáveis como as quantidades de C, Cr, P, S, Ti e Mo tiveram uma influência menor, mas não desprezível.

Os teores de Nb, Al e Ti são importantes em um aço, sendo esses elementos formadores de precipitados, combinando-se entre si e/ou com carbono e nitrogênio. Estes precipitados dificultam a movimentação dos contornos de grão, deixando os grãos de austenita menores e formando mais núcleos para transformação austenita-ferrita. Dessa forma, o teor desses elementos aumenta a temperatura  $A_{r3}$ . Podemos observar esse fenômeno para o Al e Nb nas figuras 3.10 e 3.12, respectivamente. Entretanto, novamente devido às equações matemáticas não se aterem a significados físicos, o teor de Ti não tem efeito sobre  $A_{r3}$ , como observado na Figura 3.11.

Da mesma forma, os elementos Cu, Cr e Ni tendem a formar precipitados finos nos aços, que são mais influentes nas propriedades mecânicas finais dos materiais que em Ar3. Contraditoriamente, o aumento no teor de Ni diminui Ar3, conforme observado no Gráfico 3.14.

O silício é um elemento que reduz a formação de carbonetos do aço<sup>[19]</sup>, facilitando a movimentação de discordâncias pelos grãos e, assim, facilitando também a transformação ferrita-austenita, ou seja, aumentando Ar3. Esse comportamento foi observado no Gráfico 3.7.

O manganês também teve um efeito esperado em Ar3, pois o Mn atrasa a precipitação de Nb e Ti, facilitando a movimentação dos contornos de grão e diminuindo Ar3.

## **4.2 HV como variável de saída**

Para a rede com HV como saída, o fator mais importante foi indiscutivelmente o TAUD, seguido de TR, e sendo o peso das outras variáveis referentes ao ciclo térmico praticamente desprezíveis. Para as variáveis referentes à composição, as mais importantes, mas ainda assim menos significativas que TAUD e TR, foram P, Cu e Mo, tendo as outras pesos menores mas não desprezíveis.

O TAUD, ou seja, o tempo ao qual a amostra foi mantida a 850°C após a última deformação, foi a região do ciclo térmico em que houve uma precipitação dos elementos de liga. Assim, os precipitados foram núcleos para a transformação austenita-ferrita, havendo mais ferrita transformada, o que diminui a dureza final do material. No Gráfico 3.42 observa-se que HV sempre diminui com o aumento de TAUD, conforme esperado. Há, entretanto, um ponto de inflexão na curva, próximo a 0,13, o equivalente a 390 segundos. Neste ponto, uma grande porcentagem de precipitados estaria formada, o que diminuiria a cinética de formação destes e, conseqüentemente, seus efeitos na dureza do material.

TR altera a difusão de elementos e, assim, a cinética de transformação de fase, conforme explicado no item anterior. Assim, quanto maior TR, menor o tempo

para transformação e, assim, menos ferrita formada, o que eleva HV. No Gráfico 3.44 observa-se este crescimento de HV com TR e também uma tendência a estabilização de HV para TRs muito elevados. Isto explica-se, como para Ar<sub>3</sub>, pela curva TTT, onde há um “nariz” para a transformação austenita-ferrita, havendo uma região cada vez menor para a transformação com a diminuição de TR. Isso explica o crescimento de HV com TR. Entretanto, após passar-se à esquerda desse “nariz”, não há mais ferrita para ser “evitada”, fazendo com que HV se estabilize.

Eram esperado também pesos maiores para PAq, TA, ND e %D, tendo os dois primeiros influência na dissolução de precipitados, aumentando HV. ND e %D supostamente colocariam mais energia no material, facilitando a transformação e, assim diminuindo HV. Entretanto, não foi observada nenhuma alteração de HV com a mudança dos fatores citados.

Nos fatores referentes à composição do material, a maior parte praticamente não alterou a dureza do material, com exceção de P, diminuindo HV, e Cu, Mo e Cr, aumentando a saída. Isto foi esperado para o Cr e o Cu, pois estes combinados com nióbio ou vanádio forma precipitados finos, o que eleva a dureza do material por endurecimento por solução sólida.<sup>[18]</sup> O comportamento do teor de Mo também foi esperado, pois a adição de molibdênio em um aço contendo Nb eleva a fração de ilhas de martensita/austenita no material, além de refinar os grãos e endurecer o material por precipitação.<sup>[18]</sup> O fósforo, diminuindo HV com o aumento de sua concentração também teve um comportamento esperado, pois o fósforo gera segregação do material, diminuindo sua dureza.

Esperava-se, entretanto, um maior peso para os teores de Al, Ti e Nb, já que geram muitos precipitados e o principal fator para a dureza foi o TAUD. Mas, por ser resultado de equações puramente matemáticas, a rede não é fiel aos conceitos metalúrgicos.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos dados presentes neste relatório, foi possível obter redes com bom índice de confiabilidade ( $r$ ) para Ar3 e HV. Em outras palavras, o objetivo do trabalho foi alcançado, uma vez que foi possível encontrar duas redes (uma para Ar3 e outra para HV) capazes de prever os valores dessas variáveis a partir dos dados de entrada com que se trabalhou, que foram a composição química dos aços e os tratamentos térmicos aplicados.

Observou-se, entretanto, que a rede é uma ferramenta poderosa, mas não leva em consideração significados físicos e conceitos metalúrgicos, devendo-se ser cauteloso quando se analisa a sensibilidade das variáveis de entrada nas de saída. Também não deve-se utilizar a rede para valores que extrapolem os valores aos quais se trabalhou, pois as funções matemáticas utilizadas pela rede podem levar a valores muito diferentes dos da realidade.

Outro inconveniente da rede feita neste trabalho é sua limitação, pois pode ser apenas utilizado para ensaios em dilatômetro, e para poucos valores de variáveis.

Sugere-se, para posteriores trabalhos, a realização de mais ensaios no dilatômetro, a fim de ampliar a faixa de valores abrangidos pela rede, tornando-a mais exata e menos limitada.

## REFERÊNCIAS

- [1] RODRIGUES, Guilherme V.; MARCHETTO, Otávio. Apostila de Análises térmicas. UFSC. Disponível em: <http://www.materiais.ufsc.br/Disciplinas/EMC5733/Apostila.pdf>
- [2] FONSECA, Conceição.; SANTOS, Regina. Sociedade Portuguesa de Metrologia. Disponível em [http://www.spmet.pt/Comunicacoes/Conceicao\\_Fonseca.pdf](http://www.spmet.pt/Comunicacoes/Conceicao_Fonseca.pdf). Acesso em 12 de janeiro de 2010
- [3] PRIOR, G.K. The Role of Dilatometry in the Characterization of Steels. BHP Research – Melbourne Laboratories, P.O. Box 264, Clayton Vic., 3168, Australia. Materials Forum, 1994, vol 18, 265-276.
- [4] MESPLONT, C.; Phase Transformations and Microstructure – Mechanical Properties Relations in Complex Phase High Strength Steels – Doctoral Dissertation, Universiteit Gent, 2002.
- [5] COTA, André B.; LACERDA, Cássio A. M.; OLIVEIRA, Fernando L. G.; ARAÚJO, Fernando Gabriel S. Influência da temperatura de austenitização sobre a cinética de formação da ferrita em um aço micro ligado com Nb. R. Esc. Mina, Ouro Preto, out. dez. 2002, 273-277.
- [6] CALLISTER, W. D. *e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.
- [7] UFJF, Apostila de Laboratório de Resistência dos Materiais. Aula 13 - Dureza Vickers. Disponível em <http://www.lrm.ufjf.br/pdf/13vickers.pdf> (acesso em 11 de janeiro de 2010).
- [8] BHADSHIA, H. K. D. H.; DIMITRIU, R. C.; FORSIK, S; PAK, J. H.; RYU, J. H. Performance of neural networks in materials science. Materials Science and Technology, 2009, vol 25, no 4, 504-510.
- [9] CHATTERJEE, S.; MURUGANANTH, M.; BHADSHIA, H. K. D. H. *Y TRIP Steel*. Materials Science and Technology, 2007, vol 23, no 7 , 819-827.
- [10] BOCABELLO, Roberto Z.; Desenvolvimento de uma rede neural artificial para parametrização de forno de tratamento térmico de solubilização de liga AlCuSiSn. São Paulo, 2008, Trabalho de Formatura.
- [11] CARLINI, Ricardo C.; Aplicação das redes neurais adaptativas na previsão das curvas tensão deformação de aços. São Paulo, 2008, Trabalho de Formatura.

- [12] Uma introdução às Redes Neurais. Disponível em (<http://www.din.uem.br/ia/neurais>) Acesso em 21 de janeiro de 2010
- [13] Site do Neuro Solutions. Disponível em [www.neurosolutions.com](http://www.neurosolutions.com). Acesso em 11 de 13 de janeiro de 2010.
- [14] Manual do dilatômetro Bähr 805.
- [15] Wikipédia. Disponível em <http://wikipedia.org/en> . Acesso em 12 de janeiro de 2010.
- [16] Zwick/Roell. Manual da máquina de dureza Vickers (ZHV 20/Z2.5). Disponível em [www.zwick.com](http://www.zwick.com). Acesso em 11 de janeiro de 2010.
- [17] Zwick/Roell. Catálogo testXpert II. Disponível em: [http://pdf.directindustry.com/pdf/zwick/testxpert-ii/15660-3687-\\_8.html](http://pdf.directindustry.com/pdf/zwick/testxpert-ii/15660-3687-_8.html) (Acesso em 11 de janeiro de 2010).
- [18] TANG, Z. University of Pretoria, 2006, Capítulos 1, 2 e 3. Disponível em: <http://upetd.up.ac.za/thesis/available/etd-07212007-110711/unrestricted/01chapters1-3.pdf> (Acesso em 24 de janeiro de 2010).
- [19] Apostila para disciplina de materiais mecânicos II da Unisinos, disponível em: [http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Materiais\\_II\\_-\\_grau\\_B\\_-\\_acosgraub.doc](http://www.exatec.unisinos.br/~fortis/arquivos/Materiais_II_-_grau_B_-_acosgraub.doc). (Acesso em 27 de janeiro de 2010).

**APÊNDICE A – Valores encontrados experimentalmente para macro dureza Vickers e temperatura HV e seus respectivos desvios.**

• **Material C014B**

PAq	ND	D1 %	TD1 C	D2 %	TD2 C	TED s	TB C	TAUD s	TA min	TR C/s	Ar3		HV	
											média	desvio	média	desvio
não	1	30	850	-	-	-	450	0	2	1	709	22,8	213,0	6,1
										10	621	19,0	205,8	10,9
										10	705	1,0	198,3	3,1
										10	650	14,6	202,7	2,5
							550	0	2	1	734	36,2	220,7	2,5
										10	622	19,8	216,7	4,0
										10	719	40,0	197,4	14,1
										5	682	41,5	212,2	2,0
										10	621	48,2	216,2	4,5
										20	634	49,5	221,8	1,2
										1	680	43,7	195,5	5,3
										10	664	22,0	200,0	3,5
										10	707	50,1	191,7	4,5
		50	850	-	-	-	550	0	2	1	680	43,7	195,5	5,3
										10	664	22,0	200,0	3,5
										10	707	50,1	191,7	4,5
										10	640	58,4	218,3	5,1
Sim	1	50	850	-	-	-	550	0	2	10	698	-	220,3	0,6
										10	548	-	220,3	4,6
não	2	30	1000	30	850	0	-	0	10	1	742	12,0	204,0	14,2
										10	654	7,0	214,3	5,3

• **Material 10230A**

PAq	ND	D1 %	TD1 C	D2 %	TD2 C	TED s	TB C	TAUD s	TA min	TR C/s	Ar3		HV	
											média	desvio	média	desvio
não	1	30	850	-	-	-	450	0	2	1	681	21,9	209,3	5,5
										10	589	23,5	216,0	2,6
										10	687	16,0	207,7	2,1
										10	609	0,8	214,7	1,5
							550	0	2	1	702	9,6	210,0	3,6
										10	631	6,5	220,3	7,4
										5	637	67,7	218,7	2,5
										20	768	-	223,3	3,5
										10	744	31,3	210,3	6,5
										5	654	40,3	222,1	5,7
										10	710	-	222,3	5,1
										20	604	52,6	219,7	6,4
		50	850	-	-	-	550	0	2	1	690	40,1	201,0	3,5
										10	660	12,4	223,3	2,1
										10	699	43,4	193,7	4,0
										10	651	48,6	228,0	4,6
Sim	1	50	850	-	-	-	550	0	2	10	649	-	228,7	3,8
										10	629	-	224,7	4,5
não	2	30	1000	30	850	0	-	0	10	1	729	10,6	201,3	2,5
										10	571	-	226,5	12,1

- Material X020

PAq	ND	D1 %	TD1 C	D2 %	TD2 C	TED s	TB C	TAUD s	TA min	TR C/s	Ar3		HV	
											média	desvio	média	desvio
não	1	30	850	-	-	-	450	0	2	1	633	-	217,3	1,2
										10	567	-	233,0	3,6
										10	685	-	218,7	2,5
										10	601	-	232,7	2,5
								550	0	2	660	24,2	228,3	2,5
										10	639	10,3	261,3	3,1
										5	613	15,4	243,0	1,0
										10	702	-	226,7	4,5
										5	642	46,1	240,2	3,5
										10	607	41,5	234,0	7,0
										20	587	45,0	232,2	5,2
		50	850	-	-	-	550	0	2	1	650	89,0	221,2	7,2
										10	585	-	236,3	5,5
										10	668	-	220,7	3,2
										10	586	20,1	219,8	10,5
										10	707	-	224,7	3,1
										10	628	57,1	251,7	0,6
Sim	1	50	850	-	-	-	550	0	2	1	707	-	224,7	3,1
										10	628	57,1	251,7	0,6
										5	607	-	232,8	21,8
										10	684	-	232,7	8,1
										10	598	51,1	239,0	3,5
	não	1	30	850	-	-	-	-	0	5	640	-	219,0	1,0
										10	622	-	236,3	10,6
										30	657	-	217,0	8,7
										10	587	-	233,7	2,1
										300	702	11,0	182,7	2,5
										10	618	-	219,3	2,5
										3000	728	-	161,3	3,5
										10	684	-	201,3	3,1
	não	2	30	1000	30	850	0	-	0	10	687	17,4	219,7	9,5
										10	563	17,3	235,7	0,6
										5	678	1,9	214,0	1,0
										10	631	-	235,3	5,0
										300	710	10,6	187,7	1,5
										5	710	10,6	187,7	1,5



- Material X021

PAq	ND	D1 %	TD1 C	D2 %	TD2 C	TED s	TB C	TAUD s	TA min	TR C/s	Ar3		HV	
											média	desvio	média	desvio
não	1	30	850	-	-	-	450	0	2	1	708	14,6	204,3	0,6
										10	619	52,7	213,3	4,9
										10	689	35,9	204,0	3,6
										10	608	1,2	212,7	1,5
										1	718	5,6	203,3	2,9
										10	696	53,9	222,3	2,0
										5	640	36,3	221,3	7,0
										20	632	-	222,3	2,1
										10	760	33,8	207,2	5,9
										5	644	44,1	216,3	2,5
										10	662	30,6	219,1	4,5
										20	622	7,3	222,7	1,8
		50	850	-	-	-	550	0	2	1	707	0,2	202,4	6,6
										10	592	17,0	219,8	1,5
										10	713	31,6	196,0	1,0
										10	614	4,6	220,3	0,6
										10	701	-	227,3	6,4
Sim	1	50	850	-	-	-	550	0	2	5	695	-	228,7	4,5
										10	671	-	224,3	2,1
										10	709	-	200,7	1,2
não	1	30	850	-	-	-	-	0	5	1	614	-	221,3	4,0
										10	685	-	155,7	2,5
										10	561	-	217,0	1,0
										300	732	4,6	203,7	4,5
										10	590	-	207,7	2,5
										3000	756	-	176,7	1,5
										10	688	-	190,0	5,6
										10	733	-	204,7	4,9
										10	643	3,8	216,3	0,6
		20	1100	30	850	100	-	0	5	1	718	15,2	200,7	3,2
10	600									-	219,7	6,0		
300	738									3,8	176,0	1,7		

- Material X022

PAq	ND	D1 %	TD1 C	D2 %	TD2 C	TED s	TB C	TAUD s	TA min	TR C/s	Ar3		HV										
											média	desvio	média	desvio									
não	1	30	850	-	-	-	-	0	5	1	711	-	199,7	0,6									
										10	629	-	222,0	1,0									
										30	727	-	203,3	2,9									
										10	630	-	218,0	1,7									
										300	742	5,5	167,0	1,7									
										10	736	-	201,0	1,7									
										3000	776	-	151,0	6,2									
										10	679	-	257,3	17,4									
										2	20	1100	30	850	100	-	0	5	1	747	12,4	198,3	2,1
																			10	607	-	216,3	4,9
300	742	4,5	172,0	7,8																			

## APÊNDICE B – Tabela editadas para utilização no Neuro Solutions

- Para HV:

C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Nb	Cu	Ni	MO	Cr	PAq	ND	%D	TAUD	TA	TR	HV
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	2	1	213
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	2	10	206
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	10	1	198
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	10	10	203
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	2	1	221
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	2	10	217
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	10	1	197
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	10	5	212
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	10	10	216
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	10	20	222
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	50	0	2	1	196
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	50	0	2	10	200
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	50	0	10	1	192
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	50	0	10	10	218
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	1	1	50	0	2	10	204
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	1	1	50	0	10	10	214
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	2	30	0	10	1	220
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	2	30	0	10	10	220
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	2	1	209
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	2	10	216
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	10	1	208
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	10	10	215
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	2	1	210
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	2	10	220
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	5	10	219
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	5	20	223
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	10	1	210
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	10	5	222
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	10	10	222
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	10	20	220
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	50	0	2	1	201
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	50	0	2	10	223
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	50	0	10	1	194
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	50	0	10	10	228
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	1	1	50	0	2	10	201
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	1	1	50	0	10	10	227
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	2	30	0	10	1	229
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	2	30	0	10	10	225
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	2	1	217

71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	2	10	233
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	10	1	219
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	10	10	233
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	2	1	228
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	2	10	261
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	5	10	243
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	10	1	227
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	10	5	240
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	10	10	234
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	10	20	232
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	5	1	219
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	5	10	236
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0,01	5	1	217
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0,01	5	10	234
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0,1	5	1	183
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0,1	5	10	219
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	1	5	1	161
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	1	5	10	201
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	50	0	2	1	221
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	50	0	2	10	236
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	50	0	10	1	221
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	50	0	10	10	220
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	1	1	50	0	2	1	225
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	1	1	50	0	2	10	252
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	1	1	50	0	5	10	233
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	1	1	50	0	10	1	233
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	1	1	50	0	10	10	239
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	2	30	0	10	1	220
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	2	30	0	10	10	236
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	2	30	0	5	1	214
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	2	30	0	5	10	235
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	2	30	0,1	5	1	188
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	1	30	0	2	1	204
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	2	10	213
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	10	1	204
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	10	10	213
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	2	1	203
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	2	10	222
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	5	10	221
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	5	20	222
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	10	1	207
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	10	5	216
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	10	10	219
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	10	20	223
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	5	1	201
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0	5	10	221

69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0,01	5	1	156
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0,01	5	10	217
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0,1	5	1	204
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	0,1	5	10	208
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	1	5	1	177
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	30	1	5	10	190
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	50	0	2	1	202
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	50	0	2	10	220
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	50	0	10	1	196
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	1	50	0	10	10	220
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	1	1	50	0	2	10	227
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	1	1	50	0	5	10	229
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	1	1	50	0	10	10	224
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	2	30	0	10	1	205
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	2	30	0	10	10	216
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	2	30	0	5	1	201
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	2	30	0	5	10	220
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	3	0	2	30	0,1	5	1	176
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	1	30	0	5	1	200
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	1	30	0	5	10	222
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	1	30	0,01	5	1	203
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	1	30	0,01	5	10	218
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	1	30	0,1	5	1	167
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	1	30	0,1	5	10	201
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	1	30	1	5	1	151
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	1	30	1	5	10	257
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	2	30	0	5	1	198
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	2	30	0	5	10	216
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	2	30	0,1	5	1	172

• Para Ar3:

C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Nb	Cu	Ni	MO	Cr	PAq	ND	%D	TAUD	TA	TR	Ar3
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	2	1	709
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	2	10	621
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	10	1	705
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	10	10	650
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	30	0	2	10	622
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	1	50	0	2	10	664
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	2	30	0	10	1	742
51	17	27	13	70	36	12	95	17	1,4	71	27	0	2	30	0	10	10	654
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	2	1	681
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	2	10	589
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	10	1	687
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	10	10	609

66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	2	1	702
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	30	0	2	10	631
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	1	50	0	2	10	660
66	16	28	16	36	33	21	68	11	25	32	2,7	0	2	30	0	10	1	729
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	2	1	660
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	2	10	639
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0	5	10	613
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	1	30	0,01	5	10	586
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	1	1	50	0	2	10	702
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	2	30	0	10	1	687
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	2	30	0	10	10	563
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	2	30	0	5	1	678
71	17	41	16	29	40	22	75	16	37	23	2	0	2	30	0,1	5	1	710
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	1	30	0	2	1	708
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	1	30	0	10	10	608
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	1	30	0	2	1	718
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	1	30	0	10	20	622
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	1	30	0	5	1	707
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	1	30	0	5	10	592
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	1	30	0,01	5	10	614
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	1	50	0	10	10	732
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	2	30	0	10	10	643
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	2	30	0	5	1	718
69	16	29	17	37	35	21	71	12	25	36	2,6	0	2	30	0,1	5	1	738
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	1	30	0,1	5	1	742
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	2	30	0	5	1	747
64	16	29	16	2.4	39	21	68	11	3	0	0	0	2	30	0,1	5	1	742